TDMA Media Access Control Mechanisms in the Upstream Channel of Passive Optical ATM Access Networks

Summary

Our modern information society is built on the availability and exchange of information as an integral part of both economic and private life. For example, the amount of traffic carried per year by the world-wide Internet is growing both due to the increasing popularity of private and business usage of the Internet and also due to the increasing number and size of documents available in the World Wide Web (WWW). The information and services offered via the WWW – from scientific research reports to culture and travel information, telephone directory services, dictionaries, train time tables and even online shopping – make this medium very attractive also for private use. The availability of powerful computers, the integration of "classic" data services for file and document exchange (ftp and e-mail) into easy-to-use WWW browsers also facilitate the growth of world-wide data networks.

Today, residential broadband network access is mostly realized via copper pairs (telephone network with analog or digital subscriber lines), coaxial cables (TV cable networks), radio technology (terrestrial or satellite) or even the power supply infrastructure (powerline communication, PLC). Several studies [20, 41, 47, 50, 69, 70, 87, 136, 154] claim that in the future, passive optical networks (PON) will gain importance in broadband access. One example for a project building an ATM PON demonstrator was the BAF *(Broadband Access Facilities)* project funded by the European Union [26]. In such ATM PON networks special attention needs to be paid to the upstream media access control if the network is required to offer certain quality of service guarantees such as low delay variation on the one hand and statistical multiplexing of the traffic from different subscribers on the other hand. In this thesis, the mechanisms for upstream media access control to be used in passive ATM access networks are classified, studied and compared with respect to their performance, particularly concentrating on delay variation issues.

In the literature on access networks, the description of network architectures frequently is a mix of functional and topological aspects. For functional partitioning, there are several standards which are incompatible in details. For this reason, in chapter 2 first a comparison of the different standards' reference configurations is done, followed by a comparison of access networks to point-to-point access lines, including an analysis of their differences. Several architectures using fibre optic lines in the subscriber loop area have been given "FTTx" names in the literature (FTTH, FTTC, FTTB and many more). These terms are compared and explained with respect to their significance for the functional and topological partition-

ing of access networks (table 2.1 and Fig. 2.15). In order to avoid misunderstandings when compared to other work, the concept of an “access station” *(Zugangsstation)* is introduced here and brought into reference with other names in Fig. 2.27.

In the access networks literature there is also a certain degree confusion between duplex, multiplex and multiple access methods. For this reason these terms are brought into a consistent context and the methods associated with them are discussed briefly. Using this foundation, different well-known network concepts for ATM access are being summarized and compared with respect to their similarities and differences. Chapter 2 closes with defining the parameters for the PON systems that are the targets of investigation in the following chapters and by discussing the differences of these parameters if compared to other network concepts.

In chapter 3, the principles of the investigation methods used in chapters 5 through 7 for comparison of different media access control mechanisms for ATM access networks are introduced. In addition to introducing the different definitions for cell delay variation as a measure for the influence of media access control on the ATM traffic carried through the access network, the mathematical basics of ensemble statistics and virtual waiting time concepts are described. In simulation, special methods are employed for investigating ensemble statistics of periodic systems and for deriving confidence intervals for measured distribution quantiles.

In chapter 4 the different media access control protocols for ATM access networks are decomposed systematically into their basic mechanisms. These mechanisms are briefly described and are later used to introduce a classification of media access control protocols in section 4.6.

The main chapter of this thesis is chapter 5 in which the mechanisms isolated in chapter 4 are combined in different ways, allowing to investigate the influence of single mechanisms on the performance of a media access control protocol. A set of four homogeneous artificial traffic scenarios is defined, offering constant and variable cell rate sources with source periods that are short or long compared to the round-trip delay in the access network (table 5.1 on page 88). Reference results for these scenarios are obtained with a concentrated multiplexer model to show the performance limits that can be reached with dedicated access lines and no media access control mechanisms.

Discrete event simulation is used for most investigations. However, for some cases analytic models are developed also, which have the advantage of directly giving insight into the influence of different parameters on the results. Two new analytic models have been developed, the details of which are provided in appendix A: One model describes a clocked single-server system with periodic input (N*D/C/1), which uses an extension of the virtual waiting time approach to handle the case of a periodical instead of an asynchronous deterministic server, which was state of the art in the N*D/D/1 analyses. The differences between the results of both models are shown in Fig. 5.4. The second model is based on the ensemble statistics view of the transient phase of a media access protocol when an on/off traffic source is switched on. It allows the comprehension of quite a few of the characteristics visible in transfer delay probability distribution functions acquired previously by simulation only. This is illustrated in Fig. 5.35. Figures 5.39 and 5.40 show that the analysis yields insights not only into the case of an empty system with a source switching from "off" to "on" state, but also for a normally loaded system.

The issue of using either periodic polling or a contention based mechanism for transporting access station state information to the central media access control process in the headend has often been discussed with ideological fervour. The investigations in sections 5.4 and 5.5.4 offer a systematic comparison of both approaches under comparable parameter settings, demonstrating that even an optimized stack algorithm is unable to reach the performance of periodic request polling under the assumption of a relatively long round trip delay and a fairly large number of active stations.

Section 5.6 deals with various approaches that have been proposed to use scheduling of permits to reduce the amount of cell delay variation which is introduced by the media access control process. The essential result is that except for the "BPP" proposal, which explicitly schedules permits according to detailed timing information collected with a high overhead, none of the other proposals really reduces the cell delay variation under general circumstances.

Generalizing some of the results from the analysis in appendix A.4 in section 5.7, a quantitative approach is offered to show under which circumstances random access to mini slots is favourable over periodic polling when a *delay quantile* is considered, which is a fairly strict measure for quality of service. The results summarized in Fig. 5.71 indicate that under otherwise comparable parameters, the delay generated by periodic polling is dominated by the *total number* of access stations whereas the performance of random access depends on the number of *active* access stations and the round trip delay between access stations and headend. Fig. 5.71 shows that for long round trip delays or for a large fraction of active access stations, periodic polling shows better performance whereas for short round trip delays *and* when only a small fraction of all access stations are active, random access to request mini slots outperforms periodic polling even if probabilistic quality of service measures such as the ($1\text{-}10^{-5}$) quantile of delay are applied.

In chapter 6 different methods for supporting multiple traffic categories during media access control are compared. The results of this comparison and the results from chapter 5 are then used to synthesize two system proposals supporting multiple traffic categories. Furthermore, the proposals are evaluated using different inhomogeneous traffic scenarios.

The media access control mechanisms not only influence the cell and burst level behaviour of ATM access networks as investigated in sections 5 and 6 but also the quality of service parameters that can be guaranteed by connection level connection admission control (CAC) functions. The performance of media access control mechanisms is non-monotonic, i.e. the performance that is observed for a given source cell rate cannot be guaranteed if the source transmits at a *lower* rate. This effect has certain implications on the achievable quality of service guarantees, which are summarized in Figures 7.1 and 7.2.

Appendix A.1 describes the above mentioned analysis of the N*D/C/1 single server system with periodic input and clocked service using an extended virtual waiting time approach. The solutions for two simple problems, namely the delay distribution in a 1*D/C/1 system with a clocked (C) gate and the expectation of $\lfloor X \rfloor$, are given in sections A.2 and A.3. These results are used in the analysis of the transient behaviour of the activity polling model, which is given in appendix A.4.

In appendix B, two algorithms are specified. The first one is used to convert queue lengths to the number of new arrivals in a robust manner, ensuring that a media access control mechanism does not become instable if MAC information is lost. The second algorithm is a generalized generic cell rate algorithm to be used in a virtual scheduler under the presence of batch arrivals.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen

AA	Aktivitätsangabe, Aktivitätsabfrage (S. 67)
AAL	ATM Adaptation Layer
ABR	Available Bit Rate [82, 18]
ABT	ATM Block Transfer [82]
ABT-dt	ABT with delayed transmission [82]
ABT-it	ABT with immediate transmission [82]
ACTS	Advanced Communications Technologies and Services
AN	Access Network
ANI	Access Network Interface [16]
ATM	Asynchronous Transfer Mode
BA	Bedarfsangabe
BB	Bedarfsangaben-Block (S. 43)
BAF	Broadband Access Facilities [26]
BCCP	Bearer Channel Control Protocol
BF	Bedarfsangaben-Feld (S. 43)
B-ISDN	Breitband-ISDN
BK	Breitband-Kabel
BM	Bedarfsmeldung (S. 104)
BPP	Belt Permit Programmer (MAC-Protokoll) [9]
CATV	Community Antenna Television
CBR	Constant Bit Rate [18]
CCR	Constant Cell Rate
CDF	Complementary Distribution Function
CDM	Code Division Multiplexing
CDMA	Code Division Multiple Access
CDV	Cell Delay Variation
CO	Central Office
CPE	Customer Premises Equipment
CPP	Cyclic Permit Programmer (MAC-Protokoll) [8]

CPS	Content Provider System [42]
DAA	Dynamic Allocation Algorithm (MAC-Protokoll) [95]
DAVIC	Digital Audio-Visual Council [42]
DBR	Deterministic Bit Rate [82]
DDM	Direction Division Multiplexing
DMT	Discrete Multitone
DS	Delivery System [42]
DSA	Dynamic Slot Assignment (MAC-Protokoll)
DSRM	DAVIC System Reference Model [42]
ELtg	Endleitung
EPD	Early Packet Discard [60]
ET	Exchange Termination
ET	Elementartest (Simulationstechnik, S. 53)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EVz	Endverzweiger
FDI	Feeder Distribution Interface
FEC	Forward Error Correction
FIFO	First In First Out
FITL	Fibre in the Loop
FTP	File Transfer Protocol [123]
FTTB	Fibre to the Building
FTTC	Fibre to the Curb
FTTCab	Fibre to the Cabinet
FTTEx	Fibre to the Exchange
FTTH	Fibre to the Home
FTTK	Fibre to the Kerb (s. FTTC)
FTTLA	Fibre to the Last Amplifier (HFC)
FTTM	Fibre to the Microwave
FTTO	Fibre to the Office
GCRA	Generic Cell Rate Algorithm [82, 18]
GF	Global FIFO (MAC-Protokoll) [31, 95]
HEC	Header Error Control
HFC	Hybrid Fibre Coax
HFR	Hybrid Fibre Radio
Hk	Hauptkabel
HTTP	Hypertext Transfer Protocol [52]
HVt	Hauptverteiler

IAA	inkrementelle Aktivitätsangabe (S. 68)
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.
ISDN	Integrated Services Digital Network
ISO	International Organization for Standardization
ITU	International Telecommunications Union
kgV	kleinstes gemeinsames Vielfaches
KM	Kollisionsmeldung bei wahlfreiem Zugriff auf Minizeitschlitze (Abb. 5.25
KSt	Kopfstation (Abb. 2.27)
KVz	Kabelverzweiger
LAIP	Local Exchange Access Network Interaction Protocol
LB	Leaky Bucket
LEX	Local Exchange
LD	Laserdiode
LST	Laplace-Stieltjes-Transformation
LT	Laplace-Transformation
LT	Line Termination
MAC	Media Access Control
MBS	Mobile Broadband System
MDF	Main Distribution Frame
MLAP	MAC Level Access Protocol (MAC-Protokoll) [23]
MPEG	Motion Pictures Experts Group
N-ISDN	Narrowband ISDN
NT	Network Termination
NU	Network Unit
OAM	Operations, Administration and Maintenance
OFDM	Optical Frequency Division Multiplexing
ONU	Optical Network Unit
OLT	Optical Line Termination
OVst	Ortsvermittlungsstelle
PACS	Priority Access Control Scheme (MAC-Protokoll) [113]
PCM	Pulse Code Modulation
PD	Photodiode
PON	Passive Optical Network
QoS	Quality of Service
RACE	Research for Advanced Communications Technologies in Europe
RITL	Radio in the Loop
RTD	Round Trip Delay

S^3R	Single Symbol Simultaneous Reservation (MAC-Methode) [12]
SB	Sendeberechtigung
SBR	Statistical Bit Rate [82]
SC	Star Coupler
SCS	Service Consumer System [42]
SDD	Space Division Duplex
SDI	Subscriber Distribution Interface
SDM	Space Division Multiplexing
SPS	Service Provider System [42]
TCM	Time Compression Multiplexing
TCP	Transmission Control Protocol [122]
TDD	Time Division Duplex
TDM	Time Division Multiplexing
TDMA	Time Division Multiple Access
TE	Terminal Equipment
TII	Technology Independent Interface [16]
UNI	User Network Interface [17]
UPC	Usage Parameter Control
VBR	Variable Bit Rate [18]
VCR	Variable Cell Rate
VC	Virtual Channel
VDF	Verteilungsdichtefunktion
VDSL	Very High Bit Rate Digital Subscriber Line
VF	Verteilungsfunktion
VP	Virtual Path
VPC	Virtual Path Connection
VPI	Virtual Path Identifier
WAN	Wide Area Network
WDM	Wavelength Division Multiplexing
WDMA	Wavelength Division Multiple Access
WFBM	Wahlfreie Bedarfsmeldung
WFQ	Weighted Fair Queueing [56]
WL	Warmlauf (Simulationstechnik)
WSL	Warteschlangenlänge
ZS	Zeitschlitz
ZSt	Zugangsstation (S. 42)
ZV	Zufallsvariable

Formelzeichen

Allgemeines

Zufallsvariable werden durch Großbuchstaben und ihre Realisierungen durch den entsprechenden Kleinbuchstaben bezeichnet. Die verwendete Notation wird auch in Abschnitt 3.2.1 erläutert.

Funktionen und Operatoren

$\mathbf{1}\{A\}$	Indexfunktion. Die Funktion hat den Wert 1, wenn der Ausdruck A wahr ist und den Wert 0, wenn A nicht wahr ist.
$\lfloor x \rfloor$	Die größte ganze Zahl, die kleiner oder gleich x ist: $\lfloor x \rfloor = \max\{i \in \mathbf{Z} : i \leq x\}$
$\lceil x \rceil$	Die kleinste ganze Zahl, die größer oder gleich x ist: $\lceil x \rceil = \min\{i \in \mathbf{Z} : i \geq x\}$

Formelzeichen

A_R	gesamtes Verkehrsangebot an das Zugangsnetz in Rückrichtung (S. 88)
A_i	Anzahl der Ankünfte an Zugangsstation i seit der letzten Meldung (S. 213)
b	Büschelfaktor. Verhältnis der maximalen zur mittleren Zellrate einer Quelle. (S. 88)
b_{ATM}	Anzahl der Bits in einer ATM-Zelle. $b_{ATM} = 424$ (S. 132)
b_{PHY}	Anzahl der zusätzlichen Bits für Synchronisation vor einem in der Rückrichtung übertragenen Datenblock, (S. 132)

b_Q	Anzahl der Verkehrsquellen je Zugangsstation (S. 88)
c	Laufvariable für Realisierungen der Zufallsvariable C_B (S. 206)
C_B	Zufallsvariable für die Anzahl von Zellen in einem Büschel (S. 196)
c_B	Erwartungswert der Anzahl von Zellen in einem Büschel (S. 88)
C_x	Anzahl der in Phase x, $x \in \{I, II, III, IV\}$, ankommenden Zellen (S. 207)
$CDV^{(2)}$	Zweipunkt-Zellverzögerungsschwankung. Differenz aus maximaler und minimaler Durchlaufzeit (S. 142).
d	Dauer der Periode einer Quelle im N*D/C/1-System (S. 184)
$f^{(b)}_{RW_x}(t)$	Verteilungsdichtefunktion von T_{RW} für die b-te Zelle im Büschel in Phase x; $x \in \{I, II, III, IV\}$ (S. 199)
$f^{(b)}_{W_x}(t)$	Verteilungsdichtefunktion von T_W für die b-te Zelle im Büschel in Phase x; $x \in \{I, II, III, IV\}$ (S. 199)
h_D	Dauer eines Takt- und Bedien-Intervalles der getakteten Bedieneinheit im System N*D/C/1 (S. 81, S. 184)
$K(i)$	Anzahl der Mini-Zeitschlitze vor dem $i+1$-ten, in denen Kollisionen aufgetreten sind. (S. 108)
m	Anzahl der Bedarfsangaben-Felder pro Bedarfsangaben-Block bzw. Anzahl der Aktivitätsangaben-Felder pro Aktivitätsangaben-Block (S. 43 ff.)
M_i	Zustand der Warteschlange in Zugangsstation i aus Sicht der Kopfstation, (S. 213)
n	Anzahl der (aktiven) Zugangsstationen im Zugangsnetz (S. 88)
n_0	Anzahl aller Zugangsstationen im Zugangsnetz (S. 88)
n_{SZR}	Anzahl der bei Spitzenzellratenzuteilung möglichen TS-Quellen an einem Multiplexer (S. 88)
p_{FK}	Wahrscheinlichkeit für eine Folgekollision bei wahlfreier Aktivitätsmeldung (S. 146)
p_k	Wahrscheinlichkeit, mit der k TS-Quellen gleichzeitig aktiv sind (S. 88)
$p_K(\nu)$	Wahrscheinlichkeit für ν Folgekollisionen bei wahlfreier Aktivitätsmeldung (S. 146)
p_S	Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zugangsstation in einem Zyklus an der wahlfreien Aktivitätsmeldung teilnimmt (S. 146)

p_{Verl} Verlustwahrscheinlichkeit bei der Betrachtung von TS-Quellen auf der Büschelebene (S. 88)

Q_i Zustand der Warteschlange in Zugangsstation i, wie er in der Bedarfsangabe übertragen wird (S. 213)

q_W Aufspreizungsfaktor des Stack-Algorithmus zur Kollisionsauflösung bei wahlfreier Bedarfsmeldung (S. 109)

R Zufallsvariable für die Größe einer Gruppenankunft, (S. 94)

r Anzahl der Zeitschlitz-Blöcke, die zu einer Bedarfsangabe für explizite Wiederherstellung des Verkehrsprofiles zusammengefaßt werden, (S. 132)

r_B Anzahl der aufeinanderfolgenden Zeitschlitze, die für Bedarfsmeldungen vorgesehen sind (S. 106)

s „Frequenz“-Variable in der Laplace-Transformation (S. 50)

T_1 Zufallsvariable für die Modellierung von T_{RW} im $\mathrm{D}^{[GI]}$/D/1-Modell mit zyklischen Auszeiten (S. 93)

T_2 Zufallsvariable für die Modellierung von T_{PW} im $\mathrm{D}^{[GI]}$/D/1-Modell mit zyklischen Auszeiten (S. 93)

t_B Tor-Periode im 1*D/C/1-Modell mit getaktetem Tor (S. 192)

T_D Zufallsvariable für die Durchlaufzeit einer ATM-Zelle vom Eintritt in die Zugangsstation bis zum Verlassen der Kopfstation (S. 92)

t_L Dauer der Lücke zwischen zwei Blöcken unterschiedlicher Richtung bei Zeitduplex(S. 23)

t_{PE} Effektive Abfrageperiode (S. 94)

T_{PW} Aufenthaltsdauer in der zentralen Warteschlange für Sendeberechtigungen in der Kopfstation (S. 198)

t_Q Periode der Quelle (Zellabstand, S. 88)

t_R Rahmendauer (S. 65, S. 131)

T_{RW} Zufallsvariable für die Reaktionszeit zwischen Ankunft einer Zelle und der Möglichkeit, eine Bedarfsangabe abzusenden; Zugriffszeit (S. 198)

T_W Zufallsvariable für die Summe aus T_{RW} und die Mindestaufenthaltszeit in der zentralen Permit-Warteschlange; Gesamtwartezeit (S. 199)

T_x	Dauer der Phase x, $x \in \{I, II, III, IV\}$, in Anhang A.4 (S. 199)
t_Z	Dauer eines Zeitschlitzes (S. 44)
t_{ZD}	Übertragungsdauer für einen Block bei Zeitduplex (S. 23)
u	Anzahl der in einer Zugangsstation zusammengefaßten NTs bei BPP (S. 134)
v_K	Übertragungsgeschwindigkeit auf dem Kanal bei Zeitduplex (S. 23)
v_Q	mittlere Übertragungsgeschwindigkeit für eine Richtung bei Zeitduplex (S. 23)
$\mathbf{Z}$	Menge der ganzen Zahlen
$\alpha_i(b)$	Gewicht in der Verteilungsdichtefunktion für T_W oder T_{RW}, ($i \in \{1, 2, 3\}$) (S. 205)
$\beta_{a,b}$	Parameter bei der Berechnung der in Phase II und III ankommenden Zellen in Anhang A.4 (S. 207)
γ_x	Grenzen der Beiträge zur Verteilungsdichtefunktion für T_W oder T_{RW} in Phase III, $x \in \{a, b, c\}$ (S. 204)
δ_{II}	Abstand zwischen Eintreffen der Bedarfsangabe für Phase II und der nächsten Sendeberechtigung für einen AA-Block (S. 202)
ε	Parameter für die Verkehrsformung im Bündel (S. 127)
$\zeta_y(k)$	zusätzliche Verzögerung in der zentralen Warteschlange der Kopfstation (S. 200)
η	Anzahl der zusammengefaßten Zeitschlitze in einer Bedarfsangabe zur expliziten Wiederherstellung des Verkehrsprofiles (S. 131)
κ_x	Mindestanzahl von Zellankünften während einer Phase x in Anhang A.4 (S. 201)
λ	Summenrate aller Quellen bei negativ-exponentiell verteilten Abständen der Anforderungen (S. 94)
λ_0	Rate einer Quelle bei negativ-exponentiell verteilten Abständen der Anforderungen (S. 94)
ν	Anzahl der Wiederholungen einer wahlfreien Aktivitätsmeldung (S. 145)
$\Xi(t, t_Q, t_B)$	Verteilungsdichtefunktion der Durchlaufzeit in dem in Anhang A.2 beschriebenen System (S. 193)
$\xi_x(b)$	zusätzliche Verzögerung in der zentralen Warteschlange der Kopfstation für Zelle b der Phase x (S. 200)

ρ_P	Anteil der Übertragungskapazität des Rückkanals, der für Bedarfsangaben oder -meldungen reserviert ist (S. 90)
ρ_{ZSt}	Auslastung einer Zugangsstation, bezogen auf ihre Sendeberechtigungsrate (S. 84)
τ	einfache Laufzeit zwischen Zugangs- und Kopfstation (S. 39)
$\Psi_D(s)$	LST einer Gleichverteilung zwischen 0 und h_D (S. 50)

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Breitband-Teilnehmerzugang und ATM

In der modernen Dienstleistungsgesellschaft ist der Austausch und Abruf von Informationen zu einem wesentlichen Bestandteil des Wirtschafts- und Privatlebens geworden. Der Datenverkehr beispielsweise im Internet wächst einerseits durch die zunehmende Verbreitung von Internet-Anschlüssen im privaten und geschäftlichen Bereich und andererseits durch die Zunahme der Anzahl und Größe der im *World Wide Web* (*WWW*) abrufbaren Dokumente. Die im WWW angebotenen Informationen und Dienste – von wissenschaftlichen Fachberichten über Kultur- und Reiseinformationen, Telefonauskunft und Wörterbücher bis hin zur Fahrplanabfrage und Warenbestellung – machen dieses Medium auch für den privaten Einsatz attraktiv. Die Verbreitung leistungsfähiger Computer, die Integration der „klassischen" Datendienste zur Datei- und Dokumentenübertragung (ftp [123], e-mail) in Computerprogrammen zur Netzkommunikation (*browser*) und die Nutzung der in den Industrieländern flächendeckend vorhandenen Telefoninfrastruktur zum Netzzugang mit Hilfe analoger Modems tragen ein übriges zum Wachstum der weltweiten Datennetze bei.

Bis vor einigen Jahren wurden Video-Abrufdienste (*Video on Demand*) als die treibenden Dienste für die Markteinführung von Teilnehmerzugängen zu Hochgeschwindigkeits-Kommunikationsnetzen angesehen. Daher wurden teilweise Systeme mit stark asymmetrischer Aufteilung der Übertragungskapazität vom und zum Teilnehmeranschluß konzipiert. Für die Video-Übertragung zum Teilnehmeranschluß wurden etwa 4–30Mbit/s vorgesehen, während in der Gegenrichtung nur ein schmalbandiger Kanal mit etwa 64kbit/s zur Steuerung der Video-Abspielung eingeplant wurde.

Spätestens seit die Auswertung von Feldversuchen [38] entsprechende Ergebnisse zeigte, wird diese Art von Diensten als weniger attraktiv angesehen als die Bereitstellung eines breitbandigen Internet-Zugangs. Im Gegensatz zur Video-Verteilung werden beim Abruf von Dokumenten im WWW mittels HTTP [52] sehr viele Steuerinformationen bidirektional ausgetauscht [112], und die erfolgreich übertragenen Datenpakete werden nach Erhalt durch den Empfänger quittiert [122]. Dadurch besteht ein wesentlich größerer Bedarf an Übertragungskapazität auch in der Richtung vom Teilnehmeranschluß zum Netz hin. Im Zuge des Einsatzes größerer Bild- und Tondokumente im WWW werden größere Übertragungskapazitäten in beiden Richtungen nötig [104, 146]. Teilweise werden auch heute schon Videofilme angeboten, die aber meist so codiert sind, daß sie eine deutlich geringere Übertragungsgeschwindigkeit benötigen als bei *Video on Demand* angenommen wurde.

In den letzten Jahren wurde das Thema der Hochgeschwindigkeits-Teilnehmerzugangsnetze mehrfach in IEEE-Sonderheften aufgenommen [1, 2, 3, 4, 5]. Viele Vorschläge für diensteintegrierende Hochgeschwindigkeits-Teilnehmerzugangsnetze basieren auf der ATM-Technik (*Asynchronous Transfer Mode*), deren Grundlagen schon an anderer Stelle eingehend beschrieben wurden [100, 129, 63, 134]. Diese verbindungsorientierte Paketvermittlungstechnik bietet sich aufgrund ihrer großen Flexibilität in der statischen und dynamischen Zuordnung der Übertragungskapazität zu einzelnen Verbindungen auch im Teilnehmerzugangsbereich an. Während in früheren Projekten [26] und Feldversuchen [66] davon ausgegangen wurde, daß von den auf der Teilnehmerseite eingesetzten Endgeräten bis zu den Diensterbringern (*Server*) durchgehende ATM-Verbindungen bestehen werden, wird heute teilweise angenommen, daß der Teilnehmeranschluß selbst über kostengünstigere LAN-Techniken erfolgen kann [128], wobei ATM erst von einer Übergabeeinrichtung (*Interworking Unit*) an im Zugangsnetz zum Einsatz kommt.

Außer der Flexibilität in der Zuweisung der Übertragungskapazität bietet ATM gegenüber anderen Techniken den Vorteil, daß unterschiedliche Dienstgütegarantien unterstützt werden können [56]. Dazu wurden von der ITU-T [82] und im ATM-Forum [18] verschiedene ATM-Dienstklassen definiert. In dieser Arbeit werden die im ATM-Forum definierten Bezeichnungen der Dienstklassen verwendet:

CBR (*Constant Bit Rate*): Eine Dienstklasse für Verkehr, dessen maximale Zellrate etwa der durchsetzbaren Zellrate [71] entspricht. Es werden sehr geringe Verzögerungsschwankungen und eine Grenze der Zellverlusthäufigkeit garantiert.

VBR (*Variable Bit Rate*): Zwei Dienstklassen (rt-VBR für Verkehr mit und nrt-VBR für Verkehr ohne Echtzeitanforderungen) für Verkehr mit zeitlich veränderlicher Zellrate. Bei rt-VBR werden geringe Verzögerungsschwankungen, bei nrt-VBR sehr geringe Verluste bei größeren Verzögerungsschwankungen zugesichert. Die Garantie stützt sich auf die stochastischen Eigenschaften des angemeldeten Verkehrsgemisches und die Überwachung und Begrenzung des innerhalb jeder Verbindung ins Netz gesendeten Verkehrs durch die ATM-Quellflußkontrolle (*Usage Parameter Conrol, UPC*).

ABR (*Available Bit Rate*): In dieser Dienstklasse wird im Gegensatz zur *präventiven* Verkehrssteuerung von CBR und VBR eine *reaktive* Verkehrssteuerung eingesetzt. Dabei wird durch zyklisch übertragene RM-Zellen (*Resource Management*) ein Regelkreis realisiert, in dem die Vermittlungsknoten im Netz die Zellraten der ABR-Verkehrsquellen so begrenzen, daß sie die von CBR- und VBR-Verbindungen nicht benötigte Übertragungskapazität belegen können, ohne daß Verluste auftreten.

UBR (*Unspecified Bit Rate*): Diese ATM-Dienstklasse soll es erlauben, die durch die anderen Dienstklassen nicht verwendete Übertragungskapazität zu belegen. Es wird davon ausgegangen, daß in dieser Dienstklasse ein kostengünstiger Übermittlungsdienst ohne Dienstgütegarantien hinsichtlich des möglichen Durchsatzes oder einer begrenzten Zellverlustwahrscheinlichkeit angeboten wird.

Bei ITU-T [82] werden die ersten beiden Dienstklassen als DBR (*Deterministic Bit Rate*) und SBR (*Statistical Bit Rate*) bezeichnet. Die Unterscheidung zwischen rt-VBR und nrt-VBR erfolgt in einer zweiten Dimension, der Auswahl einer QoS-Klasse (*Quality of Service*). Außerdem ist noch ein blockorientierter Übermittlungsdienst ABT (*ATM Block Transfer*) vorgesehen, der mit oder ohne vorherige Reservierung durch RM-Zellen (ABT-dt bzw. ABT-it) die Übertragung zusammenhängender Blöcke von ATM-Zellen erlauben soll. Die UBR-Dienstklasse ist bei ITU-T nicht definiert, da ein entsprechender Dienst mit der SBR-Dienstklasse realisierbar ist, wenn die unbeschränkte QoS-Klasse gewählt wird.

Die Übermittlung von TCP/IP-Verkehr in der UBR-Dienstklasse kann sehr ineffizient sein, wenn eine ATM-Zelle verworfen wird, die Bestandteil eines in einem AAL-Rahmen (*ATM Adaptation Layer*) übertragenen größeren IP-Datagramms ist. Dadurch muß der ganze Rahmen wiederholt werden. Außerdem kann sich der in TCP zur Flußsteuerung eingesetzte Fenstermechanismus nicht schnell genug an schnell wechselnde Übertragungskapazitäten anpassen, um UBR in einem stark ausgelasteten Netz sinnvoll für TCP/IP-Verkehr einzusetzen. Daher wird im ATM-Forum eine Erweiterung von UBR diskutiert, die wesentlich weniger Regelaufwand erfordert als ABR, andererseits aber einen höheren Nutz-Datendurchsatz für TCP/IP-Verkehr zuläßt. Diese als UBR+ [60] oder GFR (*Guaranteed Frame Rate*) [61] bezeichnete Dienstklasse soll erstens einer Verbindung eine Mindest-Zellrate garantieren, so daß die TCP-Flußsteuerung sich leichter an den jeweils erzielbaren Durchsatz anpaßt, und zweitens anstelle einer einzelnen ATM-Zelle jeweils den ganzen dazugehörenden AAL-Rahmen verwerfen, wenn eine ATM-Zelle daraus in einem Puffer keinen Platz mehr findet. Dieses EPD-Verfahren (*Early Packet Discard*) verhindert, daß ATM-Zellen, die Teile eines IP-Datagrammes transportieren, im Netz weitergeleitet werden, obwohl bereits eine vorhergehende, zum selben IP-Datagramm gehörende ATM-Zelle verworfen wurde, und kann so den im Netz erzielbaren Nutzdurchsatz steigern.

Der Teilnehmerzugang zu Kommunikationsnetzen findet heute über Kupfer-Doppeladern (Telefonnetz), Koaxialkabel (Fernseh-Kabelnetz) oder Funk (Mobiltelefonnetz) statt. Zum Einsatz passiver optischer Netze (*Passive Optical Network, PON*) in zukünftigen Breitband-Teilnehmerzugangsnetzen gibt es zahlreiche Studien [20, 41, 47, 50, 69, 70, 87, 136, 154]. Unter anderem wurde im Projekt BAF (*Broadband Access Facilities*) der Europäischen Union [26] ein ATM-Zugangsnetz auf der Basis eines passiven optischen Netzes als Labor-Demonstrator entwickelt. In solchen passiven ATM-Zugangsnetzen muß der Medienzugriff für die Übertragung vom Teilnehmeranschluß zum Weitverkehrsnetz durch ein Medienzugriffsprotokoll geregelt werden. In der vorliegenden Arbeit werden die dafür in Frage kommenden Mechanismen klassifiziert, untersucht und bewertet.

1.2 Übersicht über die Arbeit

In der Literatur wird die Netzarchitektur von Teilnehmerzugangsnetzen teilweise nach funktionalen und teilweise nach topologischen Gesichtspunkten beschrieben. Zur funktionalen Gliederung gibt es mehrere sich in Details widersprechende Standards. In Kapitel 2 wird daher zunächst ein Vergleich der verschiedenen Referenzkonfigurationen vorgenommen. Anschließend wird gezeigt, in welchen Aspekten sich Zugangsnetze von Punkt-zu-Punkt-Teilnehmeranschlußleitungen unterscheiden. Die verschiedenen, in der Literatur mit „FTTx“ bezeichneten Architekturen (FTTH, FTTC, FTTB und viele andere) zum Einsatz von Glasfaserstrecken in Zugangsnetzen werden zusammengestellt und anhand der funktionalen und topologischen Gliederung des Zugangsnetzes erklärt. Da in der Literatur über Zugangsnetze oft zwischen Duplex-, Multiplex- und Vielfachzugriffsverfahren nicht sauber unterschieden wird, werden diese Verfahren kurz eingeführt und gegenübergestellt. Anhand dieser Grundlagen werden anschließend verschiedene bekannte Netzkonzepte für den ATM-Teilnehmerzugang zusammengestellt und hinsichtlich gemeinsamer und unterscheidender Aspekte verglichen. Schließlich werden die Randbedingungen für das in den folgenden Kapiteln untersuchte PON-System definiert und die Unterschiede zu anderen Netzkonzepten diskutiert.

In Kapitel 3 sind die Grundlagen für die Untersuchungsmethoden beschrieben, die zum Vergleich der verschiedenen Medienzugriffsverfahren für ATM-Zugangsnetze in den Kapiteln 5 bis 7 eingesetzt werden. Zusätzlich zu einer Einführung der verschiedenen Definitionen der Zellverzögerungsschwankung als Maß für die Beeinflussung des ATM-Verkehrs durch den Medienzugriff im Zugangsnetz werden die verkehrstheoretischen Grundlagen für Ensemble-Statistiken und für die Verwendung der Virtuellen Wartezeit kurz beschrieben. In der Simulation von Systemen werden außerdem spezielle Verfahren eingesetzt, um in periodischen Systemen Ensemble-Statistiken erfassen zu können und um Vertrauensbereiche für gemessene Verteilungs-Quantile zu bestimmen. Die jeweils in Frage kommenden Verfahren werden verglichen, und die am besten geeigneten werden zum Einsatz in den folgenden Untersuchungen ausgewählt.

Die verschiedenen aus der Literatur bekannten Medienzugriffsprotokolle für ATM-Zugangsnetze werden in Kapitel 4 in ihre grundlegenden Mechanismen zerlegt. Diese Mechanismen werden kurz beschrieben und dienen anschließend zur Klassifikation der Medienzugriffsprotokolle.

Die in Kapitel 4 dargestellten Mechanismen werden in Kapitel 5 so kombiniert, daß eine Untersuchung des Einflusses der einzelnen Mechanismen auf die Leistungsfähigkeit eines Medienzugriffsprotokolls möglich wird. Die Mechanismen werden zunächst anhand von vier grundlegenden Verkehrsszenarien mittels Simulation untersucht und verglichen. In verschiedenen Fällen werden auch Ergebnisse aus der verkehrstheoretischen Analyse verwendet, die den Vorteil haben, direkt grundsätzliche Aussagen über das Verhalten des untersuchten Mechanismus bei verschiedenen Verkehrs- und Systemparametern zuzulassen, während die stationäre Systemsimulation alleine nur Aussagen über eine bestimmte Kombination von Parametern gestattet. Im wesentlichen werden zwei neue Analysen eingesetzt, deren genauere Beschreibung in Anhang A erfolgt. Der zyklische Zugriff auf Mini-Zeitschlitze zur Bedarfsmeldung wird mit einem wahlfreien Zugriff verglichen, und es wird zwischen Bedarfsangaben und Aktivitätsangaben unterschieden. Den Verfahren zur integrierten Verkehrsformung im Medienzugriffsprotokoll ist ein eigener Abschnitt gewidmet, in dem gezeigt wird, daß eine Verkehrsformung im Bündel (*bundle spacing*) nur in seltenen Fällen sinnvoll ist.

Durch Vergleich von Analyse- und Simulationsergebnissen wird gezeigt, daß die Analyse der zyklischen Aktivitätsabfrage im leeren System das Systemverhalten auch unter größerer Auslastung gut beschreibt. Außerdem können die Ergebnisse leicht auf andere Mechanismen übertragen werden. Während in den ersten Abschnitten von Kapitel 5 die vier definierten Szenarien und die Systemparameter aus Kapitel 2 verwendet werden, können die damit gewonnenen Ergebnisse verallgemeinert und durch die analytischen Näherungen quantifiziert werden, so daß Vergleich und Bewertung der Mechanismen in Abschnitt 5.7 auch für andere Parameterkombinationen durchgeführt werden können.

In Kapitel 6 werden zunächst verschiedene Methoden zur Unterstützung mehrerer Dienstklassen beim Medienzugriff verglichen. Dann werden die Ergebnisse dieses Vergleichs und die Ergebnisse der Untersuchungen in Kapitel 5 zur Erstellung zweier Systemvorschläge eingesetzt, die die Unterstützung mehrerer ATM-Dienstklassen erlauben. Diese Systemvorschläge werden schließlich anhand verschiedener inhomogener Verkehrsszenarien bewertet.

Der Einsatz von ATM-Zugangsnetzen hat nicht nur Auswirkungen auf die Zellen- und Büschelebene, die in den Kapiteln 5 und 6 untersucht werden. Auch auf der Verbindungsebene, also bei der Entscheidung, ob eine neue Verbindung angenommen werden kann, muß die Netzarchitektur und die Leistungsfähigkeit der eingesetzten Medienzugriffsverfahren berücksichtigt werden. Daher werden in Kapitel 7 die Ergebnisse der vorangegangenen Untersuchungen nochmals kurz im Hinblick auf ihren Einfluß auf die Verbindungsannahmefunktion in der Verbindungsebene betrachtet.

Kapitel 2

Teilnehmerzugangsnetze für ATM

Ziel dieses Kapitels ist es, die Grundlagen der in den folgenden Kapiteln untersuchten Systeme zu beschreiben. Dazu werden in Abschnitt 2.1 zunächst die relevanten Standards für die Netzarchitektur im Teilnehmerbereich von ATM-Netzen vorgestellt. Nach einer Diskussion der Einordnung und der Funktion von Zugangsnetzen in Abschnitt 2.2 folgt in den Abschnitten 2.3 bis 2.5 eine Zusammenstellung der Netztopologien und der Duplexmethoden und Multiplexverfahren, die zur gemeinsamen Nutzung eines Übertragungsmediums eingesetzt werden können. In den Abschnitten 2.6 und 2.7 werden dann die gängigen Konzepte für ATM-Zugangsnetze und einige besondere Aspekte der passiven optischen Netze für den ATM-Zugang dargestellt, die den Schwerpunkt der Betrachtungen in den folgenden Kapiteln darstellen werden.

2.1 Netzarchitektur und Referenzkonfigurationen für den Teilnehmeranschluß

Während im Telefonnetz und auch im Schmalband-ISDN (*Narrowband ISDN, N-ISDN*) die Standards der ITU (*International Telecommunication Union*) allgemein akzeptiert sind, erarbeiten mehrere Gremien Standards für ATM-basierte Netze. Die ITU hat ATM als Übermittlungsdienst für das Breitband-ISDN bestimmt; das ATM-Forum berücksichtigt in seinen Standards, die in weiten Teilen mit den B-ISDN-Standards der ITU abgestimmt sind, besonders die Anforderungen für Datennetze und private Telekommunikationsnetze. DAVIC (*Digital Audio-Visual Council*) ist eine Organisation, die sich allgemein um die Standardisierung von Multimedia-Systemen bemüht, wobei ATM nur als eine mögliche Übermittlungstechnik betrachtet wird. Im Gegensatz zu den eher netz-orientierten Arbeiten von ITU-T und des ATM-Forums beschreiben die DAVIC-Standards auch die Schnittstelle zwischen den Dienstanbietern und dem ATM-Netz und spezielle Protokolle für die Unterstützung von Multimedia-Anwendungen.

In den folgenden Abschnitten werden die unterschiedlichen Referenzkonfigurationen von ITU-T, ATM-Forum und DAVIC für den teilnehmernahen Bereich beschrieben und verglichen.

2.1.1 Schmalband-ISDN-Zugang

Abb. 2.1 zeigt die Architektur und die Referenzpunkte für den Zugang zum Schmalband-ISDN nach den ITU-Empfehlungen I.411 und Q.512 [83, 85, 25]. Die Referenzpunkte R bis V kennzeichnen Verbindungspunkte zwischen verschiedenen Netzelementen. An diesen Referenzpunkten sind oft auch Schnittstellen durch ihre Protokolle und ihre elektrischen und mechanischen Eigenschaften definiert.

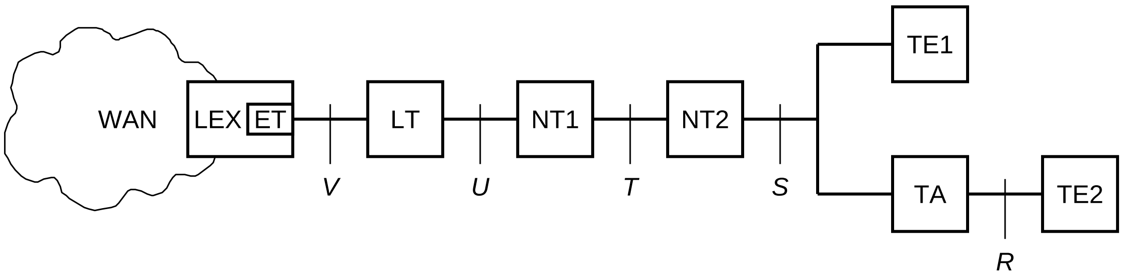


Abb. 2.1: *Architektur und Referenzpunkte für Schmalband-ISDN-Zugang*

In der Teilnehmervermittlungsstelle wird zwischen dem lokalen Anschluß und dem öffentlichen Weitverkehrsnetz (*Wide Area Network, WAN*) vermittelt. Der Leitungsabschluß (*Line Termination, LT*) ist am Vermittlungsabschluß (*Exchange Termination, ET*) mit der Teilnehmervermittlungsstelle verbunden. Dieser Leitungsabschluß liegt oft selbst in der Teilnehmervermittlungsstelle, kann aber auch durch eine Leitung von dieser abgesetzt sein oder an Multiplexer, Konzentratoren oder Zugangsnetze angeschlossen sein. In diesem Fall wird der V-Referenzpunkt durch eine Ziffer ergänzt, die angibt, welche Ausprägung der V-Schnittstelle verwendet wird [25, 77, 85]. Der U-Referenzpunkt zwischen LT und Netzabschluß (*Network Termination, NT*) ist bei ITU-T nicht näher bezeichnet, da die entsprechende Schnittstelle meist herstellerspezifisch ist. Eine Netzabschluß-Schnittstelle kann an den Referenzpunkten S oder T angeboten werden. Der Netzabschluß NT1 stellt die T-Schnittstelle zum Anschluß allgemeiner ISDN-Anlagen zur Verfügung, während NT2 die nötigen Anpassungsfunktionen vorsieht, um ISDN-Endgeräte (TE1) (*Terminal Equipment*) oder Terminal-Adapter (TA) für nicht-ISDN-fähige Endgeräte (TE2) anzuschließen. Der

Netzabschluß durch NT1 stellt in Europa in der Regel die Grenze der Zuständigkeit des Netzbetreibers dar.

2.1.2 B-ISDN-Zugang nach ITU-T

Abb. 2.2 zeigt die Referenzkonfiguration für Breitband-ISDN (B-ISDN) [78, 134]. Sie basiert weitgehend auf der oben für N-ISDN dargestellten Konfiguration. Wenn am U-Referenz-

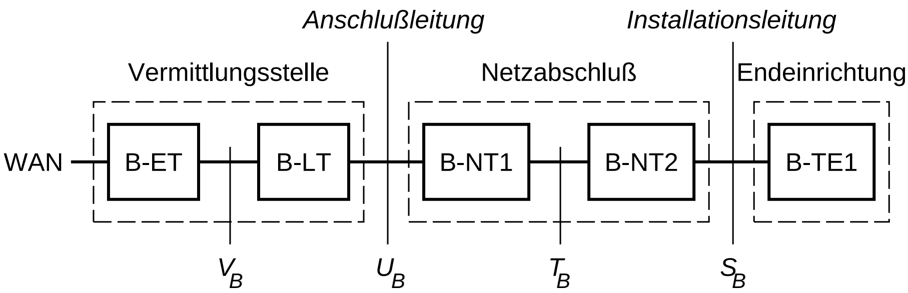


Abb. 2.2: *Architektur und Referenzpunkte für den B-ISDN-Zugang*

punkt ein von mehreren Teilnehmern gemeinsam genutztes Zugangsnetz eingesetzt wird, ergibt sich die Konfiguration nach Abb. 2.3.

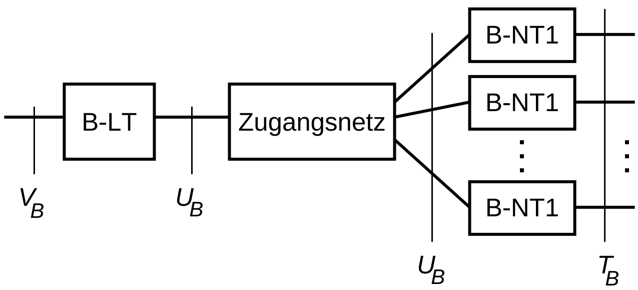


Abb. 2.3: *Referenzpunkte für den B-ISDN-Zugang mit Zugangsnetz*

Die hier mehrfach auftretenden U-Referenzpunkte werden auch mit U_1 und U_2 numeriert [26]. Zwischen U_1 und U_2 liegen die Verzweigungen (*Branching, BRAN*) eines passiven Zugangsnetzes. Wenn zusätzlich innerhalb des Zugangsnetzes der optische Netzabschluß (*Network Unit, NU*) und der elektrische Netzabschluß (NT) getrennt sind, ergibt sich die in Abb. 2.4 dargestellte Konstellation [26].

Das Zugangsnetz wird nur bis zum T-Referenzpunkt betrachtet, da die eventuell in der B-NT2 enthaltenen Funktionen nicht für das Zugangsnetz spezifisch sind, sondern Anpassungsfunktionen für den Anschluß der Endeinrichtungen enthalten.

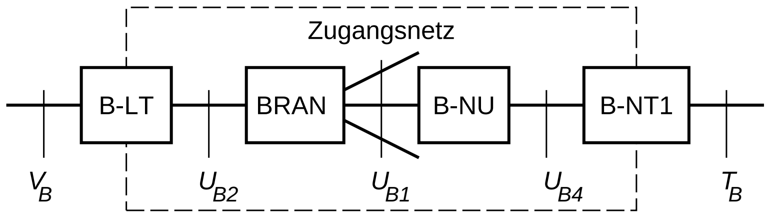


Abb. 2.4: *Beispiel für Schnittstellen innerhalb des Zugangsnetzes*

Im Schmalband-ISDN wird am V-Referenzpunkt eine spezielle Schnittstelle für die Unterstützung unterschiedlicher Zugangsnetz-Funktionen vorgesehen. Entsprechend dieser V_5-Schnittstelle wird derzeit auch eine V_{B5}-Schnittstelle für B-ISDN-Zugangsnetze definiert [95, Abschn. 3.9.2].

2.1.3 ATM-Forum

Das ATM-Forum beschreibt in seiner Arbeitsgruppe RBB (*Residential Broadband*) eine eigene Referenzarchitektur [16]. Dabei wird betont, daß es keine einheitliche Abbildung zwischen den bei ITU-T definierten Referenzpunkten R bis T und den ANI- und UNI-Referenzpunkten in Abb. 2.5 gibt. Die Unterschiede zwischen den Definitionen der ITU und des ATM-Forums betreffen allerdings mehr die an den Referenzpunkten definierten Schnittstellen als die Definition der Referenzpunkte selbst.

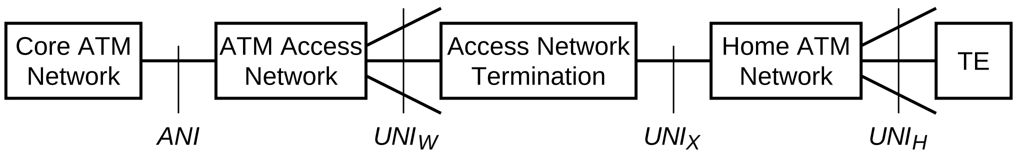


Abb. 2.5: *Referenzkonfiguration für den Zugangsbereich beim ATM-Forum*

Das Weitverkehrsnetz (*ATM Core Network*) wird, im Gegensatz zum „normalen“ Teilnehmeranschluß (*User Network Interface, UNI*) [17], über einen speziellen Zugangsnetz-Anschluß (*Access Network Interface, ANI*) mit dem Zugangsnetz verbunden. Der Zugangsnetz-Abschluß (*Access Network Termination*) wird durch die Indices „W“ und „X“ in den UNI-Referenzpunkten näher gekennzeichnet. Das Zugangsnetz selbst wird weiter untergliedert in das „ATM Digital Terminal“ und ein passives Verteilnetz (*Access Distribution Network*). Ersteres entspricht in etwa dem Leitungsabschluß bei ITU-T, siehe Abb. 2.6. Der Zugangsnetz-Abschluß ist beim ATM-Forum nicht Bestandteil des Zugangsnetzes.

In analoger Weise ist auch zwischen UNI_X und UNI_H ein Heimnetz, bestehend aus der lokalen Schnittstelle (*User Premises Interface*) und dem Heim-Verteilnetz (*Home Distribution*

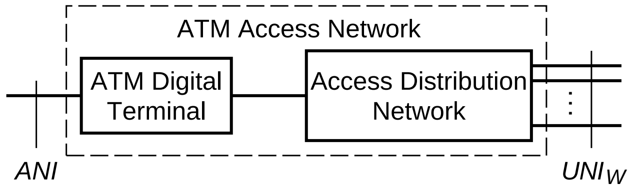


Abb. 2.6: *Zugangsnetz beim ATM-Forum*

Network), definiert. Abb. 2.7 zeigt links die Struktur dieses Heimnetzes und rechts daneben die Optionen für den Anschluß von Endgeräten (*User Terminals*). Endgeräte können entweder direkt oder über eine hierfür definierte, von der Zugangsnetz-Technik unabhängige Schnittstelle (*Technology Independent Interface, TII*) an ein Zugangsnetz angeschlossen werden.

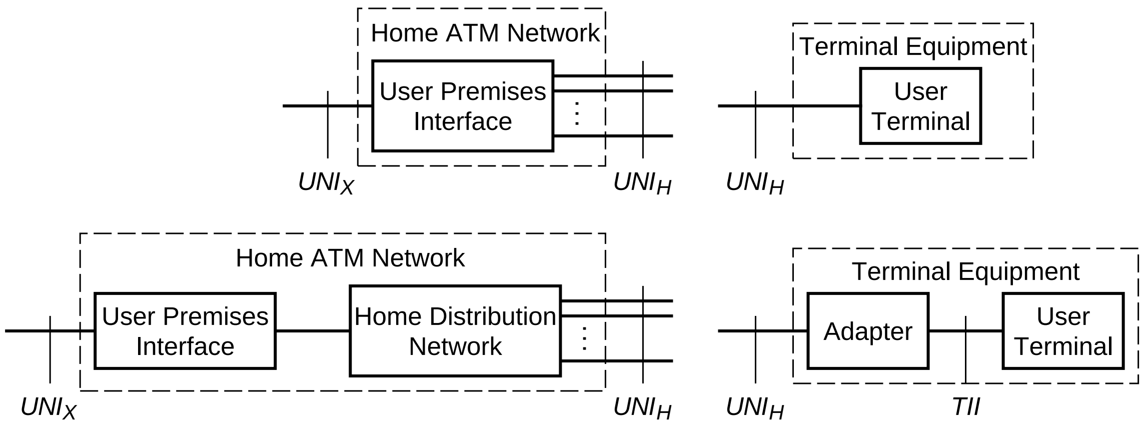


Abb. 2.7: *Konfigurationen im Heimnetz (links) und beim Anschluß von Endgeräten (rechts)*

2.1.4 DAVIC

Abb. 2.8 zeigt die Referenzpunkte bei DAVIC in einer vereinfachten Version des DAVIC-Referenzmodells (*DAVIC System Reference Model, DSRM*) [42] nach [38]. Das Modell ist hierarchisch gegliedert.

Auf der obersten Hierarchieebene liegen die Referenzpunkte A1, A9, A10 und A11. Sie verbinden das Dienstanbietersystem (*Content Provider System, CPS*), das Netzbetreibersystem (*Service Provider System, SPS*) und das Dienstnutzersystem (*Service Consumer System, SCS*) über die Verbindungselemente CPS-SPS DS (*CPS-SPS Delivery System*) und SPS-SCS DS. Das SPS-SCS DS besteht aus dem vermittelnden Netz (*Core Network*) und dem Zugangsnetz. Das zentrale Element eines DAVIC-Systems ist oft der Server (SPS), der Filme, Multimedia-Anwendungen und Navigationshilfen bereitstellt. Für die Betrachtung des Zugangsnetzes sind die Referenzpunkte A4 und A1 wesentlich.

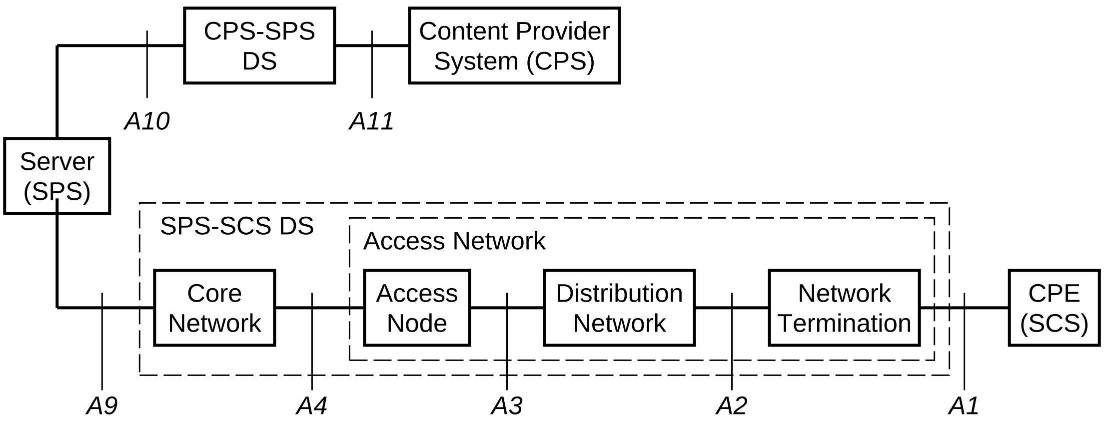


Abb. 2.8: *Vereinfachte Form des DAVIC-Referenzmodells für den Netzzugang*

2.1.5 Heimnetz

An den Netzabschluß eines ATM-basierten Breitbandnetzes kann prinzipiell vom einzelnen ATM-Endgerät bis zu einem lokalen Netz alles angeschlossen werden. Die Art der Einrichtungen auf der Teilnehmerseite hat natürlich einen großen Einfluß auf Art und Umfang der Funktionen, die an der T-Schnittstelle bereitgestellt werden müssen. Beispielsweise wird ein Teilnehmer, der ein lokales Netz anschließt, eventuell einen größeren Bereich an Nummern für virtuelle Pfade (*Virtual Path Identifier, VPI*) benötigen als ein Teilnehmer, der nur ein einzelnes Endgerät anschließt.

Das Gebiet der Heimnetze mit großer Bandbreite für private Teilnehmer ist derzeit Gegenstand weiterer Untersuchungen des ATM-Forums [127]. Dabei gibt es Vorschläge, den heimischen Netzabschluß in einer Richtung als Multiplexer und in der anderen als einfache Vervielfacher-Instanz aufzubauen, so daß im Netzabschluß keine weiteren Verkehrsflußfunktionen benötigt werden. Ebenso wäre es für Teilnehmer mit Bedarf an Internverkehr möglich, eine lokale private Vermittlungsanlage oder ein lokales Netz an die T-Schnittstelle anzuschließen. Einen Überblick über andere Breitband-Teilnehmernetze gibt Eldering [48]; Standardisierungsbestrebungen gibt es auch in der Arbeitsgruppe TR41.5 der TIA (*Telecommunications Industry Association*) [138] und der Heimnetz-Gruppe der VESA (*Video Electronics Standard Association*) [147].

Abgesehen von diesen eher an der Telekommunikation orientierten Ansätzen, kommen auch aus dem Konsumelektronik-Bereich Standard-Vorschläge für Heimnetze, beispielsweise IEEE 1394 [74]. Diese Netze können mit Übertragungsgeschwindigkeiten von 100 Mbit/s bis zum Gbit/s-Bereich betrieben werden, basieren jedoch selbst nicht auf ATM. Daher wird sich der Anschluß eines solchen Heimnetzes an ein ATM-Weitverkehrsnetz zunächst nur durch einen Protokollumsetzer (*Residential Gateway*) realisieren lassen, wie er im Prinzip auch in [48] beschrieben ist. Für die Betrachtung eines diensteintegrierenden Breitbandanschlusses an ein öffentliches Netz kann ein solcher Umsetzer als ein ATM-Endgerät angesehen werden, das über das Weitverkehrsnetz mit anderen ATM-Endgeräten kommuniziert. Solche Heimnetze und Protokollumsetzer werden in die folgenden Betrachtungen nicht mit eingeschlossen.

2.1.6 Vergleich der Standards

Die oben aufgezeigte Vielfalt der Standards im Bereich des breitbandigen Zugangs zu ATM-Netzen macht eine explizite Einordnung des Zugangsnetzes und seiner Komponenten nötig. Im Rahmen dieser Arbeit soll das Zugangsnetz näher betrachtet werden. Daher wird dieser Netzabschnitt hier noch einmal genauer dargestellt und im Rahmen der entsprechenden Standards definiert.

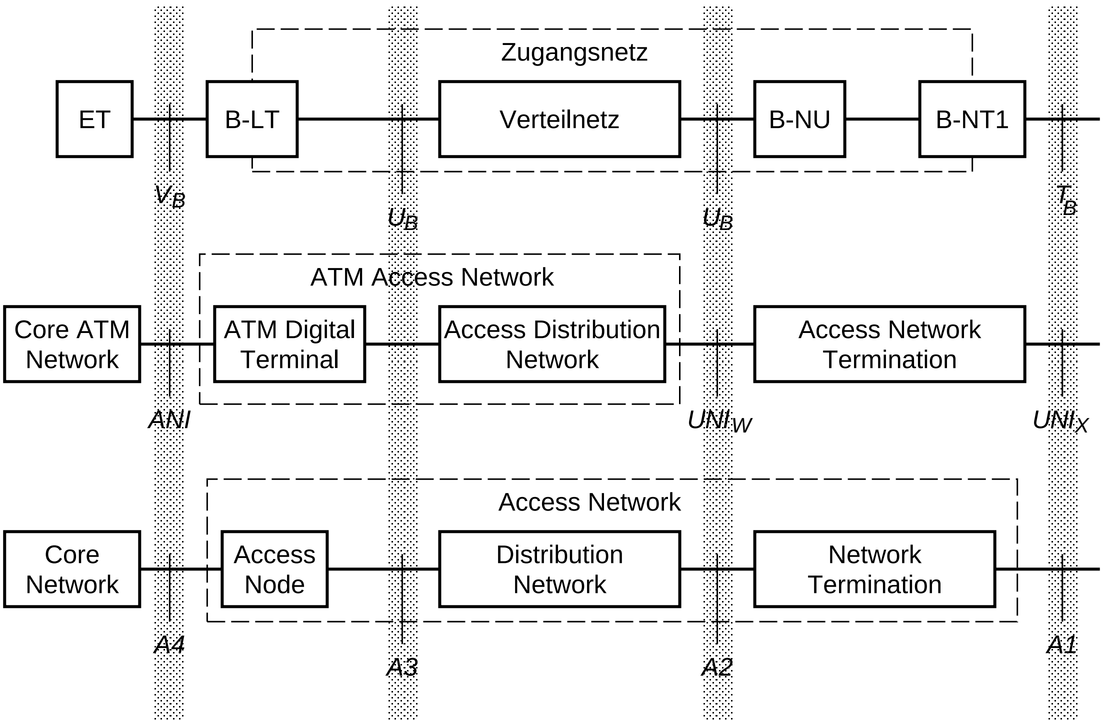


Abb. 2.9: *Vergleich der Referenzpunkte in Zugangsnetzen. Oben: ITU-T (erweitert nach [26]), Mitte: ATM-Forum, unten: DAVIC*

Die Referenzpunkte im Bereich zwischen Teilnehmervermittlungsstelle und Teilnehmeranschluß nach ITU-T, ATM-Forum und DAVIC sind in Abb. 2.9 zusammengestellt. Obwohl es keine direkte Entsprechung der Schnittstellen an den Referenzpunkten gibt, sind die Referenzpunkte selbst vergleichbar.

Der Übergang von der Vermittlungsstelle zum Zugangsnetz findet am V-Referenzpunkt statt (V_{B5}, da es sich um den Anschluß eines Breitband-Zugangsnetzes handelt). Dies entspricht in etwa dem ANI des ATM-Forums oder dem Referenzpunkt A4 bei DAVIC. Im Zugangsnetz wird zwischen dem (aktiven) gemeinsam genutzten Leitungsabschluß (LT, ATM Digital Terminal oder Access Node) und dem (passiven) Verteilnetz unterschieden. Zwischen diesen beiden gibt es bei ITU-T und DAVIC den Referenzpunkt U bzw. A3. Das ATM-Forum sieht an dieser Stelle keinen Referenzpunkt vor [64].

Am teilnehmernahen Ende des Verteilnetzes ist der Abschluß des öffentlichen Netzes durch die (aktive oder passive) NT gegeben, die am T-, UNI_X- oder A1-Referenzpunkt den Netzzugang als Teilnehmeranschluß zur Verfügung stellt. Da im ATM-Forum [16] und bei DAVIC [42] sowohl aktive als auch passive Netzabschlüsse vorgesehen sind, kann die entsprechende Schnittstelle nicht eindeutig verglichen werden. Auch die vorgesehenen Signalisierfähigkeiten im Netzabschluß sind unterschiedlich [16]. Das ATM-Forum bezieht den Netzabschluß nicht in den Begriff des Zugangsnetzes ein, während ITU-T und DAVIC die Grenze des Zugangsnetzes zwischen Netzabschluß und Teilnehmern sehen.

2.2 Einordnung und Funktionen von Zugangsnetzen

In der Telekommunikationswelt werden Teilnehmerzugangsnetze schon lange eingesetzt, um mehreren Teilnehmern einen Anschluß an ein öffentliches Netz bereitzustellen. In der Datenkommunikationswelt dagegen sind im teilnehmernahen Bereich meist privat verwaltete lokale Netze (*Local Area Network, LAN*) zur internen Kommunikation zu finden, in denen nur über einen Netzzugangspunkt mit anderen Netzen kommuniziert werden kann. Auch nach der Integration der Übermittlung von Daten- und anderen Telekommunikationsdiensten in diensteintegrierenden Netzen ist eine Unterscheidung zwischen LANs und Zugangsnetzen noch sinnvoll: In LANs bestehen die meisten Kommunikationsbeziehungen zwischen Stationen, die selbst an diesem Netz angeschlossen sind. Verbindungen zu Stationen außerhalb des LANs werden über spezielle Anschlußstationen (Router) vermittelt. In Teilnehmerzugangsnetzen dagegen werden Kommunikationsbeziehungen meist zu Partnern außerhalb des eigenen Zugangsnetzes aufgebaut. Daher ist es sinnvoll, die Vermittlung vollständig im öffentlichen Netz durchzuführen, so daß auch der geringe Anteil an Internverbindungen über einen Vermittlungsknoten des öffentlichen Netzes geführt wird.

Ein weiteres Merkmal von Zugangsnetzen ist oft ihre Konzentratorfunktion, das heißt, es wird für eine Gruppe von n Teilnehmeranschlüssen weniger als das n-fache der für einen einzelnen Teilnehmeranschluß benötigten Netzressourcen zur Verfügung gestellt. Durch die gemeinsame Nutzung von Betriebsmitteln verringern sich die Kosten für den einzelnen Teilnehmeranschluß, wenn nicht alle Anschlüsse gleichzeitig benötigt werden. Diese Funktion wird im herkömmlichen Telefonnetz durch teilnehmernahe Konzentratoren erreicht, siehe Abb. 2.10.

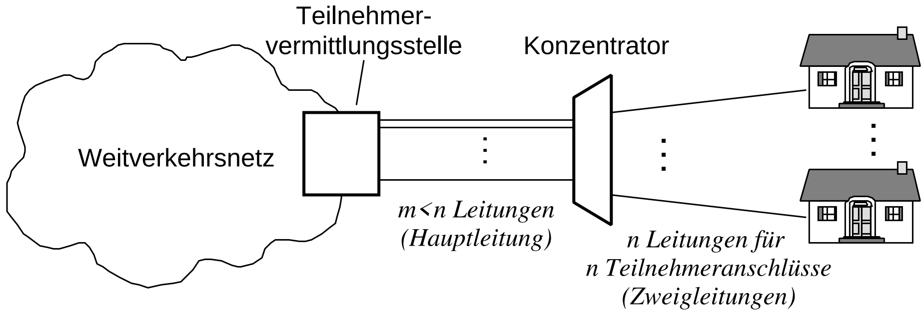


Abb. 2.10: *Konzentrator im herkömmlichen Telefonnetz*

Die Konzentrationsfunktion kann, wie in Abb. 2.10 angedeutet, durch ein aktives Konzentratorelement bereitgestellt werden, an das jede Zugangsstationen über eine eigene Leitung angeschlossen wird, so daß zwar die Anzahl der Teilnehmeranschlußeinheiten in der Vermittlungsstelle verringert wird, dafür aber im Konzentrator noch für jeden Teilnehmeranschluß eine Anschlußeinheit vorgesehen werden muß. Als Alternative bieten sich passive Zugangsnetze oder Zugangsnetze an, in denen lediglich eine physikalische Signalregeneration oder -umsetzung durchgeführt wird. Diese Art von Zugangsnetzen erfordert zusätzliche Mechanismen, um das – aus der vermittlungstechnischen Sicht passive – Medium zu verwalten. In der Richtung vom öffentlichen Netz zum Teilnehmeranschluß ist dies eine logische Filterfunktion an jedem Netzabschluß, die aus der Folge der von der Vermittlungsstelle kommenden Dateneinheiten nur die für einen bestimmten Teilnehmeranschluß bestimmten durchläßt. In der Rückrichtung vom Teilnehmeranschluß zum öffentlichen Netz ist im einfachsten Falle der Konzentration auf Verbindungsebene [71] eine quasi-statische Bandbreitezuteilung nötig, die jedem aktiven Teilnehmeranschluß die benötigte Bandbreite über das eingesetzte Multiplexverfahren (s. Abschn. 2.5) zuteilt. Wenn die Konzentration auch auf der Büschel- oder Dateneinheitenebene erfolgen soll, dann müssen zusätzliche Medienzugriffsmechanismen eingesetzt werden (s. Kap. 4).

2.3 Zugangsnetz-Topologien

In der klassischen Telefontechnik wird der Zugangsbereich außer nach den in Abschnitt 2.1 ausgeführten funktionalen Elementen auch nach Elementen der physikalischen Topologie gegliedert. Abb. 2.11 nach [30] zeigt die Elemente zwischen Ortsvermittlungsstelle (*Central Office, CO*) und der Wohnung der Teilnehmer.

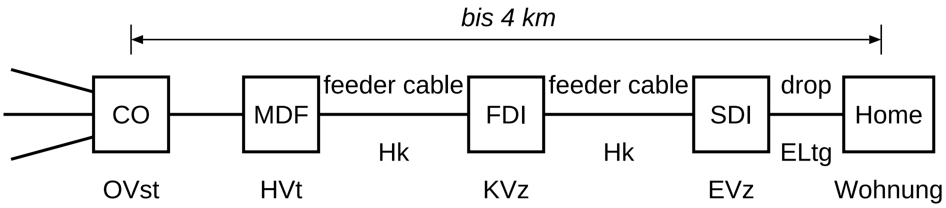


Abb. 2.11: *Netzelemente im Zugangsbereich*

Von dem meist in der Vermittlungsstelle angeordneten Hauptverteiler HVt (*Main Distribution Frame, MDF*) aus führt das Hauptkabel (Hk) über den Kabelverzweiger KVz (*Feeder Distribution Interface, FDI*) zum Endverzweiger EVz (*Subscriber Distribution Interface, SDI*). Vom Endverzweiger zum Teilnehmer führen Einzelkabel (Endleitung bzw. *drop wire*). Kabel- und Endverzweiger stellen lediglich topologische Elemente im Zugangsbereich dar, in denen die einzelnen Leitungen im Kabel in unterschiedliche Richtungen weitergeführt werden.

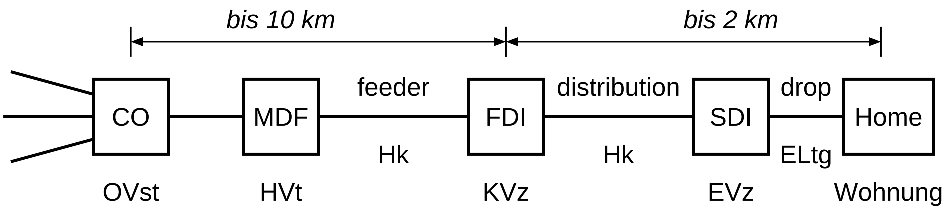


Abb. 2.12: *Netzelemente im Zugangsbereich mit Zugangsnetz*

Der Einsatz der Glasfaser-Übertragungstechnik erlaubt es, den Abstand zwischen Ortsvermittlungsstelle und Kabelverzweiger auf etwa 10–20 km zu vergrößern, s. Abb. 2.12 [30]. Hierbei kommen sowohl im Hauptverteiler als auch im Kabelverzweiger elektrooptische Elemente zum Einsatz.

In den einzelnen Bereichen zwischen HVt, KVz und EVz können unterschiedliche Netztopologien verwendet werden, die im folgenden kurz im Hinblick auf zugangsnetzspezifische Aspekte erläutert werden, s. Abb. 2.13.

2.3.1 Sterntopologie

Für jeden Anschluß ist in der Kopfstation ein Empfänger und ein Sender vorgesehen. Es werden einzelne Leitungen zu jedem Anschluß geführt. Der Begriff des Sternnetzes wird allerdings auch anders verwendet, speziell in der japanischen Literatur zu passiven Doppelsternnetzen (*Passive Double Star, PDS*) [111, 92]. Dort wird ein Netz mit passivem Sternkoppler als PDS-Netz bezeichnet, vgl. Abb. 2.14.

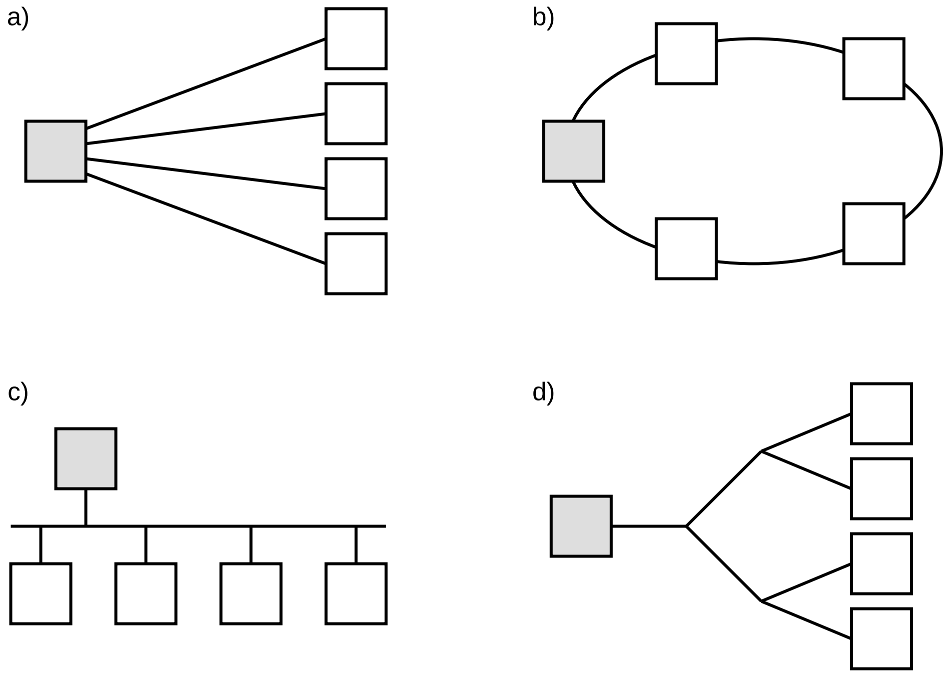


Abb. 2.13: *Topologien: Stern (a), Ring (b), Bus (c) und passiver Baum (d)*

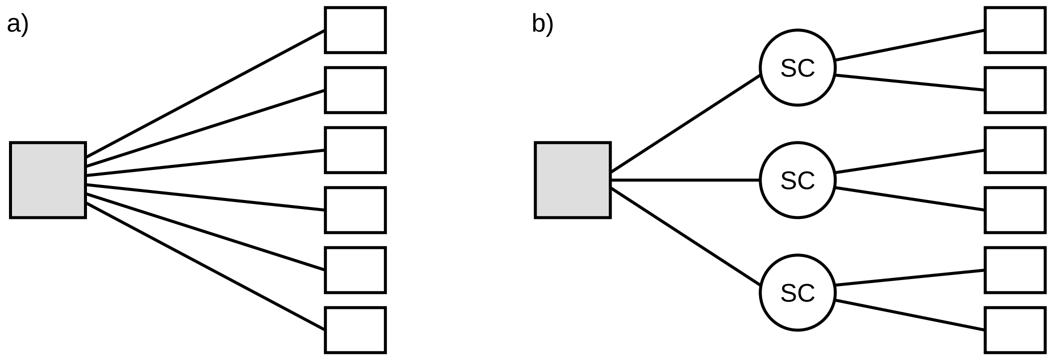


Abb. 2.14: *Stern (a) und passiver Doppelstern (b) in der japanischen Literatur*

Das passive Sternkopplerelement (*Star Coupler, SC*) erlaubt hier die gemeinsame Nutzung der Leitung durch alle Teilnehmer, wobei die zentrale Station nur ein Sender-Empfänger-Paar pro Sternkoppler bereitstellen muß. Diese Art der passiven Kopplung ist prinzipiell nicht von dem in Abschnitt 2.3.4 beschriebenen passiven Baum zu unterscheiden und wird deshalb im weiteren Verlauf dieser Arbeit auch als passiver Baum klassifiziert.

2.3.2 Ringtopologie

In einer Ringtopologie muß mindestens eine Station aktiv angeschlossen sein, damit Dateneinheiten nicht nur auf den Ring gebracht, sondern auch wieder von ihm genommen werden können. Die Ringtopologie ist besonders beim aktiven Anschluß von Stationen mit nen-

nenswertem Verkehr zwischen den Stationen sinnvoll. Ringnetze werden (außer im Bereich der lokalen Computernetze) vor allem als Regionalnetze eingesetzt und als zukünftige Netze zwischen Ortsvermittlungsstellen für Breitbanddienste vorgeschlagen [124]. Ein Ringnetz kann aber auch einen Teil eines Zugangsnetzes darstellen, bei dem jede Ringstation über ein Sternnetz eine Reihe von Teilnehmeranschlüssen bedient [67, 143].

2.3.3 Bustopologie

Busse mit passiver Ankopplung der Stationen sind vor allem als lokale Netze verbreitet. Alle Stationen empfangen dabei das jeweils von einer Station ausgesendete Signal, so daß im Medienzugriff Trägererkennungsverfahren (*Carrier Sense*) eingesetzt werden können, um Kollisionen durch zeitversetzten Sendebeginn zu verhindern. Kollisionen durch gleichzeitigen Medienzugriff können im Zeitbereich eines Bittaktes oder eines Senderahmens erkannt und aufgelöst werden, wenn das Produkt aus der maximalen physikalischen Ausdehnung des Mediums und der maximalen Schrittgeschwindigkeit auf dem Medium entsprechend begrenzt ist.

Eine andere Form des Busses stellt der gerichtete Doppelbus dar, wie er z. B. in DQDB-Netzen [72] eingesetzt wird. Hier wird der Vielfachzugriff auf das Medium durch ein Reservierungsverfahren geregelt, damit keine Kollisionen auftreten können, so daß die maximale Ausdehnung nicht mehr durch das oben genannte Produkt begrenzt ist.

Soll ein DQDB-Netz als Zugangsnetz eingesetzt werden, so ist zur optimalen Aufteilung des Verkehrs und zur Minimierung der benötigten Gesamtbandbreite die Zentralstation, die den Anschluß an das Weitverkehrsnetz herstellt, in der Mitte des Netzes anzuordnen [34]. Andererseits fällt den Randstationen im DQDB aber eine herausragende Rolle für die Funktion des Netzes zu, daher kann es nötig sein, die Entscheidung der Anordnung nach anderen Kriterien als der optimalen Ausnützung der Übertragungskapazität zu treffen.

2.3.4 Baumtopologie

Die Baumtopologie ist im hierarchisch sich verästelnden Zugangsbereich öffentlicher Netze oft zu finden. Die dort vorhandenen Leitungskanäle (*Ducts*) können auch durch neue Anschlußnetze genutzt werden. Dabei unterscheidet man zwischen passiven Netzen, bei denen ein gemeinsam genutztes Medium (Kabel oder Glasfaser) zwischen seinen beiden Endpunkten keine aktiven Komponenten, sondern nur passive Leistungsteiler und -kombinierer besitzt, und aktiven Netzen, die in den Verzweigungspunkten aktive Komponenten enthalten [143]. Aktive Komponenten im Anschlußbereich können zwar verschiedene Verkehrsprobleme vereinfachen, sind aber aus Wartungsgründen unerwünscht, da sie wesentlich höhere Ausfallraten aufweisen als passive Komponenten.

Passive Baumnetze unterscheiden sich in den Anforderungen an den Vielfachzugriff durch die angeschlossenen Stationen gegenüber Bus- oder Ringnetzen dadurch, daß Trägererkennungsverfahren nicht eingesetzt werden können, da eine Station direkt immer nur mit der Kopfstation kommunizieren kann, ohne daß andere Stationen gleichzeitig das Signal empfangen können. Dadurch können die bekannten Medienzugriffsprotokolle für Bus- oder Ringnetze, die zur Regelung des Vielfachzugriffes eine schnelle Kommunikation zumindest zwischen Nachbarstationen erfordern, hier nicht eingesetzt werden.

Teilweise vergleichbare Eigenschaften wie passive optische Netze (*Passive Optical Network, PON*) haben auch die Breitband-Kabelnetze, die zur Fernsehversorgung vielerorts im Einsatz sind. Auch diese entsprechen topologisch einem Baum, der allerdings an den Verzweigungspunkten aktive Verstärkerelemente enthält. Für die nachfolgenden Untersuchungen sind diese Verstärkerelemente, sofern sie die Signale in beiden Richtungen verstärken, jedoch ohne Belang, da sie zwar eine Signalregeneration durchführen, nicht aber den Medienzugriff beeinflussen.

2.3.5 FTTx-Architekturen

Zugangsnetze, die Glasfasern im Anschlußbereich einsetzen, werden oft nach der Stelle bezeichnet, an der der Übergang von der optischen zur elektrischen Übertragung zum Teilnehmer stattfindet. Die folgenden Abkürzungen sind gebräuchlich und werden meist im Zusammenhang mit Netzen gebraucht, die die Topologie eines passiven Baumes oder eines Sternes besitzen, siehe Tabelle 2.1. Die jeweils entsprechende Anordnung des optischen Netzabschlusses (ONU) ist in Abb. 2.15 für die wesentlichen FTTx-Topologien skizziert. Wenn nur darauf hingewiesen werden soll, daß überhaupt ein Teil des Anschlußnetzes auf Glasfaserübertragung beruht, werden die Begriffe auch als „FTTx“ oder „FITL“ (*Fibre in the Loop*) zusammengefaßt.

In der FTTC- oder FTTCab-Topologie wird die Glasfaserstrecke meist durch eine mit VDSL [88, 98] betriebene bestehende Zweidraht-Endleitung zum Teilnehmer ergänzt.

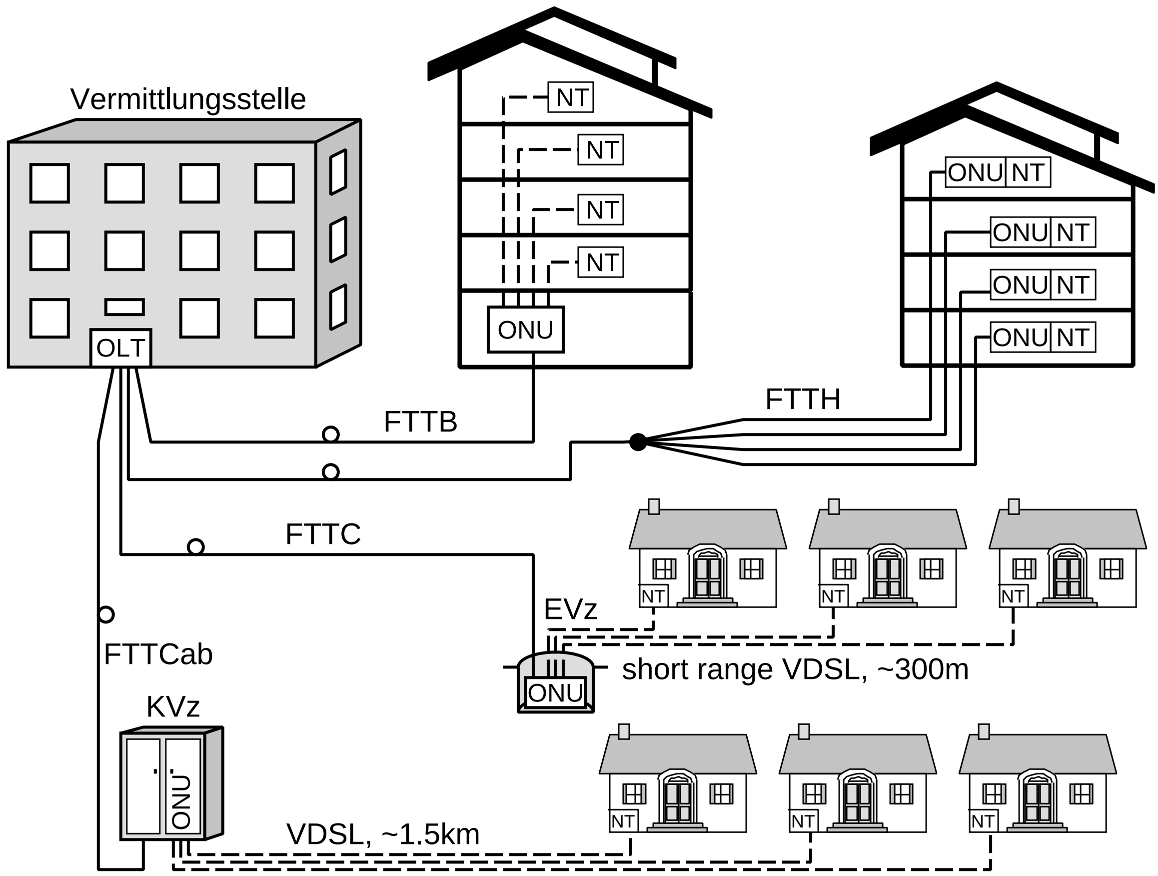


Abb. 2.15: *Illustration der wesentlichen FTTx-Topologien*

Abk.	Fibre to the ...	Glasfaser bis ...
FTTB	Building	ins Gebäude
FTTC(K)	Curb (brit.: Kerb)	an den Bordstein
FTTCab	Cabinet	zum Kabelverzweiger
FTTD	Desk (=FTTO)	auf den Schreibtisch
FTTEx	Exchange (→ADSL)	zur N-ISDN-Vermittlungsstelle
FTTH	Home	in die Wohnung
FTTKVz	Kabelverzweiger	Telekom-Bezeichnung für FTTCab [68]
FTTLA	Last Amplifier	zum letzten Verstärker (bei HFC-Netzen)
FTTM	Microwave	zur Mikrowellenübertragungsstrecke
FTTO	Office	ins Büro

Tabelle 2.1: *Übersicht über die FTTx-Topologiebezeichnungen in Zugangsnetzen*

2.4 Duplexmethoden

Die Trennung der Übertragung für die Richtung vom öffentlichen Netz zum Teilnehmeranschluß („downstream“, im folgenden als *Verteilrichtung* bezeichnet) und vom Teilnehmeranschluß zum öffentlichen Netz („upstream", im folgenden als *Rückrichtung* bezeichnet) kann mit unterschiedlichen Verfahren erreicht werden. Die Eignung dieser Duplex-Verfahren für die elektrische und optische Übertragung in ATM-Zugangsnetzen wird in den folgenden Abschnitten kurz diskutiert. Abb. 2.16 stellt die verschiedenen Verfahren nochmals zusammen.

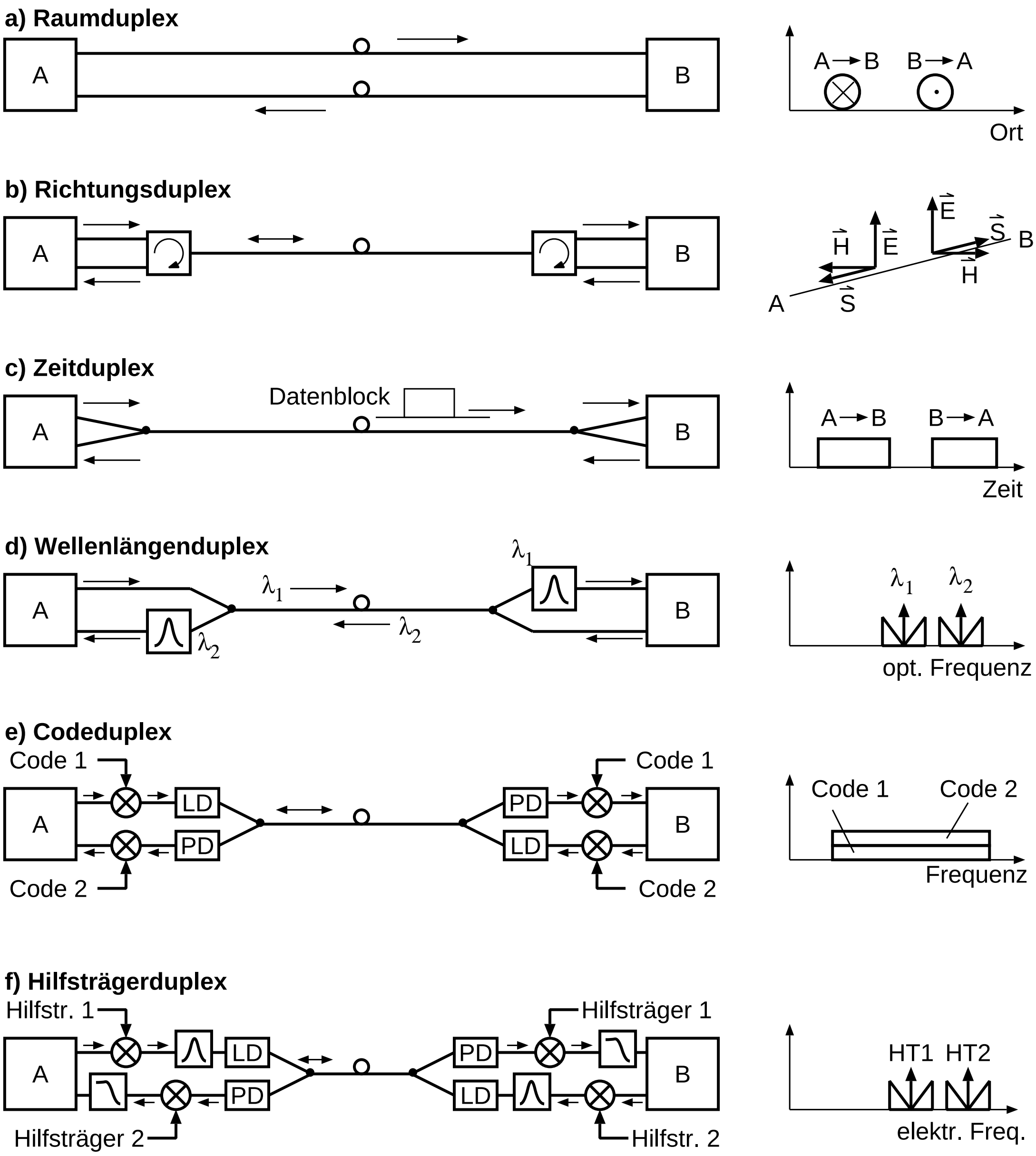


Abb. 2.16: *Illustration der Duplexmethoden: a) Raumduplex, b) Richtungsduplex, c) Zeitduplex, d) Wellenlängenduplex, e) Codeduplex, f) Hilfsträgerduplex*

2.4.1 Raumduplex

Mit Raumduplex (*Space Division Duplex, SDD*) wird die räumliche Richtungstrennung der Signale durch Übertragung auf getrennten Leitungen bezeichnet. In optischen Zugangsnetzen sind dies getrennte Fasern (oder Faserbäume) für die Verteil- und Rückrichtung. Bei elektrischer Signalübertragung müßte man eine zweite Koaxialleitung bzw. Vierdrahtleitungen bereitstellen, was im Zugangsbereich jedoch meist nicht geschieht.

2.4.2 Richtungsduplex

Mit Hilfe von Richtkopplern kann anstelle einer zweiten Leitung für die Rückrichtung auch eine Trennung der Signale unterschiedlicher Richtungen auf derselben Leitung erreicht werden. Die darauf basierende Technik wird als Richtungsduplex (*Direction Division Multiplex, DDM*) bezeichnet.

Beim Richtungsduplex führen Reflexionen (an Kontaktstellen von Kupferkabeln oder an Spleißstellen von Glasfasern) und nichtideale Richtkoppler zu einer Verringerung der Richtungstrennungsdämpfung, so daß sich die Signale der beiden Richtungen an den Empfängern teilweise überlagern. Bei elektrischen Punkt-zu-Punkt-Verbindungen werden daher Schaltungen zur Echokompensation eingesetzt, die diese Reflexionen kompensieren sollen.

2.4.3 Zeitduplex

Das klassische Verfahren des Halbduplexbetriebes von Funkkanälen findet – in abgewandelter Form und in einem kleineren Zeitmaßstab – auch in der digitalen Übertragungstechnik teilweise noch Anwendung. Hier wird es als Zeitduplex (*Time Division Duplex, TDD*) bezeichnet. Auf dem Kanal selbst kann zu einem Zeitpunkt jeweils nur ein Datenblock in einer der beiden Richtungen übertragen werden. Im Gegensatz zum Halbduplex-Betrieb eines Kanales, der bis zur Anwendungsebene eine Unterbrechung des Datenstromes bei jeweils einem Teilnehmer erfordert, wird im Zeitduplexbetrieb die Verschachtelung der Datenströme in Schicht 1 bzw. 2a des OSI-Modells [75, 137] vorgenommen, so daß den Instanzen höherer Schichten eine zeitkontinuierliche, transparente Datenverbindung bereitgestellt wird. Aus der PCM-Übertragungstechnik für Telefongespräche, bei der zyklisch Abtastwerte eines analogen Nutzsignales zu übertragen sind, kommt die alternative englische Bezeichnung *Time Compression Multiplexing (TCM)*. Sie weist darauf hin, daß mehrere Abtastwerte zwischengespeichert und dann mit einer höheren Übertragungsgeschwindigkeit übertragen werden.

Der Zeitduplexbetrieb ist technisch die einfachste Lösung zur gemeinsamen Nutzung eines Übertragungsmediums für unterschiedliche Richtungen. Er hat aber den Nachteil, daß eine große Auslastung des Kanales bei großer Übertragungsgeschwindigkeit und Laufzeit nur durch die Bildung sehr großer Blöcke möglich ist. Außerdem muß die Kanal-Übertragungsgeschwindigkeit mehr als doppelt so groß sein wie die Übertragungsgeschwindigkeit, die in jeder einzelnen Richtung im Mittel benötigt wird.

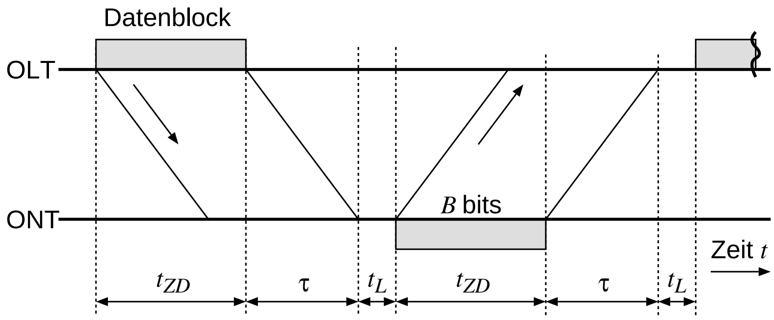


Abb. 2.17: *Kanalbelegung bei TCM*

Abb. 2.17 verdeutlicht diesen Zusammenhang. Um eine mittlere Übertragungsgeschwindigkeit v_Q für jede Richtung zu erreichen, muß die Kanal-Übertragungsgeschwindigkeit v_K

$$v_K \geq 2 \cdot v_Q \cdot \left(1 + \frac{\tau + t_L}{t_{ZD}}\right) \tag{2.1}$$

betragen, wobei τ die einfache Laufzeit auf dem Medium, t_L die nötige Pausenzeit zwischen den Blöcken der unterschiedlichen Richtungen, und t_{ZD} die Dauer eines Blockes einer Richtung ist. Es ist leicht zu erkennen, daß bei großen Laufzeiten τ auch große Datenblöcke übertragen werden müssen, weil sonst während des Richtungswechsels viel Kanalkapazität ungenutzt bleibt. Große Datenblöcke haben aber andererseits den Nachteil, daß die Periode $2 \cdot (t_{ZD} + \tau + t_L)$ des Umschaltprozesses und damit auch die Wartezeit während der Paketierung sowie der entsprechende Speicheraufwand groß werden.

Die TCM-Technik wird im wesentlichen in Japan in Schmalband-Zugangsnetzen eingesetzt [111, 110], ist aber auch in der Diskussion für breitbandige Funkzugangsnetze [133, 118]. Dabei wird teilweise mit entsprechenden Steuerungsmechanismen die Länge der Blöcke dynamisch an das aktuelle Verkehrsaufkommen angepaßt.

2.4.4 Wellenlängenduplex und Frequenzduplex

Bei optischer Übertragung gibt es die Option, unterschiedliche Wellenlängen als Träger für die Übertragung in beiden Richtungen zu verwenden. Dieses Verfahren wird in optischen Zugangsnetzen häufig eingesetzt. In der elektrischen Übertragungstechnik wird oft der Frequenzduplex als elektrisches Pendant des Wellenlängenduplex zur Richtungstrennung verwendet.

2.4.5 Codeduplex

Prinzipiell ist auch der Einsatz von CDM (*Code Division Multiplexing*) zur Richtungstrennung auf einem Kanal möglich. Da dieses Verfahren sehr aufwendig ist, lohnt sich sein Einsatz nur, wenn viele unterschiedliche Signale auf demselben Kanal zu unterscheiden sind und wird daher zur Richtungstrennung praktisch nicht verwendet.

2.4.6 Hilfsträgerduplex

In Abb. 2.16 f ist ein Beispiel für den Hilfsträgerduplex (*Subcarrier Multiplexing, SCM*) in einem System mit optischer Übertragung dargestellt. Hier wird dieselbe Wellenlänge für die Signale beider Richtungen verwendet. Ein elektrischer Hilfsträger wird mit dem Nutzsignal moduliert, und der Strom des optischen Senders (Laserdiode, LD) wird anschließend mit diesem modulierten Hilfsträger moduliert. Entsprechend erfolgt auch die Demodulation im elektrischen Signal, das der optische Empfänger (Photodiode, PD) detektiert hat. Da es sich bei SCM um eine analoge Überlagerung handelt, ist die Linearität der optischen Übertragung wesentlich wichtiger als bei den meisten anderen hier diskutierten Verfahren.

2.5 Multiplexverfahren

Im Gegensatz zu den Duplexverfahren, die die gemeinsame Verwendung eines Übertragungskanales für die Signale unterschiedlicher Übertragungsrichtungen festlegen, wird durch Multiplexverfahren die gemeinsame Nutzung eines Mediums durch Signale unterschiedlicher Stationen – auch in derselben Richtung – ermöglicht. In den meisten technischen Aspekten sind die entsprechenden Multiplex- und Duplexverfahren vergleichbar.

Oft existiert zu einem Multiplexverfahren auch ein entsprechendes Vielfachzugriffsverfahren, wie im Beispiel des Zeitmultiplex (*Time Division Multiplexing, TDM*) und des Zeitmultiplex-Vielfachzugriffes (*Time Division Multiple Access, TDMA*). Dabei handelt es sich bei dem entsprechenden Vielfachzugriffsverfahren um das Verfahren zur *zeitlichen* Zuteilung der entsprechenden Ressource[1].

[1]In der Übertragungstechnik werden die Begriffe WDMA und CDMA teilweise eingesetzt, um den gemeinsamen Zugriff mehrerer Stationen auf ein gemeinsames Medium von der gleichzeitigen Verwendung mehrerer Kanäle durch eine Station zu trennen. TDM und WDM bezeichnen dann den Einsatz mehrerer Zeitschlitze bzw. Wellenlängen auf einer Punkt-zu-Punkt-Leitung zwischen zwei Stationen. TDMA/WDMA bezeichnen dagegen die statische Zuweisung eigener Zeitschlitze bzw. Wellenlängen an mehrere Stationen, so

In der Literatur wird oft nicht deutlich zwischen Duplex und Multiplex und zwischen Multiplex und Vielfachzugriff unterschieden; die Begriffe werden überlappend verwendet. So gibt es im Englischen auch für die meisten Duplexmethoden keine vom entsprechenden Multiplex getrennten Begriffe.

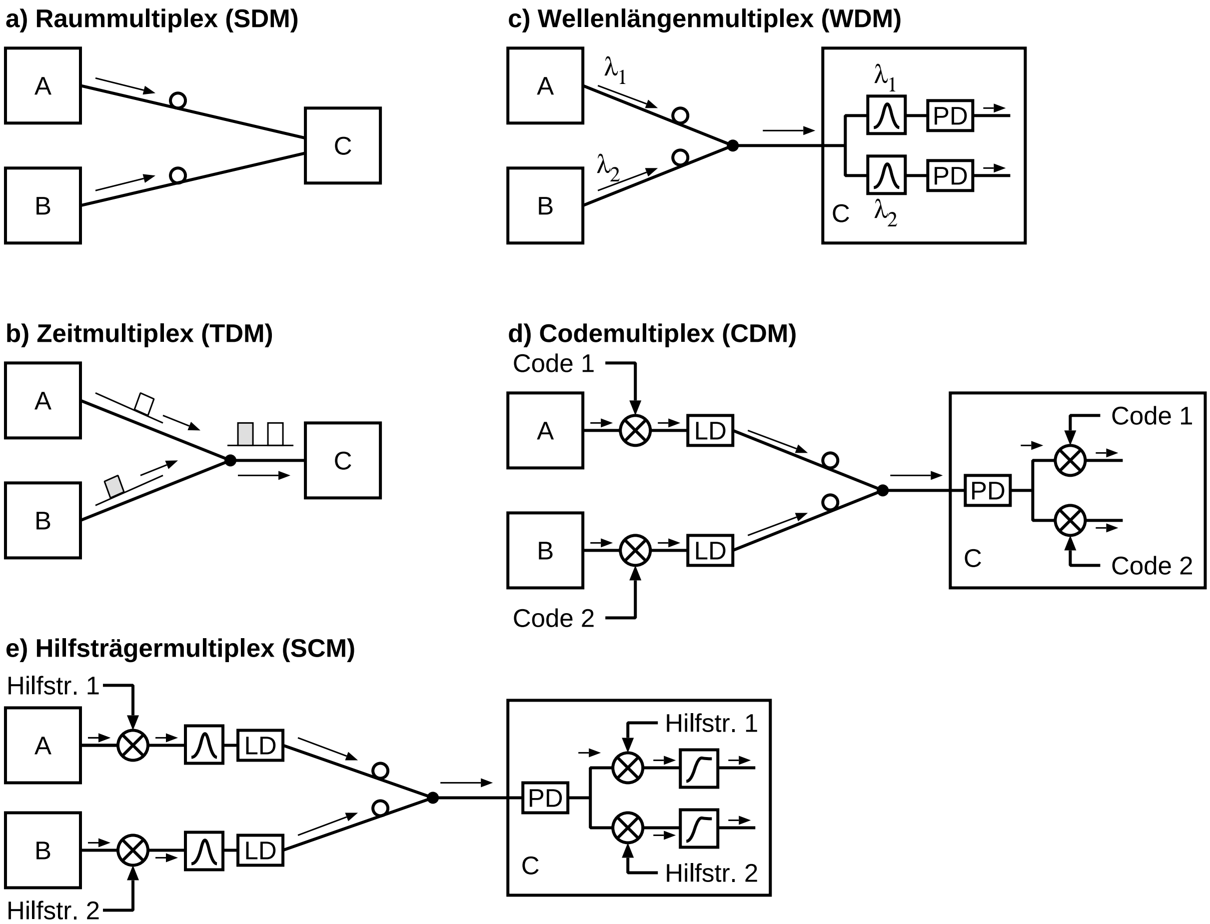


Abb. 2.18: *Illustration der Multiplexverfahren: a) Raummultiplex, b) Zeitmultiplex, c) Wellenlängenmultiplex, d) Codemultiplex, e) Hilfsträgermultiplex*

Die verschiedenen Multiplexverfahren sind in Abb. 2.18 für den Fall des Zugriffs zweier Stationen A und B auf ein gemeinsames Medium illustriert.

2.5.1 Raummultiplex

Raummultiplex ist der Begriff dafür, daß im Prinzip kein Multiplex auf einem gemeinsamen Medium stattfindet, weil jede Station ihre eigene Leitung verwendet.

daß das gemeinsame Medium betrieben wird wie mehrere Punkt-zu-Punkt-Leitungen. In dieser Arbeit soll allerdings die oben erwähnte vermittlungstechnische Unterscheidung zwischen Multiplex und Vielfachzugriff verwendet werden, bei der „Vielfachzugriff“ die dynamische zeitliche Zuordnung der Multiplex-Ressource an mehrere Stationen bedeutet.

2.5.2 Zeitmultiplex

Beim Zeitmultiplex (*Time Division Multiplexing, TDM*) belegen die Stationen nacheinander das gemeinsame Medium. Wenn in einer zeitlichen Rahmenstruktur jede Station einen festen Zeitschlitz belegen kann, spricht man von synchronem, ansonsten von asynchronem Zeitmultiplex. Beim asynchronen Zeitmultiplex ist weiterhin zu unterscheiden, ob die einzelnen Stationen ihren Zugriff auf das Medium in verteilter oder in zentral vorgegebener Weise koordinieren. Diese Aspekte werden in Kapitel 4 näher betrachtet.

2.5.3 Wellenlängenmultiplex und Frequenzmultiplex

Die große theoretische Übertragungskapazität von Glasfasern kann nur ausgenutzt werden, wenn der gesamte spektrale Bereich, in dem die Faser eine geringe Dämpfung zeigt, ausgenützt wird. Dazu werden die Signale unterschiedlicher Stationen auf optische Träger unterschiedlicher Wellenlängen aufmoduliert, so daß jede Station einen optischen Kanal belegen kann. Dieser Wellenlängenmultiplex (*Wavelength Division Multiplexing, WDM*) wird, bei geringerem Kanalabstand, auch als „dichter Wellenlängenmultiplex“ (*Dense WDM, DWDM*) oder als „optischer Frequenzmultiplex“ (*Optical Frequency Division Multiplexing, OFDM*) bezeichnet [68].

WDM wird in lokalen Netzen auch als dynamische Kombination mit TDMA eingesetzt, so daß ein Sender für jeden Zeitschlitz oder jedes Paket, das er übertragen möchte, über ein Vielfachzugriffsverfahren bestimmt, auf welche Wellenlänge er zugreift. Hierfür sind durchstimmbare Sender oder Empfänger nötig. Wegen der Kombination von WDM mit einem Vielfachzugriffsverfahren im Zeitbereich wird in diesem Fall auch von WDMA (*Wavelength Division Multiple Access*) gesprochen. In Vorschlägen für WDM-Weitverkehrsnetze wird dagegen meist davon ausgegangen, daß die Wellenlängenzuteilung nicht auf der Dateneinheiten- oder Büschelebene, sondern auf der Verbindungsebene oder bei der Festlegung von virtuellen Pfaden geschieht.

Das physikalische Äquivalent zum Wellenlängenmultiplex in der optischen Übertragungstechnik ist der Frequenzmultiplex (*Frequency Division Multiplexing*) in der elektrischen Übertragungstechnik. Hier werden die Nutzsignale auf unterschiedliche Trägerfrequenzen aufmoduliert. Der Empfänger demoduliert die Träger üblicherweise nach dem Heterodyn-Prinzip [53]. Bei WDM-Übertragung ist dies nur dann nötig, wenn die verwendeten optischen Wellenlängen so dicht beieinander liegen, daß der Einsatz optischer Filter alleine nicht mehr ausreicht, oder wenn ein Empfänger auf verschiedene Wellenlängen abstimmbar sein soll [92].

2.5.4 Codemultiplex

Auch der Codemultiplex (*Code Division Multiplexing, CDM*) kann, wie WDM, mit einem Vielfachzugriffsmechanismus auf Verbindungs-, Büschel- oder Dateneinheitenebene kombiniert werden und wird dadurch zum CDMA (*Code Division Multiple Access*). CDMA ist vor allem für Funk-Zugangsnetze in Diskussion [133, 14], wird aber auch als Alternative zu TDMA oder WDMA in PONs untersucht [86].

2.5.5 Hilfsträgermultiplex

Der Hilfsträgermultiplex (*Subcarrier Multiplexing, SCM*) kommt aus der Technik der Breitband-Kabelnetze zur Fernsehversorgung, wo jedes Fernsehsignal die Amplitude eines Trägers fester Frequenz moduliert. In den ersten Glasfasernetzen, die zur Übertragung von Kabelfernsehprogrammen eingesetzt wurden, wurde das ansonsten auf dem Kabel übertragene Summensignal mittels Intensitätsmodulation (optische Amplitudenmodulation, AM) auf einen optischen Träger fester Wellenlänge aufmoduliert. So trägt im Prinzip eine elektromagnetische Welle (das Licht mit dieser Wellenlänge) weitere Hilfsträger, auf die die Fernsehprogramme moduliert sind. Diese analoge Übertragungstechnik stellt sehr hohe Anforderungen an die Linearität des optischen Übertragungssystems, damit Intermodulationsprodukte nicht den Störabstand der Nutzsignale verringern.

In digitalen Zugangsnetzen wird der Hilfsträgermultiplex nicht nur zur Verteilung verschiedener Signale von einer Station an viele andere Stationen eingesetzt, sondern auch zur gleichzeitigen Übertragung verschiedener Signale unterschiedlicher Stationen zu einer zentralen Station. In diesem Fall werden die Hilfsträger jeweils auf einen separaten Lichtstrahl moduliert. Die verschiedenen Lichtstrahlen werden anschließend im Anschlußnetz kombiniert, und der zentrale Empfänger demoduliert nach Empfang des optischen Signales die Hilfsträger wieder in der elektrischen Ebene. Hierbei stellt die Überlagerung der Störsignale aller Sender ein Problem dar. Sie kann z. B. durch Abschalten nicht-aktiver Sender verringert werden, ist aber prinzipiell nicht zu verhindern.

2.6 Netzkonzepte für den ATM-Zugang

In den letzten Jahren haben sich in der Literatur und in Feldversuchen einige wesentliche Konzepte für den mehr oder weniger breitbandigen Zugang zu öffentlichen ATM-Netzen herauskristallisiert. Sie werden im folgenden kurz beschrieben und eingeordnet.

2.6.1 Direktanschluß

Die direkte Verbindung eines Teilnehmeranschlusses mit einer ATM-Vermittlungsstelle über eine Leitung mit großer Bandbreite wird sich nur lohnen, wenn diese Leitung entsprechend ausgenützt wird oder wenn sie sehr kurz ist. Um die Leitung besser auszunützen, wurden die unten näher besprochenen Zugangsnetzkonzepte zur gemeinsamen Nutzung eines Vermittlungsstellenanschlusses durch mehrere Teilnehmer entwickelt. Die andere Methode, eine Verkürzung der Leitung, ergibt sich, wenn die Vermittlungsstelle zu den Teilnehmern hin verschoben wird. Das Konzept eines kleinen ATM-Vermittlungsknotens daheim oder am Straßenrand mit Glasfaserleitung zur nächsten größeren Vermittlungsstelle (FTTB bzw. FTTC) wurde in Feldversuchen erfolgreich demonstriert [38, dort: „direct link“]. Das Konzept ist prinzipiell aus der Telefontechnik bekannt, wo in großen Gebäuden auch öffentliche Vermittlungseinrichtungen plaziert werden. Es hat allerdings gegenüber Zugangsnetzen den Nachteil, daß komplexe Netzkomponenten, deren Wartung vor Ort wesentlich aufwendiger sein kann als die üblicher Zugangsnetze, sehr weit von den Vermittlungsstellen entfernt installiert werden. Es muß also bei solchen Lösungen darauf geachtet werden, daß die eingesetzten Komponenten wartungsarm sind und stabil funktionieren, so daß keine Wartung vor Ort nötig ist.

2.6.2 ADSL

Mit ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) wird eine Technik bezeichnet, die auf der Telefon-Zweidrahtleitung zwischen der Telefon-Vermittlungsstelle und dem Teilnehmeranschluß neben einem Telefonkanal noch einen breitbandigen digitalen Kanal zur Verfügung stellt. Dieser Kanal, dessen Richtungen im Frequenzduplex getrennt werden, wird unsymmetrisch aufgeteilt, damit zum Teilnehmeranschluß eine wesentlich höhere Übertragungsgeschwindigkeit erreicht werden kann als in der Rückrichtung. Häufig werden Modulationsverfahren wie die Mehrtonmodulation (*Discrete Multitone Modulation, DMT*) eingesetzt, die sich den Kanaleigenschaften anpassen können [39]. Übliche Werte für die Übertragungsgeschwindigkeiten sind 4–8Mbit/s zum Teilnehmeranschluß und 64kbit/s–1Mbit/s in der Rückrichtung.

Die prinzipielle Konfiguration zeigt Abb. 2.19 nach [65]. Jeder Teilnehmeranschluß ist über seine eigene Telefonleitung mit der Schmalband-Vermittlungsstelle verbunden (Sterntopologie). Die gemeinsame Nutzung dieser Leitung mit dem Telefondienst erfolgt im Frequenzmultiplex und die Richtungstrennung der Breitbandkanäle im Frequenzduplex.

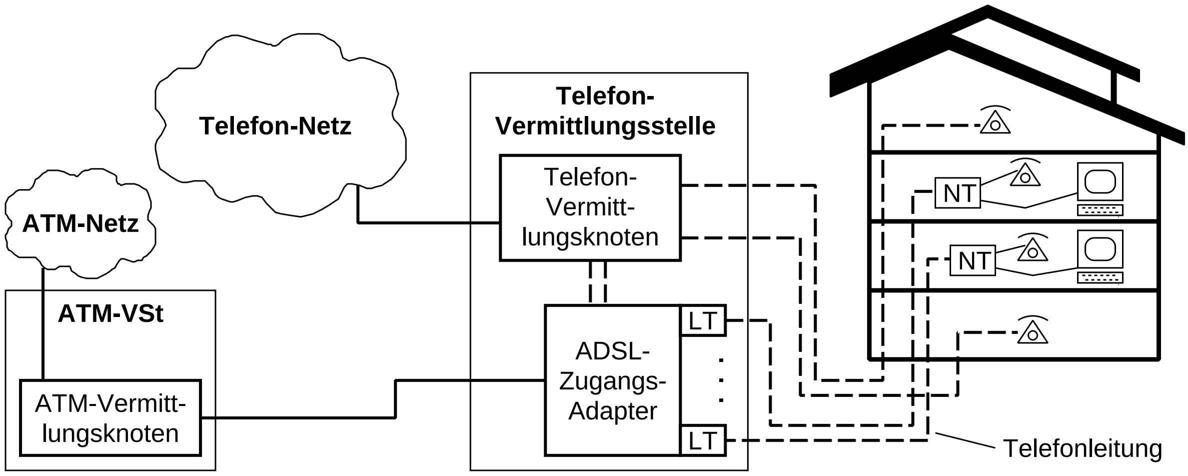


Abb. 2.19: *Konfiguration eines ADSL-Zugangs*

Da bei einem ADSL-Zugang das meist Glasfaser-basierte ATM-Netz in der Schmalband-Vermittlungsstelle endet, wird diese Topologie auch mit FTTEx (*Fibre to the Exchange*) bezeichnet [51, 126].

Beim Einsatz der ADSL-Technologie wird davon ausgegangen, daß in der Verteilrichtung wesentlich mehr Übertragungskapazität benötigt wird als in der Rückrichtung. Dieser Ansatz erscheint gerechtfertigt, wenn man davon ausgeht, daß Teilnehmer mit dem Datenstrom in der Rückrichtung eigentlich nur den Datenstrom der Verteilrichtung steuern oder allenfalls Texte übertragen wollen. Wenn man dagegen die Kommunikationsprotokolle betrachtet, die auf der Verbindung zwischen dem Teilnehmer und einem Netzknoten ablaufen, stellt man schnell fest, daß in der Rückrichtung auch Übertragungskapazität für die Quittierungen eines Transportprotokolles bereitgestellt werden muß. Damit die Übertragungskapazität in einer Richtung ausgeschöpft werden kann, benötigt das im Internet vorwiegend eingesetzte Transportprotokoll TCP [122] etwa 10–30% dieser Kapazität auch in der Gegenrichtung, um die empfangenen Datenblöcke zu quittieren. Daher eignet sich ADSL in den besonders unsymmetrischen Varianten besser für Anwendungen, die keine Quittierungen übertragener Blöcke vorsehen, wie z. B. die Video-Übertragung in einem MPEG-Transportstrom über ATM [76], als für den transparenten Anschluß von Datenendgeräten an ein Datennetz (z. B. das Internet). Diese Situation kann durch eine Veränderung der TCP-Quittierungen zwar verbessert werden [106], aber der ADSL-Anschluß bleibt dennoch auf Verteil- und Abrufdienste beschränkt, während andere, eher symmetrische Systeme auch symmetrische Telekommunikationsdienste, Heimarbeit oder die Einrichtung von Serverdiensten auf der Teilnehmerseite unterstützen können [40].

2.6.3 PON

Passive Optische Netze werden als Basis für ein ATM-Zugangsnetz in verschiedenen Topologien diskutiert, vgl. Abb. 2.15. Nur in der FTTH-Architektur wird die Glasfaser bis zum Teilnehmeranschluß geführt. In den anderen Architekturen (FTTCab, FTTC, FTTB) endet die Glasfaserstrecke an einem optischen Netzabschluß (*Optical Network Unit, ONU*) und wird durch eine elektrische Übertragungsstrecke mit Kupferdoppeladern oder Koaxialkabeln in der Endleitung ergänzt.

Als Duplexverfahren wird meist Raumduplex eingesetzt, aber auch Richtungs- und Wellenlängenduplex sind in der Diskussion. In der Verteilrichtung wird naturgemäß der asynchrone Zeitmultiplex der ATM-Übermittlung beibehalten. Durch die Verteil-Eigenschaft des PONs erhalten alle Anschlüsse alle ATM-Zellen. Das Ausfiltern der für den jeweiligen Anschluß bestimmten Zellen übernimmt üblicherweise ein aktiver Netzabschluß (NT). In der Rückrichtung werden ATM-PONs meist im Zeitmultiplex betrieben, wobei die angeschlossenen Stationen elektronisch synchronisiert werden müssen (s. Abschn. 2.7.2.2), damit die von ihnen übertragenen Datenblöcke ohne zeitliche Überlappungen an den Sternkopplern zusammengeführt werden können. Die Mechanismen zur Kanalzuteilung im TDMA-Modus werden in den folgenden Kapiteln genauer beschrieben. Als Alternative zu TDMA kommt auch CDMA mit Code-Zuteilung auf der Büschel- oder Verbindungsebene und WDMA in Frage.

Die Funktion des PONs als Zugangsnetz zu einem ATM-basierten Breitbandnetz kann ergänzt werden durch den Transport von Schmalband-ISDN-Diensten (entweder in ATM-Zellen oder, da die Verzögerungen durch das Paketieren erheblich sind, in speziell vorgesehenen Schmalbandkanälen) und durch den Transport von Video-Verteildiensten (z. B. Kabelfernsehen), der meist auf einer separaten Wellenlänge vorgesehen wird. Abb. 2.20 zeigt eine solche Konfiguration am Beispiel des Projektes BAF (*Broadband Access Facilities*) aus dem RACE-Programm (*Research for Advanced Communications Technologies in Europe*) der Europäischen Union. Der hier dargestellte Aufteilungsfaktor (*Splitting Factor*) von 32 ONUs an einer LT ist typisch für PON-Netze; er ist im wesentlichen durch die nach der Leistungsteilung an den Empfängern ankommende optische Leistung begrenzt.

2.6.4 SuperPON

Ein alternativer Ansatz zum PON besteht in den „SuperPON"-Systemen, die in letzter Zeit häufiger vorgeschlagen werden. Diese Systeme sollen durch den Einsatz optischer Verstärker einen größeren Aufteilungsfaktor erreichen. Dabei wird das Medium sowohl im Wellenlängen-

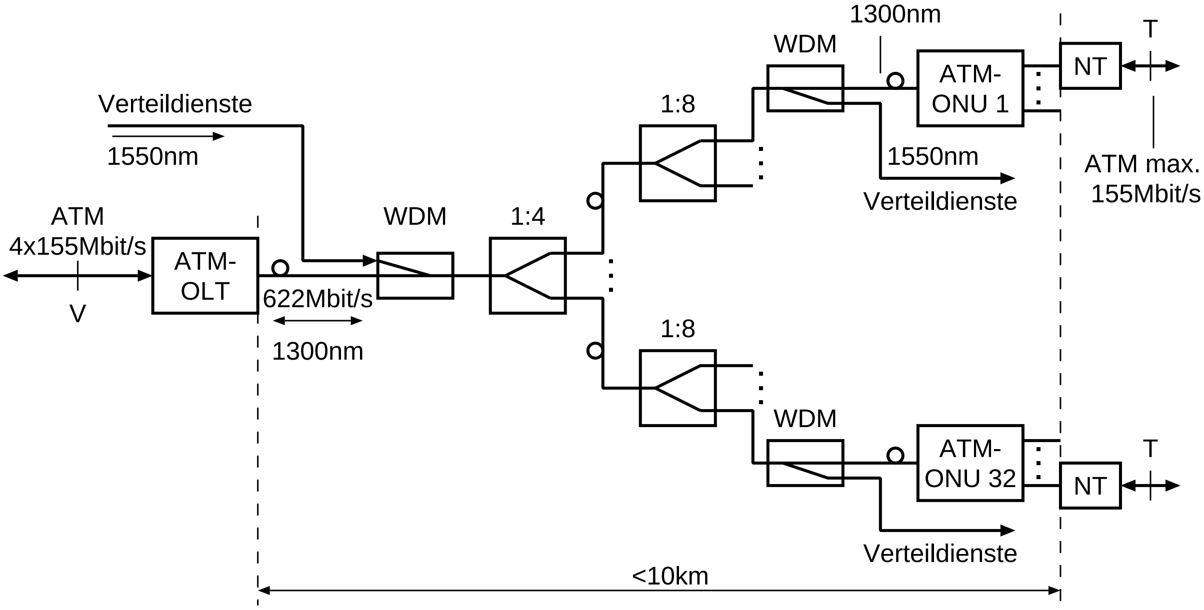


Abb. 2.20: *Beispiel für die Konfiguration eines PON-Netzes mit überlagertem Videoverteildienst, nach [7, 68]*

als auch im Zeitmultiplex zwischen den Stationen aufgeteilt. Die Topologie entspricht dem Doppelstern aus Abb. 2.14, wobei in den Sternpunkten optische Verstärker zum Einsatz kommen. Ein typischer Vertreter der Vorschläge für SuperPONs [144, 109] ist in Abb. 2.21 skizziert.

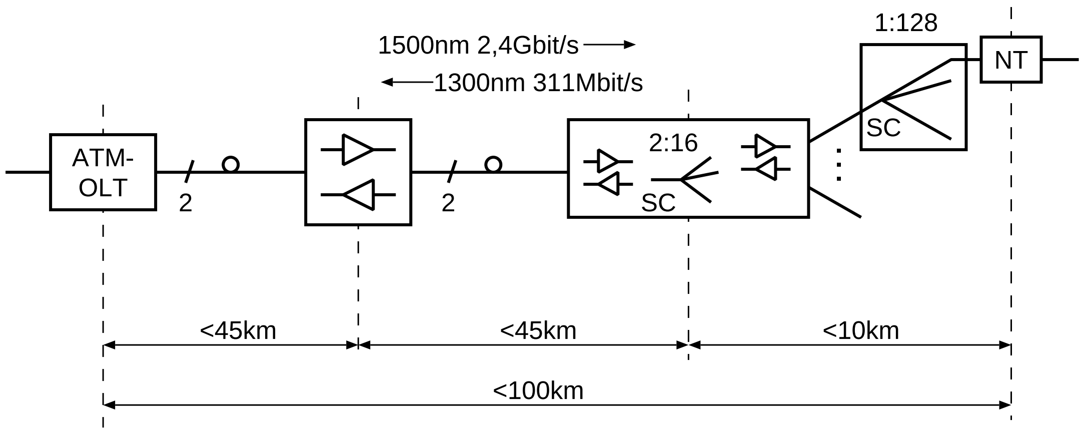


Abb. 2.21: *Beispiel für ein SuperPON-Netz mit optischen Verstärkern und einem Aufteilungsfaktor von 2048*

Hier wird die Richtungstrennung durch Wellenlängenduplex durchgeführt, so daß die bidirektionale Verstärkung sehr leicht durch einen optischen Verstärker für jede Richtung und entsprechende Wellenlängenfilter realisiert werden kann. Durch den Einsatz der optischen Verstärker kann ein Aufteilungsfaktor von 2048 (statt 32 bei einem typischen PON) erreicht werden. Dadurch wird es sinnvoll, den optischen Netzabschluß OLT weiter von den Teilnehmeranschlüssen zu entfernen, weil mehr Teilnehmer gebündelt werden können. Die hier zitierten Vorschläge des Projekts PLANET aus dem ACTS-Programm (*Advanced Communications Technologies and Services*) der Europäischen Union gehen allerdings wieder von einer relativ geringen Übertragungsgeschwindigkeit im Rückkanal aus, die nur etwa 12% der Geschwindigkeit in der Verteilrichtung beträgt. Dies kann – wie schon bei der Diskussion der ADSL-Technologie in Abschnitt 2.6.2 erwähnt – für Internet-Dienste zu wenig sein.

2.6.5 HFC

Die Endleitung zum Teilnehmeranschluß ist in der HFC-Technologie (*Hybrid Fibre Coax*) die vielfach bereits vorhandene Koaxialleitung, die die Wohnung mit Kabelfernsehprogrammen versorgt. Im Gegensatz zur Telefonleitung sind diese Koaxialkabel für breitbandige Übertragung besser geeignet; die Netze haben aber keine Punkt-zu-Punkt-Topologie. Stattdessen liegen die Fernseh-Kabelanschlüsse meist am Ende einer Kaskade von Verstärkern, die eine sehr große Anzahl von Teilnehmeranschlüssen von einer einzigen Kopfstation aus versorgen.

Die Erweiterung dieser Breitband-Kabelnetze (BK-Netze) zur Mitbenutzung als ATM-Zugangsnetze erfordert daher ein überlagertes Zugangsnetz, das an einem Knotenpunkt nahe dem Teilnehmer mit dem BK-Netz verbunden wird. Falls sich dieser Knotenpunkt am letzten Verstärker des BK-Netzes befindet, spricht man auch von der FTTLA-Topologie (*Fibre to the Last Amplifier*), ansonsten müssen alle weiteren Verstärker durch einen Verstärkerkanal für die Rückrichtung mit entsprechenden Richtkopplern ergänzt werden.

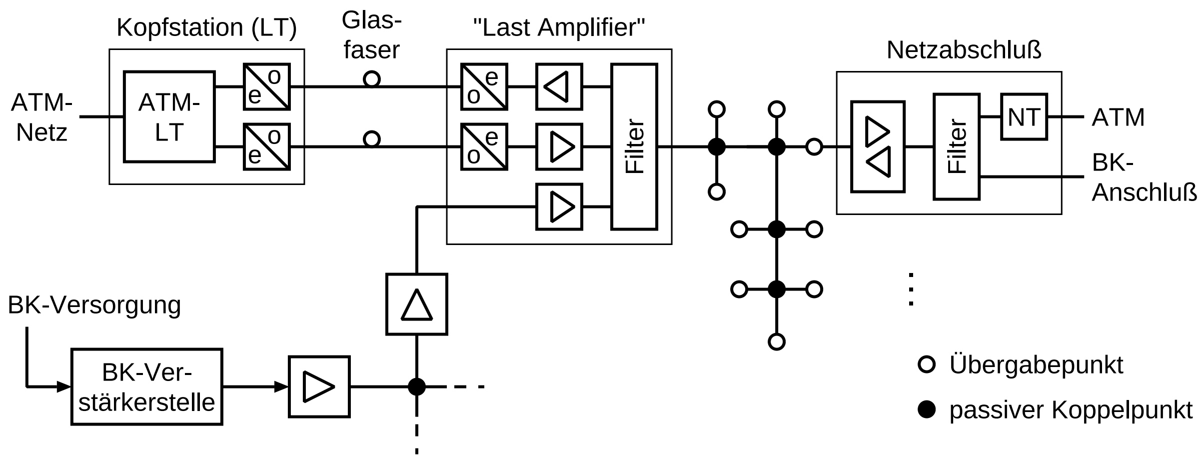


Abb. 2.22: *Beispiel für ein HFC-Netz mit FTTLA-Architektur*

Abb. 2.22 zeigt das Prinzip eines HFC-Zugangsnetzes für den Fall einer FTTLA-Topologie. Die prinzipielle Topologie dieser HFC-Netze ist nicht einheitlich. Der Glasfaser-Teil kann Punkt-zu-Punkt- oder Baumtopologie besitzen. Das Koaxialkabelnetz hat eine Mischung aus Baum- und Bustopologie. Diese macht im Rückkanal – ähnlich wie in passiven optischen Zugangsnetzen – die Verwendung von Medienzugriffsmechanismen nötig, deren Grundfunktionen zusammen mit den Eigenschaften der physikalischen Übertragungsschicht zur Zeit an verschiedenen Stellen standardisiert werden [16, 43]. Auch bei IEEE arbeitet eine Gruppe an einem entsprechenden Standard, der die Nummer 802.14 tragen wird. Dort wird versucht, ein „ATM-freundliches", aber nicht auf den ATM-Zugang festgelegtes, lokales Netz auf der Basis der HFC-Architektur zu definieren [49, 73].

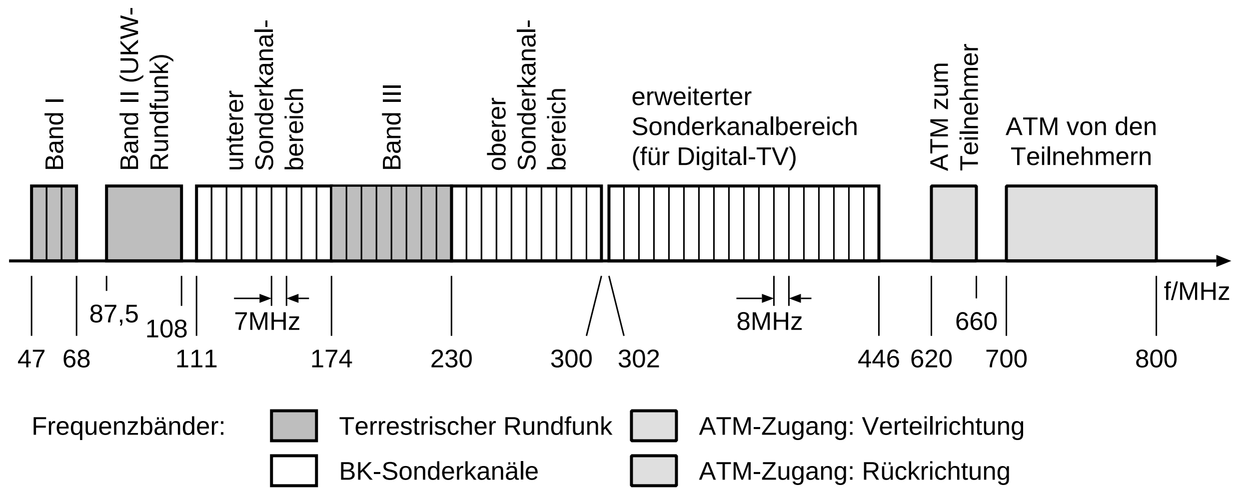


Abb. 2.23: *Frequenzplan in einem BK-Netz und Erweiterung zum HFC-ATM-Zugangsnetz (nach [66])*

Der Frequenzplan der bestehenden Kabelnetze teilt die zur Verfügung stehende Übertragungsbandbreite in Kanäle ein, die – national unterschiedlich – eine Breite von 6–12 MHz besitzen, wobei für den ATM-Zugang Bänder mit 6 oder 8 MHz verwendet werden [24, 97, 66, 43]. Abb. 2.23 zeigt ein Beispiel nach [66]; der Rückkanal wird oft auch in das Band unter 47 MHz gelegt [43].

Diese Aufteilung in Kanäle entspricht der Hauptfunktion der BK-Netze, der Verteilung von Videoströmen. Um über ein solches Kabelnetz einen ATM-Zugang anzubieten, werden die ATM-Daten der Verteilrichtung und der Rückrichtung in unterschiedlichen BK-Kanälen übertragen (Frequenzduplex). Die Dienste der Videoverteilung und des ATM-Zugangs werden im Frequenzmultiplex übertragen, während zwischen den Teilnehmern des ATM-Zugangsdienstes eine Mischung aus Zeit- und Frequenzmultiplex eingesetzt wird, indem mehrere BK-Kanäle jeweils im Zeitmultiplex betrieben werden [49, 23]. Die Rahmenstruktur und die Abbildung der ATM-Zellen in HFC-Rahmen wird derzeit bei IEEE/ATM-Forum und bei DAVIC unterschiedlich standardisiert [135].

Die einzelnen Kanäle bieten hierbei Übertragungsgeschwindigkeiten von 30–40 Mbit/s in der Verteilrichtung und 0,25–16 Mbit/s in der Rückrichtung [135]. Eine Alternative besteht darin, mehrere Kanäle aus dem BK-Raster zusammenzufassen und gemeinsam zu betreiben [66]. Dadurch erhöhen sich zwar die Kosten für den Teilnehmeranschluß [97], aber die Unterteilung des ATM-Zugangs in mehrere Zugangskanäle entfällt, und es kann in beiden Richtungen jeweils eine Übertragungsgeschwindigkeit von 155 Mbit/s genutzt und gemeinsam verwaltet werden. Dadurch vergrößert sich der erzielbare Bündelungs- und Multiplexgewinn im Zugangsnetz. Um den Teilnehmeranschluß dennoch kostengünstig zu halten, wird in [66] ein System beschrieben, das einen gemeinsamen Netzabschluß (NT) für alle Teilnehmeranschlüsse in einem Haus zur Verfügung stellt und die Strecke zwischen NT und Teilnehmeranschluß mit 25,6 Mbit/s betreibt.

2.6.6 Funkzugang

Der Funkzugang zu ATM-Netzen ist, wie der zu Schmalbandnetzen auch, nach dem Kriterium der verlangten Mobilität einzuordnen:

- Systeme, die die Funkstrecke als Ersatz für eine ansonsten aufwendig zu verlegende Endleitung einsetzen, stellen meist keine oder nur eine sehr geringe Mobilität bereit [105]. Die Anschlußstation beim Teilnehmer wird stationär installiert; teilweise kommt auch Richtfunk zum Einsatz. In Anlehnung an die HFC-Technologie wird hier auch von HFR (*Hybrid Fibre Radio*) gesprochen [38, 45], wenn die Funk-Basisstation über eine Glasfaserstrecke mit der ATM-Vermittlungsstelle verbunden ist. Abb. 2.24 illustriert den Netzzugang über HFR. Bei DAVIC wird unter der Bezeichnung LMDS (*Local Multipoint Distribution System*) ein ähnliches Zugangskonzept standardisiert, das Übertragungsgeschwindigkeiten von 2 Mbit/s in der Rückrichtung und 100 Mbit/s in der Verteilrichtung unterstützen soll [43]. Hier wird also, wie bei der ADSL-Technik, mehr Gewicht auf die Verteilung von Multimediadaten als auf eher interaktive Dienste oder Protokolle mit Bestätigung und Wiederholung von Dateneinheiten gelegt.

- Systeme mit mittlerer Mobilität werden eingesetzt, wenn nicht der Installationsaufwand, sondern die Flexibilität und die Bewegungsmöglichkeit des drahtlosen Anschlusses im Vordergrund steht. Sie sehen eine Bewegung des Teilnehmeranschlusses mit geringer Geschwindigkeit vor oder erlauben es zumindest, die Endeinrichtungen zu bewegen, während der Netzzugang nicht genutzt wird. Entsprechend den Mobilitätsanforderungen muß auch die Netzabschlußeinheit transportabel ausgelegt sein.

- Systeme mit hoher Mobilität erlauben eine Bewegung des Netzabschlusses mit größerer Geschwindigkeit und über größere Distanzen im Betrieb. Hier müssen Einrichtungen zur Mobilitätsunterstützung wie Weiterreichen (*Handover*) in andere Funkzellen und

Adressierung bzw. Auffinden der Teilnehmer zur Verfügung stehen [121]. Ein hochmobiler Netzzugang zu Breitbandnetzen wird im wesentlichen für mobile Telearbeit, z. B. in Zügen, sinnvoll sein.

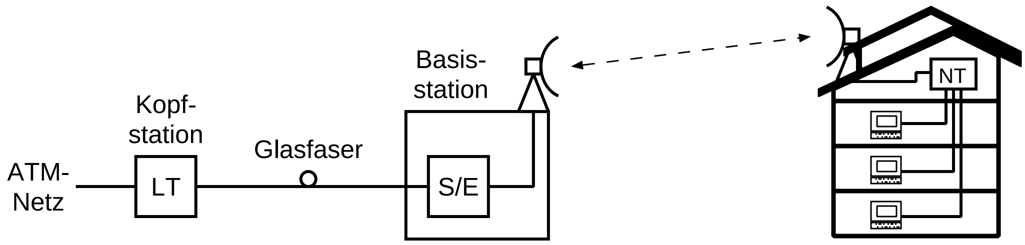


Abb. 2.24: *Beispiel für die Architektur eines HFR-Zugangsnetzes*

Als Duplexmethode kommt üblicherweise Zeit- oder Frequenzduplex zum Einsatz. Die zur Verfügung stehenden Funkkanäle werden im Zeit- und Frequenzmultiplex, teilweise auch im orthogonalen Frequenzmultiplex [45] oder Codemultiplex zwischen den Stationen aufgeteilt.

2.7 ATM-PON-Zugangsnetze

In den weiteren Kapiteln der vorliegenden Arbeit sollen PON-basierte ATM-Zugangsnetze im Mittelpunkt stehen. Dazu werden hier einige grundsätzliche Aspekte der Integration von PON-Zugangsnetzen in ATM-Weitverkehrsnetze beleuchtet.

2.7.1 Verteilrichtung

Die Grundfunktionen eines ATM-PONs in der Verteilrichtung sind Ratenanpassung, VP-Filterung, VPI-Umsetzung und die Bereitstellung von Sicherheitsmechanismen.

2.7.1.1 Ratenanpassung

Die Übertragungsgeschwindigkeit auf der Endleitung zum Teilnehmeranschluß ist meist geringer als im Weitverkehrsnetz. Auch wenn davon ausgegangen werden darf, daß beim Verbindungsaufbau die CAC-Funktion (*Connection Admission Control*) in der lokalen Vermittlungsstelle nur Verbindungen mit einer auf dem Zugangsnetz technisch möglichen maximalen Zellrate zuläßt, kann eine Verbindung nach der Übertragung über das Weitverkehrsnetz, bedingt durch die variable Zellverzögerung im Netz, kurzzeitig eine höhere Zellrate besitzen.

Deshalb muß am Übergang in ein Zugangsnetz mit geringerer Übertragungsgeschwindigkeit diese durch einen Zellpuffer ausgeglichen werden. Dabei tritt einerseits das Problem der durch die Pufferung noch weiter vergrößerten Zellverzögerungsschwankungen auf, andererseits muß auch dieser Pufferspeicher ausreichend dimensioniert werden. Die Größe des vorzusehenden Pufferspeichers hängt von dem zu erwartenden Verkehrsgemisch auf der Endleitung, von der tolerierbaren Zellverlustrate und von der verlangten Auslastung dieser Leitung ab. Generell ist jedoch zu sagen, daß eine vollständige Auslastung der Endleitung in einem asynchronen Netz praktisch unmöglich ist.

2.7.1.2 VP-Filterung und -Umsetzung

Das passive Verteilnetz überträgt alle ATM-Zellen von der LT zu allen Teilnehmern. Daher muß in der ONU oder in der NT eine Filterfunktion vorhanden sein, die verhindert, daß ATM-Zellen an Stationen übertragen werden, für die sie nicht bestimmt sind. Zu diesem Zweck wird den ATM-Zellen in manchen Systemvorschlägen ein zusätzliches Feld mit der Nummer der Zielstation vorangestellt. Wenn kein solches Feld verwendet wird, kann die Filterfunktion auf der Basis der Nummer des jeweiligen virtuellen Pfades (*Virtual Path Identifier, VPI*) arbeiten. Dazu muß sichergestellt sein, daß innerhalb des Zugangsnetzes die VPIs eindeutig sind. Das bedeutet insbesondere, daß vordefinierte VPIs wie der Standard-Pfad mit VPI=0 innerhalb des Zugangsnetzes auf einen anderen Wert gesetzt werden müssen, der für jeden Teilnehmeranschluß eindeutig ist. Diese zweite Option verringert den Mehraufwand an Bits, der mit jeder ATM-Zelle im Zugangsnetz übertragen wird. Dafür müssen LT und ONU/NT eine VPI-Umsetzung vornehmen; dadurch wird das Zugangsnetz zu einem ATM-Cross-Connect. Ein Beispiel für die VPI-Umsetzung und Filterung ist in Abb. 2.25 dargestellt. Ein „*“ in der Tabelle einer NT bedeutet, daß ATM-Zellen des entsprechenden virtuellen Pfades an der NT verworfen werden und am entsprechenden T-Referenzpunkt nicht mehr zu sehen sind.

2.7.1.3 Sicherheitsaspekte

ATM-Zugangsnetze mit gemeinsam genutztem Medium können gegenüber einzelnen Leitungen ein erhöhtes Sicherheitsrisiko darstellen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn der Hoheitsbereich des Netzbetreibers sich nicht bis zur NT erstreckt und sich die in Abschnitt 2.7.1.2 diskutierte Filterfunktion in einem Teilnehmer-Endgerät befindet.

Wenn die Leitung vor der Filterfunktion abgehört werden kann, dann müssen Kopf und Inhalt der ATM-Zellen in der Verteilrichtung verschlüsselt werden. Verfahren dazu sind

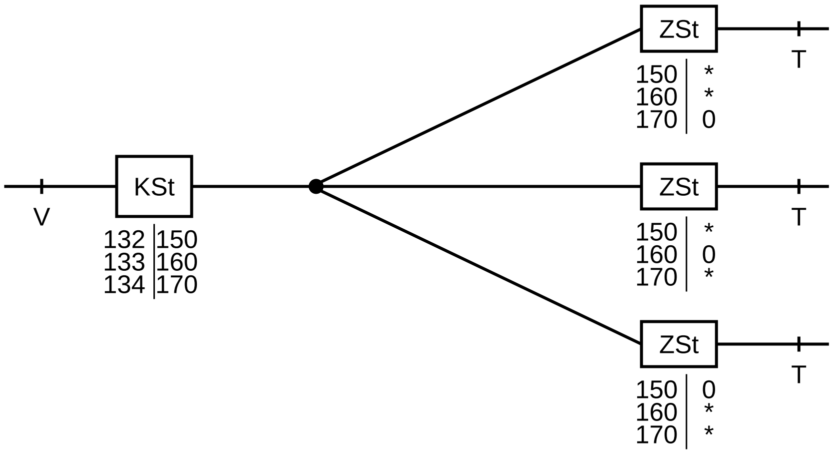


Abb. 2.25: *Beispiel für die Umsetzung von VPIs in einem Zugangsnetz ohne eigene Stationskennungen*

in [95, Kap. 3.8] diskutiert.

Ein weiteres Problem ist das Beobachten der Verkehrsaktivität anderer Teilnehmer, das möglich wird, wenn die Leitung vor dem Abschluß des Medienzugriffsprotokolles der Rückrichtung (s. Abschn. 2.7.2.3) abgehört werden kann. Mit geeigneten technischen Hilfsmitteln sind hier auch sogenannte „Denial-of-Service"-Angriffe denkbar, bei denen das Netz gezielt immer dann gestört wird, wenn ein bestimmter anderer Teilnehmeranschluß eine Sendeberechtigung erhält. Prinzipiell können auch die MAC-Informationen verschlüsselt werden, sinnvoller ist es jedoch, sicherzustellen, daß an keinem Teilnehmeranschluß der direkte Zugriff auf die Übertragungsleitung vor dem Netzabschluß bzw. der ONU möglich ist. Dadurch wird auch die Möglichkeit primitiver Störungen des Betriebes durch Einspeisen unzulässiger physikalischer Signale (Licht in optischen oder Spannung in elektrischen Zugangsnetzen) verringert. Wenn die NT aus anderen Gründen nicht gesichert werden kann, dann sollte aus Sicherheitsgründen der Abschluß des Medienzugriffsprotokolles in der ONU liegen.

2.7.2 Rückrichtung

Der TDM- oder TDMA-Betrieb eines gemeinsam genutzten Mediums, wie er im Rückkanal von PON-Netzen stattfindet, bringt neben der oben bereits beschriebenen VPI-Umsetzung einige eigene Probleme mit sich, die teils auf der physikalischen und teils auf der Medienzugriffsschicht zu lösen sind.

2.7.2.1 Senden und Empfangen im Burst-Mode-Betrieb

Da in einem PON mit Zeitmultiplex im Rückkanal unterschiedliche Sender nacheinander einzelne Datenblöcke senden, kann die auf Punkt-zu-Punkt-Leitungen häufig verwendete Synchronisierungsmethode anhand der Zellkopf-Fehlersicherung (*Header Error Control, HEC*) [84] nur in der Verteilrichtung, aber nicht in der Rückrichtung eingesetzt werden. Der Empfänger in der LT muß sich innerhalb möglichst kurzer Zeit auf den jeweiligen Sender frisch aufsynchronisieren. Wenn die Datenblöcke einzelne ATM-Zellen sind, wird von einem effizienten System die Synchronisation innerhalb weniger Bits bis weniger Oktetts erwartet. Um dies zu erreichen, wird der Synchronisationsmechanismus des Empfängers mit einem Speicher ausgestattet, der bei jeder neu ankommenden Zelle die zuletzt für den Absender gefundene Amplituden- und Phasenlage als Voreinstellung zur Verfügung stellt. Dazu ist es notwendig, daß in der LT bereits bekannt ist, von welcher Station jeweils die folgende ATM-Zelle erwartet wird. Ansonsten sind länger dauernde Synchronisierphasen vor der eigentlichen Übertragung jeder ATM-Zelle notwendig. Zur Bit-Synchronisation werden moderne Digitalschaltungen eingesetzt, die parallel den optimalen Abtastzeitpunkt für das empfangene Signal suchen können [95, Kap. 3.3].

Gleichzeitig stellt diese Art der Kommunikation auch für die Sender in den ONUs ein Problem dar: Um den Störabstand so groß wie möglich zu machen, müssen alle nicht aktiven optischen Sender abgeschaltet werden. Dadurch werden die in diesen Sendern meist eingesetzten Laser-Dioden in einen nichtlinearen Bereich gebracht, in dem sie eine zusätzliche Anschaltverzögerung in der Größenordnung von 600 ps zeigen, bevor sie nach einer Erhöhung des Stromes wieder optische Leistung abgeben [95, Kap. 3.4]. Dieser Effekt muß zusätzlich durch eine künstliche Verlängerung des ersten gesendeten Bits im Burst-Modus kompensiert werden.

2.7.2.2 Laufzeitausgleich

Zusätzlich zu den oben beschriebenen Maßnahmen zur Synchronisation und zum zeitdiskontinuierlichen Aussenden von Daten muß auch sichergestellt werden, daß die von unterschiedlichen ONUs zur LT übertragenen Datenblöcke am Empfänger nacheinander und ohne Überlagerung eintreffen. Dazu muß – speziell bei Übertragung mit einer großen Schrittgeschwindigkeit und sehr kurzen Pausenzeiten zwischen zwei Datenblöcken – sehr genau bestimmt werden, wann ein von einer ONU ausgesandter Datenblock an der LT ankommt.

In den meisten in der Literatur vorgestellten TDM- oder TDMA-PON-Netzen werden die Zugangsstationen (NT oder ONU) durch spezielle Sendeberechtigungen aufgefordert, eine

ATM-Zelle zur Kopfstation (LT) zu senden. Wenn die Laufzeit zu jeder Zugangsstation und die Reaktionszeit jeder Station dieselbe ist, dann entspricht die Folge der von der LT empfangenen ATM-Zellen genau der Folge der ausgesandten Sendeberechtigungen. Um dieses trotz unterschiedlicher Entfernungen der Zugangsstationen zur LT und damit unterschiedlicher Laufzeiten zwischen Zugangsstationen und LT zu erreichen, wird in den Zugangsstationen zusätzlich eine einstellbare elektronische Verzögerung der Reaktion auf eine Sendeberechtigung vorgesehen. Die Einstellung dieser Verzögerung erfolgt durch die sogenannte *Ranging*-Prozedur, die im folgenden als „Laufzeitausgleich" bezeichnet werden soll. Dabei wird die Rundlaufdauer auf dem Weg von der LT zu jeder Zugangsstation und zurück gemessen. Jeder Zugangsstation wird anschließend mitgeteilt, welche zusätzliche elektronische Verzögerung sie vorzusehen hat, um einen vorgegebenen, für alle Stationen gleichen Wert der Rundlaufdauer zu erreichen. Diese eingestellte Rundlaufdauer 2τ muß mindestens so groß sein wie die größte gemessene Rundlaufdauer $2\tau_0$. Die Funktion dieses Laufzeitausgleiches ist in Abb. 2.26 skizziert. Dabei ist, wie in den folgenden Abbildungen ähnlicher Art, weder die Übertragungsdauer für Dateneinheiten noch die Reaktionszeit der Zugangs- und Kopfstationen eingezeichnet, da beide in den untersuchten Systemen um etwa zwei Größenordnungen geringer sind als die Rundlaufdauer.

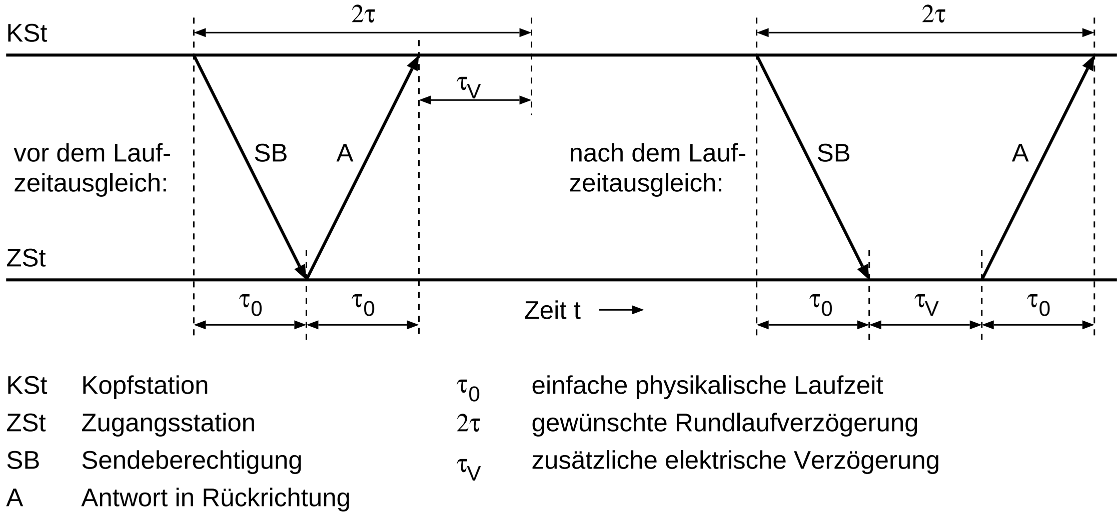


Abb. 2.26: *Einstellung einer vorgegebenen Rundlaufdauer durch Laufzeitausgleich*

Beim Installieren einer neuen Zugangsstation wird zunächst, wie in Abb. 2.26 gezeigt, ein grober Laufzeitausgleich (*coarse ranging*) durchgeführt, so daß die Antworten dieser Station auf Sendeberechtigungen nur noch innerhalb des jeweils vorgesehenen Zeitschlitzes an der Kopfstation ankommen. Während des weiteren Betriebes des Zugangsnetzes wird dann periodisch ein genauerer Laufzeitausgleich (*fine ranging*) durchgeführt, damit die Schwankung der Antwortzeit im Bereich eines Bit-Taktes bleibt. So kann die zur Sicherheit nötige Zeitspanne zwischen der Übertragung zweier ATM-Zellen von verschiedenen Zugangsstationen sehr kurz gewählt werden. Das Prinzip des Laufzeitausgleiches ist bereits in den ersten Arbeiten über PON-Zugangsnetze für B-ISDN [19] beschrieben. Informationen über modernere Techniken für den Laufzeitausgleich sind in [95, Kap. 3.5] und [141] zu finden.

2.7.2.3 Medienzugriff

PON-Zugangsnetze könnten prinzipiell im statischen Wellenlängen- oder Zeitmultiplex betrieben werden. Dabei müßte jeder Zugangsstation eine Wellenlänge oder periodisch ein Zeitschlitz zugeordnet werden. Diese statischen Verfahren machen es jedoch unmöglich, die vorhandene Übertragungsbandbreite im Rückkanal dynamisch zwischen den Zugangsstationen aufzuteilen. Daher werden meist Medienzugriffsprotokolle (*Media Access Control, MAC*) eingesetzt, die den Vielfachzugriff im Zeitmultiplex regeln.

Eine semi-statische Kanalzuteilung auf Verbindungsebene ist die Mindestvoraussetzung für die Funktion eines Zugangsnetzes als Konzentrator. Wenn zusätzlich zum Bündelungsgewinn des Konzentrators auch ein Gewinn durch statistisches Multiplexen erzielt werden soll, dann muß die Kanalzuteilung dynamisch erfolgen und sich auf der Büschel- oder Zellebene den Anforderungen der Zugangsstationen anpassen können. Dezentrale Protokolle, wie sie in lokalen Netzen oft Verwendung finden, können in PONs nicht eingesetzt werden, weil durch die räumliche Ausdehnung des Netzes und die hohe Übertragungsgeschwindigkeit (vgl. Abschnitt 2.7.3.4) die Laufzeit eines Signales von einer angeschlossenen Station zu einer anderen in der Regel um zwei Größenordnungen länger ist als die Dauer der Übertragung einer Dateneinheit (meist eine ATM-Zelle) und weil das Medium keine direkten Verbindungen der angeschlossenen Stationen untereinander unterstützt. Der Einsatz zentraler Medienzugriffsprotokolle (MAC-Protokolle) in ATM-Zugangsnetzen stellt den Inhalt der Untersuchungen in den Kapiteln 4 bis 7 dar.

2.7.2.4 Unterstützung von Schmalbanddiensten

Wenn Schmalband-ISDN-Daten in einem ATM-Netz transportiert werden, setzt sich die Durchlaufzeit für diese Daten aus der Summe der Mindest-Durchlaufzeit, der maximalen Zellverzögerungsschwankungen und der benötigten Paketierungszeit zusammen. Diese Paketierungszeit liegt durch die Größe einer ATM-Zelle und die Übertragungsgeschwindigkeit im N-ISDN fest: Bei 47 Oktetts pro Zelle („circuit emulation“ durch AAL 1 [80, 81], s. auch [95, Abschn. 3.2.2]) und 144 kbit/s auf der Endleitung im N-ISDN ergibt sich eine Verpackungszeit von etwa 2,6 ms für den Transport von zwei B-Kanälen und einem D-Kanal.

Der Einfluß der Zellverzögerungsschwankungen im Zugangsnetz kann vermindert werden, wenn für den Transport von N-ISDN-Daten die entsprechende Zugangsstation periodische Sendeberechtigungen erhält [11]. In diesem Fall muß die Zugangsstation den N-ISDN-Takt für das Endgerät aus dem Fluß der Sendeberechtigungen oder aus dem Takt der von der Kopfstation her empfangenen Zeitschlitze ableiten und an die angeschlossenen Geräte weitergeben. Bei einem asynchronen Betrieb dieses Zuganges würden sonst unvermeidliche Differenzen zwischen der Periode der Sendeberechtigungen und einem nicht synchronisierten, lokal erzeugten ISDN-Takt zu Verlusten oder Leerstellen im ISDN-Datenstrom führen.

Eine Möglichkeit zur Verkürzung der Paketierungszeit und zur Verringerung der Zellverzögerungsschwankungen bei der Integration von N-ISDN in ATM-Zugangsnetze besteht prinzipiell darin, den N-ISDN-Verkehr über separate Mechanismen in eigenen, kürzeren Zeitschlitzen zu übertragen. Da dieselbe Synchronisationspräambel für den Burst-Betrieb benötigt wird wie bei der Übertragung von ATM-Zellen, ist auch diese Form der Integration nur wirtschaftlich, wenn eine große Anzahl von N-ISDN-Signalen von jeder Zugangsstation zu übertragen ist oder wenn mehrere ISDN-Oktetts zusammen übertragen werden, so daß die Präambeln keinen unverhältnismäßig großen Anteil an der benötigten Übertragungskapazität ausmachen.

2.7.3 Definition des untersuchten Referenzsystemes

Den in den folgenden Kapiteln beschriebenen Untersuchungen ist ein ATM-basiertes PON-Zugangsnetz zugrundegelegt. Dabei werden einige Annahmen getroffen, die hier kurz zusammengestellt sind.

2.7.3.1 Topologie

Die Topologie der untersuchten Netze falle in die FTTx-Kategorie. Da ein vermittlungstechnisch transparenter Übergang zwischen optischer und elektrischer Übertragung für die Untersuchung der Medienzugriffsprotokolle nicht relevant ist, werden im folgenden nicht die Begriffe des Netz- und Leitungsabschlusses verwendet, um die beteiligten Stationen zu bezeichnen, sondern es werden Kopf- und Zugangsstation als diejenigen Netzelemente definiert, die die Endpunkte des MAC-Protokolles sind. Dies ist in Abb. 2.27 dargestellt. Es wird von einer zentralen Verwaltung des Medienzugriffs in der Kopfstation ausgegangen.

Bei FTTH-Topologie ist die Zugangsstation identisch mit dem Netzabschluß. Bei FTTC-, FTTB- und FTTCab-Topologie hängt die Zuordnung davon ab, ob das Medienzugriffsproto-

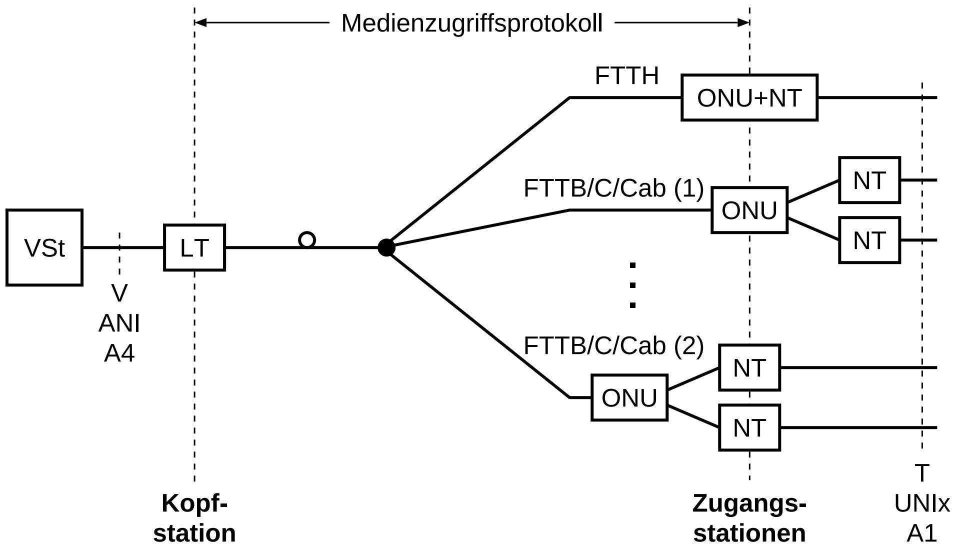


Abb. 2.27: *Definition von Kopf- und Zugangsstation im ATM-PON*

koll in der ONU (Fall (1) in Abb. 2.27) oder in den daran angeschlossenen NTs abgeschlossen wird (Fall (2) in Abb. 2.27). Die Strecken zwischen V-Referenzpunkt und Kopfstation sowie die zwischen Zugangsstation und T-Referenzpunkt werden in die Betrachtung der Leistungsfähigkeit der Medienzugriffsmechanismen nicht mit einbezogen.

2.7.3.2 Laufzeitausgleich

Der Laufzeitausgleich sei bereits erfolgt, so daß die Antwort einer Zugangsstation exakt 2τ nach dem Aussenden der Sendeberechtigung von der Kopfstation empfangen wird. Diese Zeit enthalte auch alle konstanten Verzögerungszeiten durch elektronische Verarbeitung und Übertragung der Daten zwischen Kopf- und Zugangsstation.

Abb. 2.26 zeigt, daß durch den Laufzeitausgleich in der Zugangsstation eine Verzögerung der Reaktion um τ_V erzwungen wird. Wenn mit der Antwort auf eine Sendeberechtigung Informationen über den Zustand der Zugangsstation zur Kopfstation übertragen werden, dann sollen diese Informationen dem Zustand zum Zeitpunkt $\tau_V/2$ nach dem Eintreffen der Sendeberechtigung an der Zugangsstation, also τ nach dem Aussenden der Sendeberechtigung durch die Kopfstation, entsprechen. Dadurch gibt es keinen Unterschied zwischen den Reaktionszeiten in Zugangsstationen mit großem und solchen mit kleinem räumlichem Abstand zur Kopfstation.

2.7.3.3 Rahmenformate

In den folgenden Kapiteln wird – mit der Ausnahme der Diskussion weniger Spezialfälle aus der Literatur – davon ausgegangen, daß ein Zeitschlitz in der Rückrichtung eine ATM-Zelle und die zum Betrieb des Zugangsnetzes nötigen Zusatzinformationen aufnehmen kann. Der Kopf der ATM-Zellen soll, mit Ausnahme der in Abschnitt 2.7.1.2 besprochenen VPI-Umsetzung, nicht verändert werden.

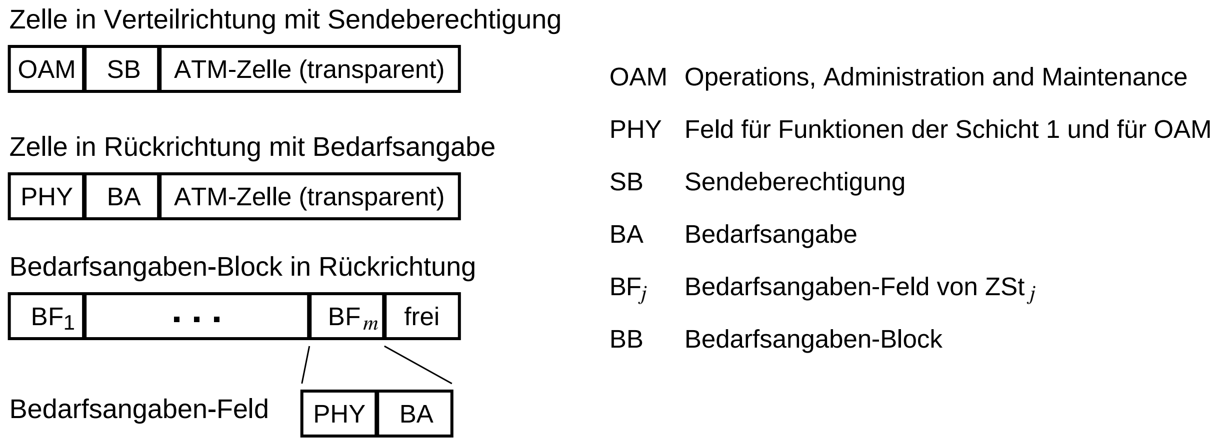


Abb. 2.28: *Zeitschlitze in Verteil- und Rückrichtung*

Abb. 2.28 zeigt den Inhalt der Zeitschlitze in Verteil- und Rückrichtung. Die Zeitschlitztakte in beiden Richtungen sind synchronisiert: eine ganze Zahl von Zeitschlitzen in der Verteilrichtung entspricht einem Zeitschlitz in der Rückrichtung, so daß die Übertragungsgeschwindigkeit in der Verteilrichtung das entsprechende Vielfache der Geschwindigkeit in der Rückrichtung ist. Verhältnisse von 1:1 , 2:1 oder 4:1 sind in PONs üblich.

Vor der eigentlich zu übertragenden ATM-Zelle wird in der Verteilrichtung noch eine Sendeberechtigung für eine Zugangsstation übertragen. Diese Zugangsstation muß dabei nicht dieselbe wie die Zielstation der ATM-Zelle sein. Die Zugangsstationen müssen also jede empfangene Sendeberechtigung auswerten, unabhängig davon, ob die im selben Zeitschlitz empfangene ATM-Zelle auch für sie bestimmt ist. Außerdem besteht die Möglichkeit, noch Informationen zum Betrieb des Zugangsnetzes (*Operations, Administration and Maintenance, OAM*) und zur Einstellung des Laufzeitausgleiches zu übertragen.

In der Rückrichtung muß zur Unterstützung des Burst-Mode-Betriebs der ATM-Zelle eine Synchronisierungspräambel vorangestellt werden. Diese ist in Abb. 2.28 mit „PHY" bezeichnet. In diese Präambel ist auch die nötige Sicherheits-Pausenzeit zwischen zwei Übertragungen unterschiedlicher Stationen in der Rückrichtung eingerechnet. Ein Beispiel für diese Präambel ist in [95, Abschn. 3.2] beschrieben; dort besteht die Präambel aus acht Bittakten Pause und einem Synchronisationsmuster von neun Bittakten. Darauf folgt die

Bedarfsangabe der Zugangsstation mit sieben Bits, so daß mit jeder ATM-Zelle von 53 Oktetts zusätzlich 3 Oktetts übertragen werden müssen. Das in [95] beschriebene BAF-System ist mit dieser sehr kurzen Präambel erfolgreich demonstriert worden, in anderen Systemen werden jedoch wesentlich längere Präambeln eingesetzt.

Die Bedarfsangabe enthält in der Regel in binärer Codierung die aktuelle Anzahl von ATM-Zellen in der Warteschlange der Zugangssstation. Die Funktion der Medienzugriffsprotokolle beruht meist auf der Anzahl der neu an der Zugangsstation angekommenen ATM-Zellen; es ist jedoch aus Gründen der Übertragungssicherheit sinnvoller, die jeweils aktuelle Warteschlangenlänge zu übertragen und anschließend in der Kopfstation daraus die Anzahl der neu angekommenen ATM-Zellen zu berechnen [95, Abschn. 3.6.7]. Der entsprechende Mechanismus ist in Anhang B.1 nach [32] dargestellt.

Anstatt zur Übertragung einer ATM-Zelle kann ein Zeitschlitz in der Rückrichtung auch zur Übertragung der Bedarfsangaben von mehreren Zugangsstationen verwendet werden. Jede Bedarfsangabe wird dazu mit einer Synchronisationspräambel zu einem BA-Feld kombiniert und m solcher BA-Felder werden als BA-Block in einem Zeitschlitz anstelle einer ATM-Zelle mit ihrer Präambel und Bedarfsangabe zur Kopfstation übertragen.

2.7.3.4 Systemparameter

Sofern physikalische Parameter in den Ergebnissen der folgenden Kapitel relevant sind, orientieren sie sich an den üblichen Werten für ATM-PON-Zugangsnetze. Die Ausdehnung des Netzes, also der maximale Abstand einer Zugangsstation von der Kopfstation wird zu 10 km angenommen. Dies entspricht bei einer Lichtgeschwindigkeit von $c_F = 2 \cdot 10^8$m/s (mediengebundene Übertragung) einer einfachen Signallaufzeit von $\tau = 50\,\mu$s. Bei einer Übertragungsgeschwindigkeit von v_K =155,02 Mbit/s in Rückrichtung (Übertragungsgeschwindigkeit eines STM1-Kanales) erhält man für die Dauer eines Zeitschlitzes $t_Z = 2,89 \mu s$, wenn ein Zeitschlitz außer der ATM-Zelle von 53 Oktetts auch noch drei Oktetts für Funktionen der Schichten 1 und 2a enthält. Diese Parameter werden in [95, Abschn. 3.2] für ein PON-Zugangsnetz mit $v_K = 622,08$ Mbit/s in der Rückrichtung angegeben; sie sollten daher bei einem Viertel dieser Übertragungsgeschwindigkeit (155,02 Mbit/s) auf jeden Fall realisierbar sein. Die einfache Laufzeit auf dem Medium entspricht also der Dauer von 17,3 Zeitschlitzen. Um die Betrachtungen zu vereinfachen, wird im folgenden in der Regel von einer einfachen Laufzeit von 18 Zeitschlitzdauern ausgegangen. Damit ist die Rundlaufdauer $2\tau = 36 t_Z$.

Das Zugangsnetz enthalte maximal $n_0 = 128$ Zugangsstationen. Ein Bedarfsangaben-Block kann bei einer Länge eines Bedarfsangaben-Feldes von drei Oktetts maximal $\lfloor 56/3 \rfloor = 18$

Bedarfsangaben-Felder enthalten. Im folgenden wird von $m = 16$ Bedarfsangaben pro Zeitschlitz ausgegangen. (Das in [95] beschriebene BAF-System verlangte aus technologischen Gründen eine Beschränkung auf neun Angaben pro Block.)

2.7.3.5 Bezug zu anderen Architekturen

Die oben genannten Parameter für die im folgenden untersuchten MAC-Protokolle für PONs sind teilweise auch für andere Zugangsnetz-Architekturen typisch, teilweise unterscheiden sich diese aber auch grundlegend von PONs:

SuperPON SuperPONs werden für deutlich größere Distanzen vorgesehen. Daher ist die Signallaufzeit wesentlich größer als in PONs. Außerdem muß von einer größeren Anzahl n von Zugangsstationen pro Kopfstation ausgegangen werden. Die Zahlenverhältnisse sind also von den in den folgenden Kapiteln untersuchten unterschiedlich, aber die Methoden und Ergebnisse lassen sich trotzdem anwenden.

ADSL Da ADSL-Systeme als Punkt-zu-Punkt-Verbindungen betrieben werden, gibt es außer der Ratenanpassung in der Verteilrichtung keine Gemeinsamkeiten mit den hier untersuchten Systemen.

HFC Der Zugriff mehrerer Stationen auf einen gemeinsamen Rückkanal im Zeitmultiplex hat viele Aspekte mit der Situation in PON-Netzen gemeinsam. Die Systeme enthalten aber oft mehrere Rückkanäle mit geringerer Übertragungsgeschwindigkeit, die gemeinsam oder getrennt im Zeitmultiplex zugewiesen werden. Durch die geringere Übertragungsgeschwindigkeit ist die Dauer eines Zeitschlitzes länger. Außerdem trägt die Vorwärts-Fehlerkorrektur (*forward error correction, FEC*) in der Kopfstation wesentlich zur Verlängerung der Laufzeit bei.

HFR Die prinzipiellen Erkenntnisse der Untersuchung von Medienzugriffsprotokollen sind auch auf HFR-Systeme übertragbar. Auch in HFR-Systemen wird, ähnlich wie bei HFC, eine Vorwärts-Fehlerkorrektur eingesetzt, da die Kanal-Bitfehlerrate für eine erfolgreiche Datenübertragung sonst zu hoch wäre, so daß auch deren Verarbeitungszeit in der Laufzeit berücksichtigt werden muß.

Mobilzugang In mobilen ATM-Funkzugangsnetzen sind manche der im folgenden diskutierten Ansätze unerwünscht, weil als zusätzliche Randbedingung die limitierten Energiereserven der Zugangsstationen berücksichtigt werden müssen. Es ist also darauf zu achten, daß nicht alle vorhandenen Zugangsstationen in jedem Zeitschlitz die Sendeberechtigungen decodieren müssen, sondern daß diese gebündelt am Anfang eines größeren Rahmens versendet werden [120].

Kapitel 3

Ziele und Methoden der Leistungsbewertung

Das Ziel der folgenden Untersuchungen ist der Vergleich des Einflusses verschiedener MAC-Protokolle auf den ATM-Verkehr in der Rückrichtung von ATM-Zugangsnetzen. Die Eigenschaften und Grenzen verschiedener Algorithmen und ihrer Bestandteile werden mit verkehrstheoretischer Analyse und ereignisgesteuerter Simulation untersucht und verglichen.

Die verkehrstheoretische Analyse läßt sich meist gut für einfachere, stärker abstrahierte Modelle oder für die Untersuchung von Grundproblemen oder einzelnen Mechanismen innerhalb eines Systems einsetzen. Dadurch können oft direkte mathematische Zusammenhänge zwischen einzelnen Parametern und Kenngrößen eines Systems gefunden werden. Auch eröffnet der Weg der Modellbildung und der Analyse oft tiefere Einblicke in das Verhalten eines Systemes. Andererseits schränken numerische Probleme bei der Auswertung, die Komplexität der Modelle und notwendige Näherungen bei der Modellbildung die Anwendbarkeit der verkehrstheoretischen Analyse ein.

Die Technik der ereignisgesteuerten Simulation dagegen erlaubt anhand einer Modell-Implementierung eines Systemes oder eines Verfahrens in einem Simulationsprogramm prinzipiell auch die Untersuchung sehr komplexer Zusammenhänge. Da jeder Simulationslauf eine Messung am System mit einer bestimmten Parameterkombination darstellt, sind die Einflüsse der unterschiedlichen Parameter meist nicht so direkt zu sehen wie in den Ergebnissen einer verkehrstheoretischen Analyse.

In dieser Arbeit werden beide Verfahren eingesetzt, um die Eigenschaften einzelner Mechanismen von Medienzugriffsprotokollen, aber auch ganzer Zugangsnetz-Systeme zu untersuchen. In Abschnitt 3.1 werden dazu zunächst die betrachteten Kenngrößen der Zugangsnetze beschrieben. Für eine Beschreibung der verwendeten Notation von Zufallsgrößen und der Prinzipien der Simulationstechnik sei auf [100] verwiesen. Als Erweiterung wird hier die Verwendung von Ensemble-Verteilungen in der Analyse (Abschnitt 3.2) und deren Messung in der Simulation periodischer Systeme (Abschnitt 3.3.2) sowie die Messung von Quantilen und die Bestimmung von Vertrauensintervallen für Quantile (Abschnitt 3.3.3) beschrieben.

3.1 Leistungsgrößen für ATM-Zugangsnetze

3.1.1 Ausgangsverkehr

Der Verkehr, der von einem ATM-Zugangsnetz in der Rückrichtung übertragen wird, wird normalerweise einem ATM-Weitverkehrsnetz als Eingangsverkehr angeboten. In der ATM-Technik ist es üblich, für einen solchen Eingangsverkehr Verkehrsparameter wie die maximale und die mittlere Zellrate in einem Verkehrsvertrag (*traffic contract*) so festzulegen, daß sie mit einem Verfahren der Quellflußkontrolle sowohl zwischen Benutzer und Netz (*Usage Parameter Control, UPC*) als auch zwischen Netzen (*Network Parameter Control, NPC*) überprüft werden können. Dafür ist das Verfahren des GCRA (*Generic Cell Rate Algorithm*) standardisiert [82, 18]. Aus der Sicht eines Netzbetreibers soll ein Zugangsnetz daher einen Eingangsverkehr, der an der Zugangsstation noch dem Verkehrsvertrag entspricht, auch so an das Weitverkehrsnetz abgeben, daß er weiterhin dem Verkehrsvertrag entspricht.

Um dies zu beurteilen, kann in einer Simulation der Ausgangsverkehr des Zugangsnetzes von einer Quellflußkontrollinstanz überprüft werden, wobei das Ergebnis die Häufigkeit der Verletzung des Verkehrsvertrages für einen gegebenen Parametersatz der Quellflußkontrollparameter ist. Alternativ dazu kann auch die Verteilung der Abstände oder die im nächsten Abschnitt erwähnte Zellverzögerungsschwankung der zu einem Zellstrom gehörenden Zellen in der Rückrichtung an der Kopfstation bestimmt werden.

3.1.2 Zellverzögerungsschwankung

In den Standards der ITU und des ATM-Forums [79, 18] wird die Zellverzögerungsschwankung (*cell delay variation, CDV*) neben der Verlusthäufigkeit als ein Maß für die Dienstgüte (*Quality of Service, QoS*) des Übermittlungsdienstes in einem ATM-Netz definiert. Für die CDV gibt es zwei unterschiedliche Definitionen, je nachdem, ob an einem Punkt im Netz oder zwischen zwei Punkten gemessen wird.

Die Messung zwischen zwei Punkten liefert eine genaue Aussage über die Durchlaufzeit jeder ATM-Zelle durch ein betrachtetes Netz und deren Schwankungen, aber es wird gleichzeitig der physikalische Zugang zum Netz an den beiden Meßpunkten benötigt. Die Zweipunkt-CDV erhält man durch Subtraktion eines konstanten Wertes – sinnvollerweise der Mindest-Durchlaufzeit zwischen den beiden Meßpunkten – von der Durchlaufzeit.

Die Einpunkt-Messung erlaubt dagegen nur die Messung der Durchlaufzeitschwankungen bei bekannter Quellenperiode, es wird aber auch nur ein Meßpunkt benötigt und Korrelationen aufeinanderfolgender Durchlaufzeiten werden teilweise mit berücksichtigt. Für die Einpunkt-CDV einer Verbindung an einer Stelle im Netz wird angenommen, daß in die betrachtete Verbindung ursprünglich ATM-Zellen mit einer konstanten und am Meßpunkt bekannten Zellrate eingespeist wurden. Am Meßpunkt wird nun ein dem GCRA ähnlicher Algorithmus verwendet, um die Abweichung jedes Zellankunftszeitpunktes von einem sich selbst auf die Ankunftsfolge synchronisierenden Takt zu bestimmen. Eine genauere Beschreibung der Analysemöglichkeiten und eines entsprechenden Statistikmodules für die Simulationsbibliothek findet sich in [93].

Im folgenden wird meist die Zweipunkt-CDV in Form der Durchlaufzeitverteilung und nur in Einzelfällen die Einpunkt-CDV als Vergleichsgröße verwendet.

3.1.3 Fairneß

Die Gleichbehandlung des Verkehrs von verschiedenen Stationen ist ein wichtiger Aspekt in lokalen Datennetzen. In öffentlichen Telekommunikationsnetzen wird dagegen meist nur verlangt, daß der Übermittlungsdienst des Netzes eine gewisse Dienstgüte bereitstellt und einhält. Zusätzlich wird vom Netzbetreiber eine große Effizienz gefordert, die normalerweise nur dann erreichbar ist, wenn alle Stationen ungefähr dieselbe Dienstgüte erfahren. In ATM-Zugangsnetzen mit gemeinsamem Medium wird daher sowohl auf die Gleichbehandlung aller Stationen, als auch auf die Einhaltung der Dienstgütekriterien großer Wert gelegt. Die Gleichbehandlung kann allerdings aus verschiedenen Gesichtspunkten bewertet werden:
Durchsatzbasierte Kriterien verlangen, daß alle Stationen denselben Datendurchsatz, einen Durchsatz proportional zu ihrem Verkehrsangebot oder einen Durchsatz proportional zu einer reservierten Bandbreite erzielen können.
QoS-basierte Kriterien verlangen, daß die ATM-Zellen von allen Stationen dieselbe mittlere Verzögerungszeit oder dasselbe CDV-Quantil erfahren.
Ähnliche Parameter des Eingangsverkehrs zweier Zugangsstationen sollten zu einer vergleichbaren Behandlung durch das System führen. Ohne daß diese Forderung explizit gestellt wird, ist sie doch oft Bestandteil der Erwartungen an Fairneß. Durch teilweise deter-

ministische Zyklen im Systemverhalten kommt gerade diesem Aspekt bei den betrachteten Protokollen eine besondere Bedeutung zu: Obwohl Zugangsstationen mit exakt demselben Eingangsverkehr gleich behandelt werden, können kleine Abweichungen in den Verkehrsparametern in nicht-monotoner Weise zu Unterschieden in der Durchlaufzeit der ATM-Zellen durch das Zugangsnetz führen [140].

Im Umfeld heterogener Verbindungstypen sind diese Kriterien teilweise auf Vergleiche innerhalb desselben Verbindungstyps zu beschränken. Dennoch muß bei einem Fairneß-Vergleich zunächst festgelegt werden, nach welchem Kriterium die Behandlung der unterschiedlichen Stationen oder Verbindungen fair sein soll.

3.2 Verkehrstheoretische Analyse

3.2.1 Grundlagen und Notation

Die in den folgenden Kapiteln verwendete Notation für Zufallsvariablen und Größen der Wahrscheinlichkeitstheorie lehnt sich an die in [100] verwendete an. Eine Zufallsvariable wird mit einem Großbuchstaben, beispielsweise X oder T bezeichnet. Die Variable für mögliche Realisierungen dieser Zufallsvariable wird dann mit dem entsprechenden Kleinbuchstaben, also x oder t bezeichnet.

Das Maß $\mathrm{P}\{A\}$ bezeichnet die Wahrscheinlichkeit dafür, daß das Ereignis A eintritt. Die Verteilungsfunktion (VF) F für eine Zufallsvariable (ZV) wird mit dem Namen der Zufallsvariable indiziert:

$$F_T(t) = \mathrm{P}\{T \le t\} \tag{3.1}$$

Die Verteilungsdichtefunktion (VDF) f ist die erste Ableitung der Verteilungsfunktion:

$$f_T(t) = \frac{\mathrm{d}F_T(t)}{\mathrm{d}t} \tag{3.2}$$

Die komplementäre Verteilungsfunktion F^C (*complementary distribution function, CDF*) ist entsprechend:

$$F_T^C(t) = 1 - F_T(t) = \mathrm{P}\{T > t\} \tag{3.3}$$

Die Laplace-Stieltjes-Transformierte (LST) der Verteilungsfunktion oder die Laplace-Transformierte (LT) der Verteilungsdichtefunktion wird mit $\Phi(s)$ bezeichnet und mit dem Namen der Zufallsvariable indiziert:

$$\Phi_T(s) = \int_{t=0}^{\infty} \mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}F_T(t) = \int_{t=0}^{\infty} f_T(t)\mathrm{e}^{-st}\mathrm{d}t = \mathrm{E}\left[\mathrm{e}^{-sT}\right] \quad \text{für } \mathrm{Re}(s) \ge 0 \tag{3.4}$$

Die Korrespondenz über die Laplace-Transformation soll mit dem Zeichen $\circ\!\!-\!\!\bullet$ bezeichnet werden:

$$f_T(t) \circ\!\!-\!\!\bullet \Phi_T(s) \tag{3.5}$$

Die Verteilung einer diskreten Zufallsvariablen X mit den natürlichen Zahlen (einschließlich Null) als Wertebereich wird mit p_X bezeichnet:

$$p_X(x) = \mathrm{P}\{X = x\} \tag{3.6}$$

Die Erzeugende Funktion dieser Verteilung ist definiert als

$$G_X(z) = \sum_{x=0}^{\infty} p_X(x) z^x = \mathrm{E}\left[z^X\right] \tag{3.7}$$

Für die Berechnung des Erwartungswertes $\mathrm{E}[X]$, der Varianz $\mathrm{VAR}[X]$ oder anderer Eigenschaften der Erzeugenden Funktion und der Laplace(-Stieltjes)-Transformierten sei auf die Literatur verwiesen [102, 100, 142].

Bei der Betrachtung periodischer Systeme treten oft abschnittsweise definierte Funktionen auf, die sich mit der Indexfunktion $\mathbf{1}\{A\}$ besonders leicht darstellen lassen.

$$\mathbf{1}\{A\} = \begin{cases} 1 & \text{wenn } A \text{ zutrifft} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \tag{3.8}$$

Mit Hilfe dieser Indexfunktion läßt sich die kontinuierliche Gleichverteilung einer ZV T über einem Intervall von a bis b leicht als VDF darstellen:

$$f_T(t) = \frac{1}{b-a} \mathbf{1}\{t \in [a, b)\} \tag{3.9}$$

Mit der in der Literatur häufiger verwendeten Sprungfunktion $\sigma(t)$ würde sich diese Gleichverteilung folgendermaßen darstellen:

$$f_T(t) = \frac{1}{b-a} \left(\sigma(t-a) - \sigma(t-b)\right) \tag{3.10}$$

Die Laplace-Transformierte dieser Verteilungsdichtefunktion ist

$$\Phi_T(s) = \frac{1}{(b-a)s} \left(\mathrm{e}^{-as} - \mathrm{e}^{-bs}\right) \tag{3.11}$$

Für den im folgenden häufig vorkommenden Fall der Gleichverteilung zwischen 0 und h_D wird die LT $\Psi_D(s)$ definiert:

$$f_D(t) = \frac{1}{h_D} \mathbf{1}\{t \in [0, h_D)\} \circ\!\!-\!\!\bullet \Psi_D(s) = \frac{1}{h_D s} \left(1 - \mathrm{e}^{-h_D s}\right) \tag{3.12}$$

3.2.2 Zeitreihen- und Ensemblestatistik

Stammt die betrachtete Zufallsvariable aus einem stochastischen Prozeß, dann ist grundsätzlich zwischen der Betrachtung der Zeitreihe – also Proben aus demselben Prozeß zu unterschiedlichen Zeitpunkten – und der Betrachtung des Ensembles – also Proben aus unterschiedlichen stochastischen Prozessen mit denselben Parametern – zu unterscheiden. Abb. 3.1 soll diese unterschiedlichen Betrachtungsweisen für einen einfachen Warteprozeß in einem System mit periodischen Ankünften verdeutlichen.

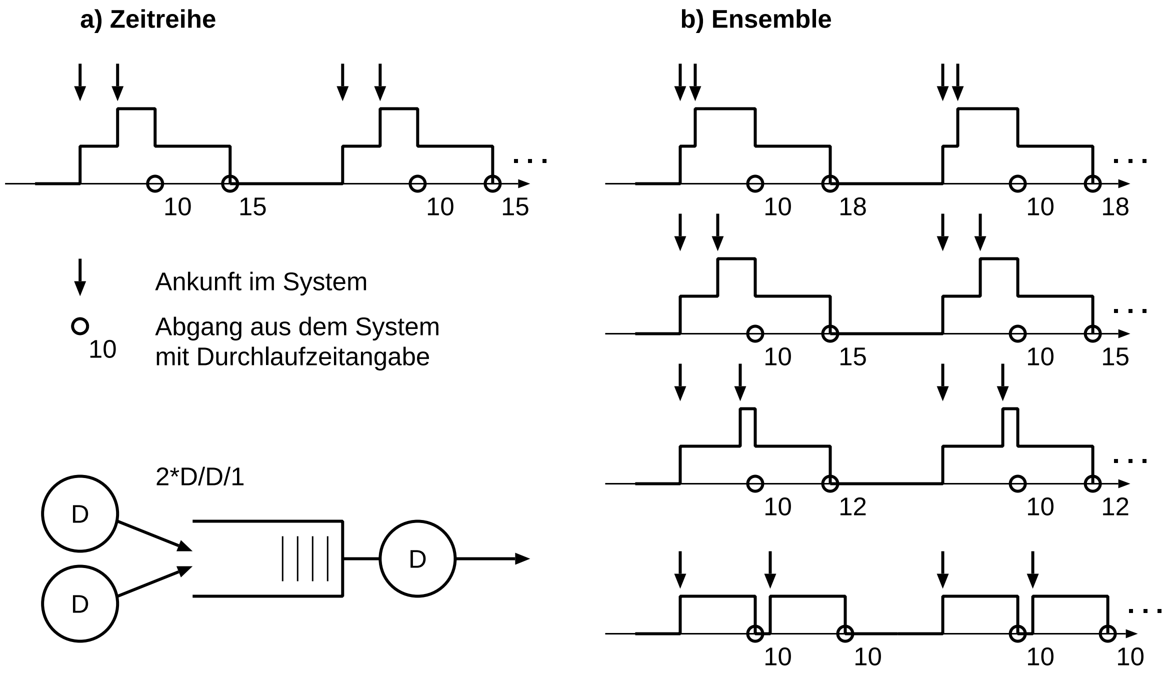


Abb. 3.1: *Zeitreihen- und Ensemblebetrachtung eines stochastischen Prozesses*

Der dargestellte Systemzustand zeigt die Anzahl der Anforderungen in diesem sogenannten 2*D/D/1-System zu jedem Zeitpunkt. Der betrachtete stochastische Prozeß sei die Abfolge der im System beobachteten Durchlaufzeiten. Jede Zeitreihe dieses stochastischen Prozesses ist in diesem Fall eine periodisch wiederkehrende Folge von Durchlaufzeiten (10,15,10,15,... in Abb. 3.1 a). Abb. 3.1 b zeigt, daß für unterschiedliche Phasenbeziehungen im Ankunftsprozeß jeweils andere Zeitreihen entstehen. Eine Ensemble-Verteilung bezieht nun außer den Werten einer Zeitreihe auch die Werte aller anderen Zeitreihen im Ensemble der Prozesse ein.

Solche Ensemble-Verteilungen werden in [131, 130] zur Analyse von N*D/D/1-Systemen verwendet, um nicht nur eine Aussage über die Eigenschaften eines Systems bei einem bestimmten Verhältnis der Phasenlagen zu bekommen (dies führte in einem N*D/D/1-System zu einer diskreten Verteilung), sondern um eine Verteilung der Durchlaufzeiten zu erhalten, wie sie auf alle möglichen periodischen Ankunftsströme unter allen möglichen Phasenbeziehungen wirken.

Wenn sich das betrachtete System dagegen nicht periodisch verhält, reichen üblicherweise die in den Ankunfts- oder Bedienprozessen enthaltenen stochastischen Komponenten aus, um bereits in einer Zeitreihe alle möglichen Phasenbeziehungen zwischen den Ankunftsprozessen sowie zwischen Ankunfts- und Bedienprozessen zu durchlaufen, so daß eine normale Zeitreihen-Verteilung stellvertretend für alle Mitglieder des Prozeß-Ensembles ausgewertet werden kann.

3.2.3 Virtuelle Wartezeit

Das Konzept der Virtuellen Wartezeit bzw. der Restarbeit im System geht auf die Untersuchungen von Beneš [21] zurück. Die Restarbeit beschreibt die Summe der Bedienzeiten aller wartenden Anforderungen und der Restbedienzeit der gerade bedienten Anforderung in einem Bediensystem mit einer Warteschlange und einer Bedieneinheit, wobei Anforderungen der Warteschlange in der Reihenfolge ihrer Ankunft entnommen werden (*First In First Out, FIFO*). Diese Restarbeit entspricht zu jedem Zeitpunkt der Wartezeit, die eine neue Anforderung erfahren würde, wenn sie zu diesem Zeitpunkt im System ankäme. Daher wird die Restarbeit auch als Virtuelle Wartezeit bezeichnet. Vor allem bei der Untersuchung deterministischer Systeme wird die Verteilung der Virtuellen Wartezeit zur Bestimmung der Wartezeitverteilung verwendet [130].

Die Zufallsvariable für die Virtuelle Wartezeit zum Zeitpunkt t soll hier mit $V(t)$ bezeichnet werden. Ihre Verteilungsdichtefunktion ist entsprechend $f_V(t)$.

3.3 Simulation

Die Grundlagen der in den folgenden Kapiteln zur Leistungsuntersuchung eingesetzten ereignisgesteuerten Simulation sind in [100] und [103] gut beschrieben. Hier soll im wesentlichen auf Erweiterungen des Konzeptes zur Simulation periodischer Systeme eingegangen werden.

3.3.1 Erfassung von Ensemble-Statistiken

In einem System mit mehreren Quellen können Messungen wie die Verteilung der Durchlaufzeit für Zellen einer Quelle als Ensemble-Statistik erfaßt werden, wenn alle Quellen dieselbe

Verkehrscharakteristik besitzen und die gleiche Behandlung durch das System erfahren. Dadurch konvergiert die gemessene gemeinsame Verteilung während der Simulation wesentlich schneller als bei der Messung an einer einzelnen Referenzquelle.

Diese gemeinsame Erfassung der Statistik vereinigt in jedem Fall die Ergebnisse aus dem Ensemble aller Quellen des betrachteten Systemes. Wenn im gesamten System keine festen Phasenbeziehungen auftreten, entsprechen die so gewonnenen Ergebnisse denen des Ensembles aller möglichen Prozesse. Gibt es dagegen feste Phasenbeziehungen, dann müssen zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden, um diese zu brechen oder auf anderen Wegen das Ensemble aller Prozesse zu simulieren. Drei Verfahren hierzu werden im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.2 Untersuchung periodischer Systeme

In der ereignisgesteuerten Simulationstechnik wird davon ausgegangen, daß durch die stochastischen Ankunfts-, Bedien- und Entscheidungsprozesse, die im simulierten System enthalten sind, alle Zeitbeziehungen zwischen verschiedenen Prozessen durchlaufen werden. Wenn nun periodische Systeme mit der klassischen ereignisgesteuerten Simulationstechnik simuliert werden, dann durchläuft die Simulation wiederholt dieselbe Phasenbeziehung. Die Ergebnisse liegen dann bereits nach einer simulierten Periode des Systems fest und verändern sich auch mit zunehmender Simulationsdauer nicht mehr. Vertrauensintervalle, die aus dem Vergleich einzelner unabhängiger Teiltest-Ergebnisse gewonnen werden [103], spiegeln hier stabile Ergebnisse vor, da die Grundannahme – die Unabhängigkeit der Teiltest-Ergebnisse – durch den deterministischen Ablauf der Simulation über die Teiltest-Grenzen hinweg nicht gegeben ist. In den folgenden Abschnitten werden drei Verfahren diskutiert und verglichen, die eine simulative Untersuchung periodischer Systeme ermöglichen.

3.3.2.1 Simulation einzelner Perioden in Elementartests

Einfache periodische Systeme mit bekannter Periode können durch eine Veränderung der Simulationssteuerung (Definition s. [96]) simuliert werden. Anstelle der Abfolge von einer Warmlaufphase und mehreren Teiltests tritt eine Folge von Warmlaufphasen und Elementartests (ET), die zu Teiltests zusammengefaßt werden.

Die Zerlegung jedes Teiltests in viele Elementartests mit eigenen Warmlaufphasen wird in Abb. 3.2 veranschaulicht. Anstelle der Weiterverwendung des Endzustands nach einem Teiltest als Initialzustand des folgenden Teiltests (a) wird bei der Simulation einzelner Perioden

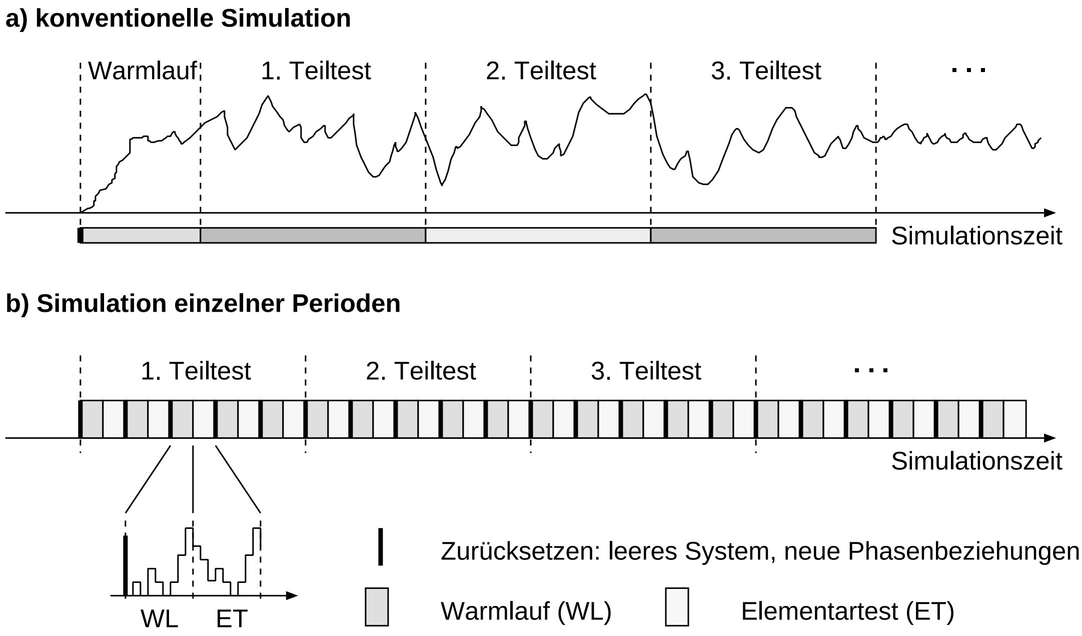


Abb. 3.2: *Simulation periodischer Systeme durch Elementartests: a) konventionelle Simulationstechnik für nicht periodische Systeme, b) Verwendung von Elementartests*

das System immer nur für eine Periode in einem Elementartest simuliert. Vor jedem ET wird das System zurückgesetzt (das System wird geleert und es wird eine neue Phasenbeziehung der Quellen zufällig gewählt) und für die Dauer einer Periode ohne Messung in einem Warmlauf (WL) simuliert. Das Teiltest-Ergebnis ist damit das Mittel der Elementartest-Ergebnisse, die jeweils durch die Simulation unterschiedlicher Phasenbeziehungen gewonnen wurden.

Dieses Verfahren zur simulativen Untersuchung periodischer Systeme ist besonders für einfache Systeme geeignet, in denen alle Prozesse und Vorgänge dieselbe Periodendauer haben. Im Falle unterschiedlicher Periodendauern ist die gesamte Systemperiode das kleinste gemeinsame Vielfache[1] der einzelnen Periodendauern, so daß sich mit jeder weiteren Teilperiode im System die Dauer eines Elementartests und damit auch die Simulationsdauer erheblich verlängert. Außerdem ist die Periode des Gesamtsystems in komplexen Systemen nicht immer leicht zu bestimmen.

[1]Das kleinste gemeinsame Vielfache (kgV) kann für gebrochenrationale Maßzahlen der Periodendauern folgendermaßen bestimmt werden: Alle Periodendauern werden zunächst auf einen gemeinsamen Nenner gebracht. Dann ergibt der Quotient aus dem kgV der Zähler und dem gemeinsamen Nenner die gemeinsame Systemperiode.

3.3.2.2 Frequenzversatzverfahren

Eine Alternative zur Simulation einzelner Perioden in Elementartests stellt das Frequenzversatzverfahren [139] dar. Hier wird ein periodisches deterministisches System durch ein anderes System simuliert, das eine wesentlich längere Periodendauer besitzt, so daß während der gesamten Simulation maximal eine Periode durchlaufen wird. Dies wird durch kleine Änderungen der Perioden der einzelnen beteiligten Prozesse erreicht.

Beispielsweise kann ein Multiplexer mit neun periodischen Quellen, die alle eine Periode von $d_Q = 1000$ Zeitschlitzen besitzen, simuliert werden, indem die Quellenperioden zwischen 996 und 1004 Zeitschlitzen verteilt werden. Wenn der Multiplexer eine Bediendauer von einem Zeitschlitz besitzt, verlängert sich dadurch die Systemperiode von 10^3 Zeitschlitzen auf etwa 10^{27} Zeitschlitze, wodurch 10^{24} verschiedene Phasenbeziehungen simuliert werden können.

Der Nachteil dieser Frequenzversatzmethode besteht darin, daß die Simulation sehr aufwendig zu konfigurieren ist, da jede Quelle ihre eigenen Parameter besitzt. Außerdem können die statistischen Ergebnisse der einzelnen Quellen nur dann zu einer Ensemble-Statistik zusammengefaßt werden, wenn die Unterschiede in den Quellparametern keinen signifikanten Unterschied in der gemessenen Größe bewirken, sonst muß für dieselbe Anzahl von Meßwerten wesentlich länger simuliert werden als wenn die Ergebnisse aller Quellen zusammengefaßt werden könnten. Gerade in periodischen Systemen können jedoch kleine Unterschiede in den Quellparametern zu deutlichen Unterschieden im Gesamtergebnis führen [140], so daß ein Zusammenfassen oft ausgeschlossen ist.

3.3.2.3 Phasensprungverfahren

Die Vorteile des Frequenzversatzverfahrens (keine Änderung an der Simulationssteuerung) können mit denen der Simulation einzelner Perioden in Elementartests (Ensemble-Statistik und dadurch effizientere Simulation) verbunden werden. Dazu wird, durch einen stochastischen Prozeß gesteuert, an zufälligen Zeitpunkten die Phasenlage einer Quelle leicht um einen kleinen, zufälligen Wert verändert. Diese Methode ist in Abb. 3.3 im Vergleich zum Frequenzversatzverfahren skizziert.

Dadurch, daß alle Quellen dieselben stochastischen Eigenschaften besitzen, können die Meßergebnisse in einer Ensemble-Statistik kombiniert werden. Die Eigenschaften des simulierten Systems müssen nur in die Bemessung des Abstandes von Phasensprüngen einbezogen werden, aber nicht exakt in die Simulationssteuerung eingehen, wie es bei der Elementartestmethode der Fall ist. Gleichzeitig findet durch die Phasensprünge eine Dekorrelation

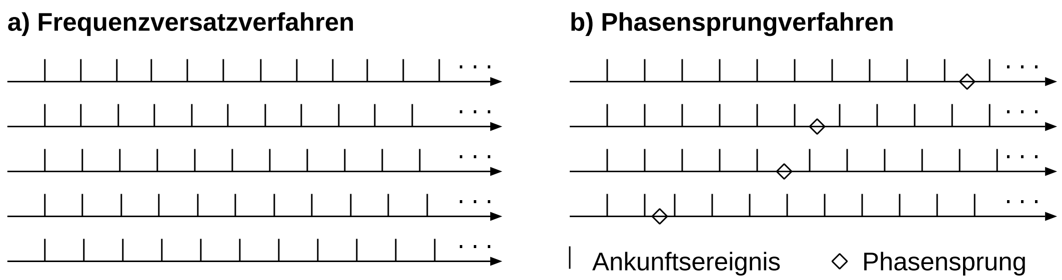


Abb. 3.3: *Simulation periodischer Systeme durch Veränderung der Quellen: Ankunftsereignisse an unterschiedlichen Quellen im a) Frequenzversatz-, b) Phasensprungverfahren*

der Ankunftsprozesse von systeminternen Perioden (beispielsweise einer periodischen Bedienung) statt, so daß eine wirkliche Ensemble-Statistik gewonnen werden kann.

Um das Verfahren zu perfektionieren, kann die statistische Erfassung der jeweils direkt nach einem Phasenwechsel aufgenommenen Meßwerte ausgesetzt werden, oder es kann ein Referenz-Ankunftsprozeß von den Phasenwechseln ausgeschlossen werden. Der erste Punkt muß beispielsweise bei der Messung von Abgangsabständen oder bei Einpunkt-CDV-Messungen berücksichtigt werden. Die Verwendung eines Referenz-Ankunftsprozesses ist in diesem Fall aus simulationstechnischer Sicht die einfachere Alternative. Dabei gehen allerdings die Vorteile der Dekorrelation und der effizienten Erfassung der Statistik aus dem Ensemble aller Verkehrsströme verloren.

3.3.2.4 Vergleich der Verfahren

Abb. 3.4 zeigt die gemessene Verteilungsdichte des Ensembles in einem in der Bedienung getakteten N*D/C/1-Wartesystem (vgl. Anhang A.1). Dabei wurde die Taktzeit – also die Dauer eines Zeitschlitzes – zu einer Zeiteinheit gewählt. Die Periodendauer der zehn Quellen beträgt 200/19 Zeitschlitze, so daß ein Angebot von 95% vorliegt. Die Verteilungsdichte wurde als Verteilung in 400 Klassen (40 Klassen pro Zeitschlitz) über 10 Teiltests mit jeweils $2 \cdot 10^6$ Anforderungen gemessen.

Für das Frequenzversatzverfahren wurden den Quellen Periodendauern von 10,3263–10,7763 Zeitschlitzen gegeben. Zur Messung der Verteilungsdichte der Wartezeit wurden nur die Ergebnisse der Quelle mit $200/19 \approx 10,5263$ Zeitschlitzen ausgewertet. Im Phasensprungverfahren wurde nach im Mittel 20 Anforderungen einer Quelle (geometrisch verteilt) eine Phasenpause von 0–10% der Quellenperiode[2] (gleichverteilt) eingefügt.

[2]Das Angebot wird hierdurch geringfügig um 0,25% des Nennwertes verringert. Andererseits werden so künstliche Überlastsituationen vermieden, die durch entsprechend verkürzte Phasen entstehen könnten.

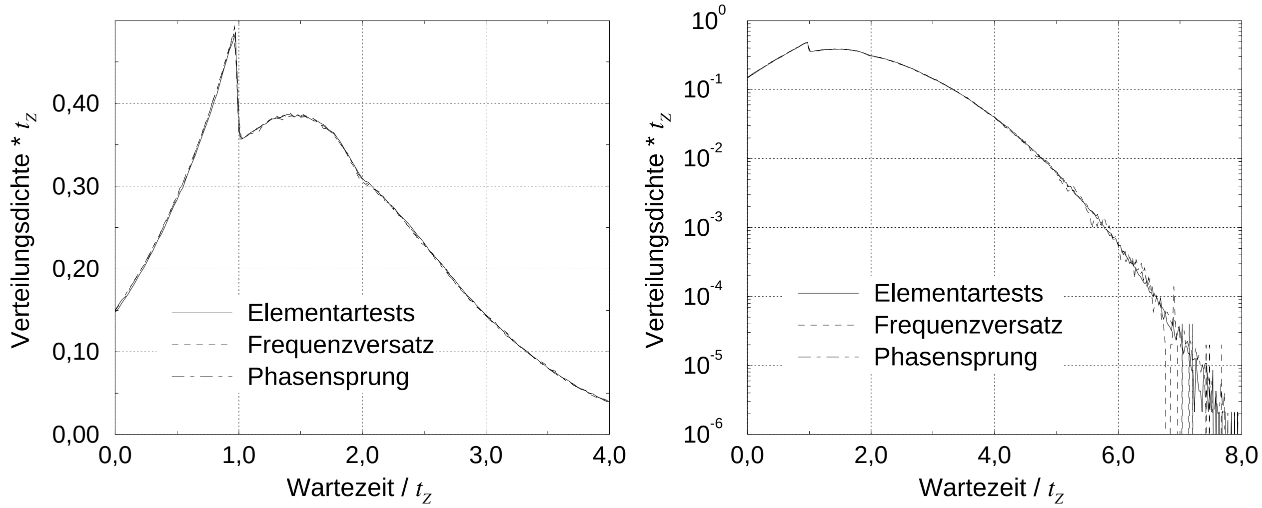


Abb. 3.4: *Vergleich der gemessenen Wartezeitverteilungen in einem in der Bedienung getakteten N*D/D/1-System mit 10 Quellen und einem Angebot von 95%. Links: linearer Maßstab. Rechts: logarithmischer Maßstab.*

Durch die zusätzlich nötigen Warmlauf-Phasen vor den Elementartests verdoppelt sich bei der Elementartest-Methode die Laufzeit des Simulationsprogrammes[3] im Vergleich zum Phasensprungverfahren.

Abb. 3.4 belegt deutlich, daß die Meßergebnisse für die Verteilungsdichte der Wartezeit der drei Simulationsverfahren weder im linearen noch im logarithmischen Maßstab signifikant unterscheidbar sind. Lediglich im Bereich sehr großer Wartezeiten zeigt sich der Nachteil des Frequenzversatzverfahrens, daß nur ein Zehntel aller Meßwerte für die Statistik herangezogen werden kann, weil die Quellenparameter keine Erfassung im Ensemble erlauben. Alle drei gemessenen Verteilungsdichten stimmen sehr gut mit der in Abschnitt A.1 hergeleiteten Verteilung überein.

Die fehlende automatische Dekorrelation des Frequenzversatzverfahrens ist in Abb. 3.5 illustriert: Die Referenzquelle hat hier mit einer Periode von 12,5 Zeitschlitzen eine feste Phasenbeziehung zu den im Zeitschlitztakt ablaufenden Bedienvorgängen, so daß sich eine diskrete Verteilung der Wartezeiten ergibt, die aufgrund des Meßverfahrens abhängig von der verwendeten Klassenbreite in Form einzelner Verteilungsdichtespitzen sichtbar ist. Um solche Effekte zu vermeiden, muß beim Einsatz des Frequenzversatzverfahrens darauf geachtet werden, daß die Quellen keine gemeinsame Periode mit anderen Vorgängen im System haben. Die Ergebnisse in Abb. 3.4 zeigen diesen Effekt nicht, weil in der Simulation eine Quellenperiode von 10,5263 Zeitschlitzen anstelle des rationalen Verhältnisses von 200/19 Zeitschlitzen eingesetzt wurde.

[3]Auf einer Workstation HP 9000 C160 unter HP-UX 10.20 mit HP-Pascal 10 liegt die Simulationsdauer für dieses Modell bei etwa 12μs pro Ankunft.

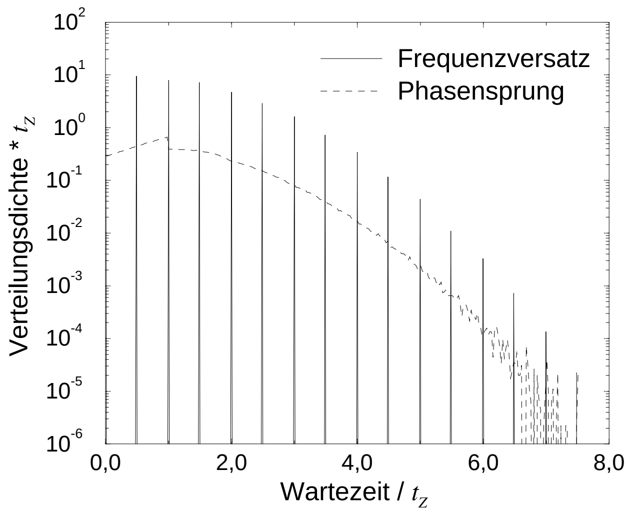


Abb. 3.5: *Vergleich der gemessenen Wartezeitverteilungen in einem in der Bedienung getakteten N*D/D/1-System mit 10 Quellen und einem Angebot von 80%.*

Die in den folgenden Kapiteln dargestellten Ergebnisse wurden, soweit nicht anders vermerkt, als Ensemble-Verteilungen mit dem Phasensprungverfahren ermittelt.

3.3.3 Erfassung von Quantilen

Beim Vergleich der Durchlaufzeiten oder Zellverzögerungsschwankungen verschiedener Systeme reicht, wie in Abschnitt 3.1 diskutiert, die Betrachtung des Mittelwertes oder der Varianz nicht aus. Genauere Aussagen über die für Echtzeitdienste kritische Häufigkeit sehr großer Durchlaufzeiten oder Verzögerungsschwankungen liefert nur die entsprechende Verteilungsfunktion. Um bei Parameterstudien nicht die ganze Verteilungsfunktion einer Größe vergleichen zu müssen, werden oft ihre Quantile verglichen.

Definition

Das Quantil x_p zur Wahrscheinlichkeit p_Q wird durch die Umkehrung der Verteilungsfunktion $F_X(x_p) = p_Q$ berechnet. Es ist dasjenige x_p, für das gilt:

$$\mathrm{P}\{X \leq x_p\} = p_Q \tag{3.13}$$

Messung von Quantilen

In der Simulation können Quantile mit verschiedenen Verfahren gemessen werden. Allen Verfahren ist gemeinsam, daß, ähnlich wie bei der Messung von Verlusthäufigkeiten, das entsprechende Randereignis ($X > x_p$ bei $p_Q > 0,5$ beziehungsweise $X < x_p$ bei $p_Q < 0,5$) genügend häufig auftreten muß. Üblicherweise werden 10 bis 100 Randereignisse simuliert;

dies bedeutet, daß für die Messung eines (1-10^{-5})-Quantils 10^6 bis 10^7 Stichproben herangezogen werden müssen. Die in Kapitel 5 dargestellten Quantile wurden aus Simulationen mit jeweils 10^7 Zellen gewonnen.

Bei der *Sortiermethode* zur Quantilenbestimmung werden in der Simulation die n_Q größten ($p_Q > 0,5$) oder kleinsten ($p_Q < 0,5$) Werte in eine sortierte Liste eingetragen. Nach dem Ende des Simulationslaufes wird der Wert als Quantil ausgegeben, dessen Position in der Liste der durch p_Q oder $1 - p_Q$ gegebenen relativen Häufigkeit $n_Q = \lfloor p_Q n_M \rfloor$ oder in der umgekehrten Liste $n'_Q = \lfloor (1 - p_Q) n_M \rfloor$ entspricht. Um die Sortiermethode anwenden zu können, sollte eine obere Schranke für die Anzahl n_M von Meßwerten bekannt sein, da die Listengröße dann durch etwas mehr als $n_Q = \lceil p_Q \cdot n_M \rceil$ beziehungsweise $n_Q = \lceil (1 - p_Q) \cdot n_M \rceil$ begrenzt werden kann. Die Weiterführung der Liste ist nötig, wenn nach dem unten beschriebenen Verfahren ein Vertrauensintervall für das Quantil bestimmt werden soll. Die Liste braucht dann b beziehungsweise $n_M - a$ Plätze (3.14). Wählt man die Listengröße jedoch zu groß, dann dauert das Einsortieren jedes Meßwertes zu lange, was sich in der Laufzeit des Simulationsprogrammes niederschlägt.

Um den in der Sortiermethode vorhandenen Sortieraufwand zu verringern und gleichzeitig unabhängig von der tatsächlichen Anzahl von Meßwerten zu werden, haben Jain und Chlamtac eine *Stützpunktmethode* (*P^2 Algorithm*) vorgeschlagen [89]. Dabei werden anstelle der vollständigen Liste der n_Q größten oder kleinsten Meßwerte nur fünf Stützpunkte der empirischen Verteilung der Meßwerte gespeichert und mit jedem neuen Meßwert nachgeführt. Je ein Stützpunkt dient zum Speichern des größten und des kleinsten aufgetretenen Meßwertes und ein Stützpunkt wird der Stelle des Quantils entsprechend der gewünschten relativen Häufigkeit p_Q nachgeführt. Zwischen diesen drei Stützpunkten werden zwei weitere Stützpunkte jeweils dem arithmetischen Mittel der relativen Häufigkeiten nachgeführt. Jeder neue Meßwert wird nun nach seiner Größe einem der sechs durch die Stützpunkte abgegrenzten Bereiche zugeteilt. Anschließend werden die Positionen der Stützpunkte anhand der neuen relativen Häufigkeiten korrigiert und die ihnen zugeordneten Werte durch quadratische Interpolation der Verteilungsfunktion zwischen jeweils drei Stützstellen angepaßt. Der in [89] vorgeschlagene Algorithmus, der zwischen den Stützstellen immer einen Mindestabstand vorsieht, um die Interpolation abzusichern, liefert als Quantil einen Wert, dessen zugeordnete relative Häufigkeit um bis zu $1/n_M$ von p_Q abweicht. Diese Abweichung kann durch eine weitere quadratische Interpolation bei der Bestimmung des Quantilwertes aus dem dritten Stützpunkt kompensiert werden.

Als weitere Möglichkeit zur Bestimmung von Quantilen bietet sich die *Histogramm-Methode* an, bei der in der Simulation lediglich eine Häufigkeitsverteilung der Meßgröße bestimmt wird. Durch Inversion der daraus durch Summieren gewonnenen Verteilungsfunktion kann – mit einer Genauigkeit von einer Klassenbreite – das gesuchte Quantil bestimmt werden.

Vertrauensintervalle für Quantile

Eine abgeleitete Größe, beispielsweise ein Mittelwert oder eine Varianz, die durch Summieren der einzelnen unabhängigen Meßwerte der Simulation bestimmt wird, kann nach dem Zentralen Grenzwertsatz als normalverteilt angenommen werden. Aus mehreren unabhängigen Stichproben der *abgeleiteten Größe*, die als Teiltest-Ergebnisse in der Simulation gewonnen werden, kann dann mit Hilfe der Student-t-Verteilung ein Vertrauensintervall für den Erwartungswert der abgeleiteten Größe angegeben werden [103].

Da die Quantile nicht durch Summation ermittelt werden, kann weder das Gesamtergebnis der Simulation als Mittelwert von Teiltestergebnissen bestimmt werden, noch konvergiert die Verteilung der Teiltestergebnisse gegen eine Normalverteilung, da die Voraussetzung für die Anwendung des Zentralen Grenzwertsatzes nicht erfüllt ist. Zur Bestimmung von Vertrauensintervallen für gemessene Quantile muß daher auf Theorien zur Parameterschätzung für Binomialverteilungen [99, Kap. 69,75] zurückgegriffen werden [44, 94].

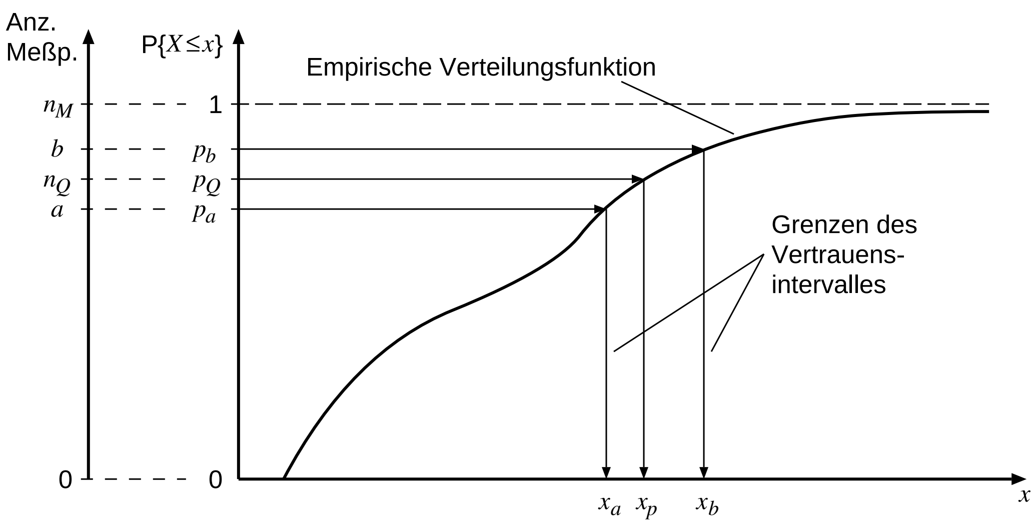


Abb. 3.6: *Bestimmung von Vertrauensintervallen für Quantile.*

Sachs [132] gibt für die dem Vertrauensintervall entsprechenden Grenzpositionen a und b in der sortierten Liste aller Meßwerte die folgende Formel an (vgl. Abb. 3.6):

$$\left.\begin{matrix} a \\ b \end{matrix}\right\} = \left\{ n_M p_Q \begin{matrix} - \\ + \end{matrix} \; 1,96 \cdot \sqrt{n_M p_Q (1 - p_Q)} \right. \tag{3.14}$$

Durch Division durch n_M erhält man die zu diesen Grenzpositionen gehörenden relativen Häufigkeiten p_a und p_b:

$$p_{a,b} = p_Q \mp 1,96\sqrt{\frac{p_Q(1-p_Q)}{n_M}} \tag{3.15}$$

Die empirischen Quantile x_a und x_b zu p_a und p_b geben schließlich die Vertrauensgrenzen für das Quantil zu p_Q an, die in Abb. 3.6 zu sehen sind. Für die in Kapitel 5 verwendeten Parameter $n_M = 10^7$ und $p_Q = 1 - 10^{-5}$ ergibt sich

$$\begin{aligned} p_a &= p_Q - 0,2 \cdot 10^{-5} = 1 - 1,2 \cdot 10^{-5} \quad \text{und} \\ p_b &= p_Q + 0,2 \cdot 10^{-5} = 1 - 0,8 \cdot 10^{-5} \quad . \end{aligned}$$

Diese Methode zur Bestimmung der Vertrauensintervalle für Quantile ist in alle drei oben genannten Methoden zur Bestimmung von Quantilen leicht integrierbar. Die in den Kapiteln 5 und 6 dargestellten Ergebnisse wurden mit der Histogramm-Methode ermittelt, wobei die Verteilungsfunktion zwischen den 200–400 aus den Klassenhäufigkeiten bestimmten Stützstellen linear interpoliert wurde. Alle dargestellten Vertrauensintervalle wurden für ein Vertrauensniveau von 95% bestimmt.

Kapitel 4

Medienzugriffsmechanismen für TDMA-PONs

4.1 Übersicht

Wegen ihrer topologischen Struktur verlangen ATM-Zugangsnetze nach dem PON-, HFC- oder HFR-Prinzip eine zentrale Instanz in der Kopfstation, die den Medienzugriff im Rückkanal regelt. Dies kann statisch durch Bandbreitezuteilung auf der Verbindungsebene (Abschnitt 4.2) oder dynamisch durch Bandbreitezuteilung auf der Büschel- oder Zellenebene geschehen. Im zweiten Fall muß die Kopfstation durch Bedarfsangaben der Zugangsstationen Informationen über die Anzahl der von den verschiedenen Zugangsstationen zu übertragenden ATM-Zellen erhalten (Abschnitt 4.3). Da diese MAC-Protokolle das Verkehrsprofil des an der Zugangsstation angebotenen Verkehrs in der Rückrichtung beeinflussen, wurden in der Literatur einige Verfahren angegeben, die das Verkehrsprofil am Ausgang der Kopfstation wiederherstellen sollen (Abschnitt 4.4). Um verschiedene ATM-Dienstklassen in der Rückrichtung unterstützen zu können, werden teilweise Prioritäten oder unterschiedliche MAC-Mechanismen für die Verkehrsklassen eingesetzt (Abschnitt 4.5).

In diesem Kapitel werden die unterschiedlichen Mechanismen klassifiziert und beschrieben, die in Medienzugriffsprotokollen mit zentraler Koordination für den Rückkanal passiver optischer Netze, aber auch in anderen ATM-Zugangsnetzen eingesetzt werden. Die aus der Literatur bekannten MAC-Protokolle werden in Abschnitt 4.6 nach dem Einsatz dieser Mechanismen klassifiziert. Die einzelnen Mechanismen werden dann in Kapitel 5 hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf verschiedene ATM-Verkehre untersucht und verglichen.

In Pankens Klassifikation für Medienzugriffsprotokolle [114] werden beim Medienzugriff vier Phasen unterschieden: In der Phase der *Bedarfsangabe* reservieren die Stationen Übertragungskapazität für eine bestimmte Datenmenge (explizite Reservierung) oder für eine gewisse Übertragungsgeschwindigkeit (geschätzte Reservierung). Die *Zuteilung* der Kapazität an die Stationen erfolgt durch eine zentrale oder eine verteilte Zugriffssteuerung. Anschließend werden *Bestätigungen* in Form von Sendeberechtigungen an die Stationen verschickt. Diese Bestätigungen können den *Medienzugriff* für eine feste oder eine variable Zeitdauer erlauben.

Die hier untersuchten Protokolle fallen bei Panken [114] alle unter folgende Klassifikation: Die Bedarfsangaben sind (mit einer Ausnahme) explizit. Aufgrund der Bedarfsangaben wird durch eine zentrale Steuerung (die MAC-Instanz in der Kopfstation) eine Sendeberechtigung für den Zugriff auf einen Zeitschlitz konstanter Dauer vergeben. Eine Ausnahme stellt dabei das McFred-Protokoll [140] dar, in dem versucht wird, im Rückkanal die von derselben ONU kommenden ATM-Zellen zu bündeln, so daß der bei den Protokollen mit zeitschlitzbasierten Sendeberechtigungen auftretende Mehraufwand zur Synchronisation in jedem Zeitschlitz eingespart werden kann, wenn von einer Zugangsstation während einer Rahmendauer mehr als eine ATM-Zelle zur Kopfstation zu übertragen ist.

In paketvermittelnden Satellitensystemen zur Datenkommunikation werden wegen der sehr langen Signallaufzeiten im Gegensatz zu den hier betrachteten oft Protokolle eingesetzt, die bei geringer Last einen kollisionsbasierten Vielfachzugriff auf den Kanal ohne Reservierungen erlauben und bei höherer Systemauslastung zu einem reservierten Zugriff übergehen [151]. Da in ATM-Netzen nicht nur eine geringe Durchlaufzeit, sondern insbesondere eine geringe Schwankung der Durchlaufzeiten angestrebt wird, sind Medienzugriffsverfahren mit stark lastabhängiger Durchlaufzeit ungünstig: Die Durchlaufzeit der Zellen einer betrachteten Verbindung würde abhängig von der durch alle anderen Verbindungen verursachten Hintergrundlast, so daß eine stark schwankende Hintergrundlast auch große Zellverzögerungsschwankungen bewirkte. Aus diesem Grund ist es nicht sinnvoll, in ATM-Zugangsnetzen den Medienzugriff auf eine möglichst geringe Durchlaufzeit bei geringer Systemauslastung hin zu optimieren.

Um eine genauere Klassifikation der hier untersuchten Protokollmechanismen zu erleichtern, sind in Abb. 4.1 die unterschiedlichen Ausprägungen der einzelnen Komponenten des Medienzugriffes zusammengestellt, die im folgenden näher beschrieben werden.

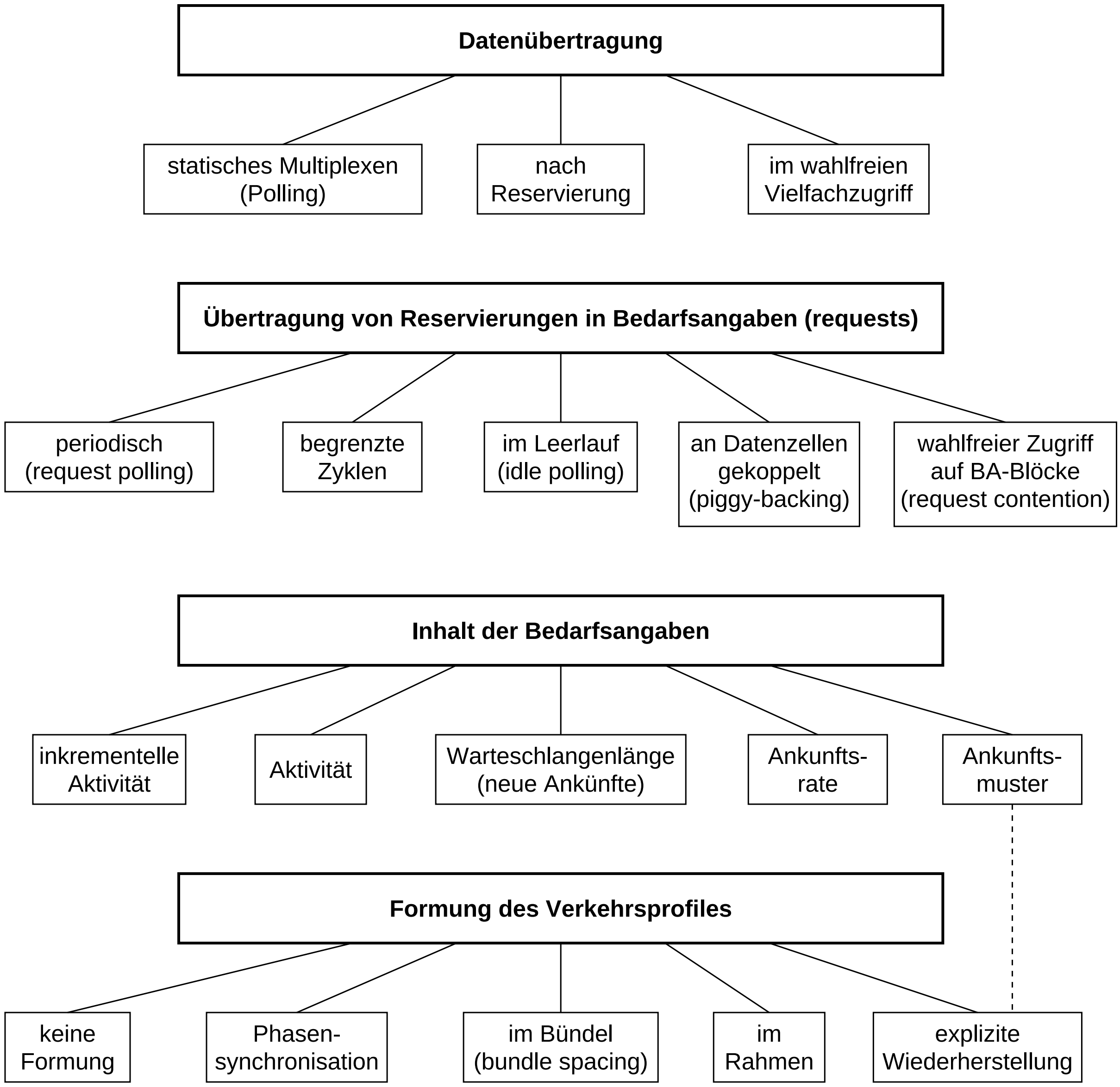


Abb. 4.1: *Optionen für die Komponenten des Medienzugriffes*

4.2 Statisches Multiplexen von Datenzellen

Die unter Protokollaspekten einfachste Methode, um in einem ATM-Zugangsnetz die Bandbreite des Rückkanals zu verwalten, ist das statische Multiplexen von ATM-Zellen. Hierbei bekommt jede Zugangsstation zyklisch einen Zeitschlitz zugeteilt, in dem sie eine ATM-Zelle im Rückkanal senden darf. Wenn die Zuteilung bei jedem Verbindungsauf- und -abbau geändert wird, dann kann das Zugangsnetz als Konzentrator eingesetzt werden. Die entsprechende Information kann beispielsweise über die V_{B5}-Schnittstelle von der Vermittlungsstelle bereitgestellt werden.

Die Zuteilung von Zeitschlitzen im Rückkanal kann, so wie in herkömmlichen synchronen TDM-Netzen, durch die Vergabe von Zeitschlitzen in einem übergeordneten „Rahmen“ geschehen (s. Abb. 4.2 a)). Hier wird immer beim Aufbau einer neuen Verbindung für die entsprechende Zellrate eine Anzahl von Zeitschlitz-Stellen im Rahmen reserviert. Anschließend wird die Information über die Vergabe der Zeitschlitze im Rahmen den Zugangsstationen mitgeteilt. Dies kann über einzelne Sendeberechtigungen im Zeitschlitztakt geschehen, die in jedem Zeitschlitz an die jeweils betroffene Zugangsstation gerichtet sind, oder über eine Verwaltungsnachricht, in der jeweils die gesamte Rahmeninformation an alle Zugangsstationen verteilt wird, so daß diese im darauffolgenden Zeitrahmen entsprechend dieser Zuordnung den Rückkanal belegen.

Diese Methode der rahmenbasierten Zuordnung der Zeitschlitze zu den Zugangsstationen hat ihre Grenzen in der erzielbaren Granularität der Bandbreitezuteilung: In jedem Rahmen muß einer Station eine ganzzahlige Anzahl von Zeitschlitzen zugeordnet sein. Dadurch kann die Bandbreite einer Zugangsstation nur in Vielfachen von einer ATM-Zelle in der Zeit t_R eingestellt werden. Im Falle der oft verwendeten Rahmendauer von $125\mu s$ entspricht dies einer Zellrate von 8000 Zellen/s. (Bei 48 Oktetts Nutzlast in jeder ATM-Zelle sind das 3,072 Mbit/s.) Diese Art der Bandbreitezuteilung wird trotz dieser Einschränkungen als Ansatz zur Verkehrsformung in ATM-Netzen diskutiert [54].

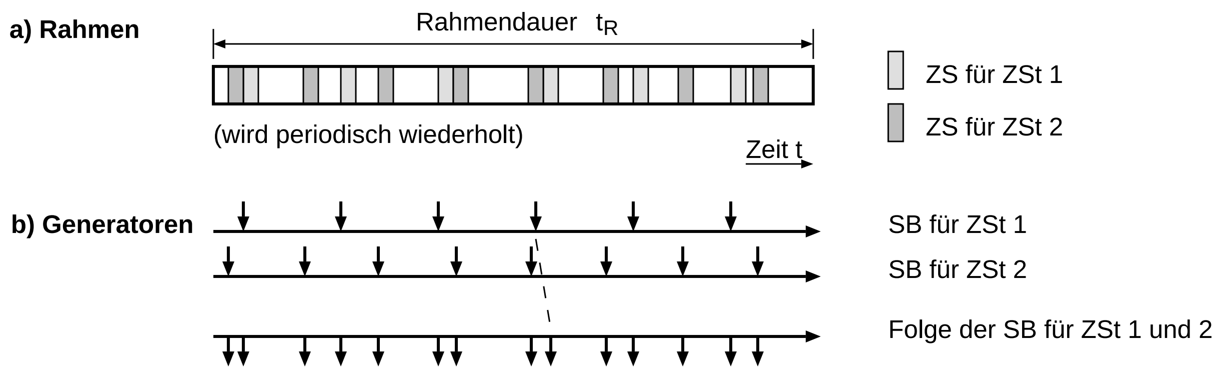


Abb. 4.2: *Statisches Multiplexen: a) im Zeitrahmen, b) mit individuellen Taktgeneratoren für jede Zugangsstation*

Als Alternative mit wesentlich feinerer Granularität bietet sich die Vergabe der Sendeberechtigungen (SB) auf Zeitschlitzbasis an (s. Abb. 4.2 b)). Hierbei enthält die Kopfstation für jede aktive Zugangsstation einen Taktgenerator, der zyklisch entsprechend der vereinbarten Zellrate Sendeberechtigungen generiert (s. Abb. 4.3 b)). Die Granularität ist bei diesem Verfahren nur durch die Generatoren bestimmt.

In der PON-Literatur wird das statische Multiplexen auch als „PON Polling“ [58] oder als “nicht bestellte” Sendeberechtigungen [11] bezeichnet. Zur genauen Anpassung der Periode, mit der Sendeberechtigungen erzeugt werden, an die Periode der zu transportierenden ATM-Zellen werden zusätzlich Algorithmen zur Phasenkorrektur vorgeschlagen, die in Abschnitt 4.4.1 kurz diskutiert werden.

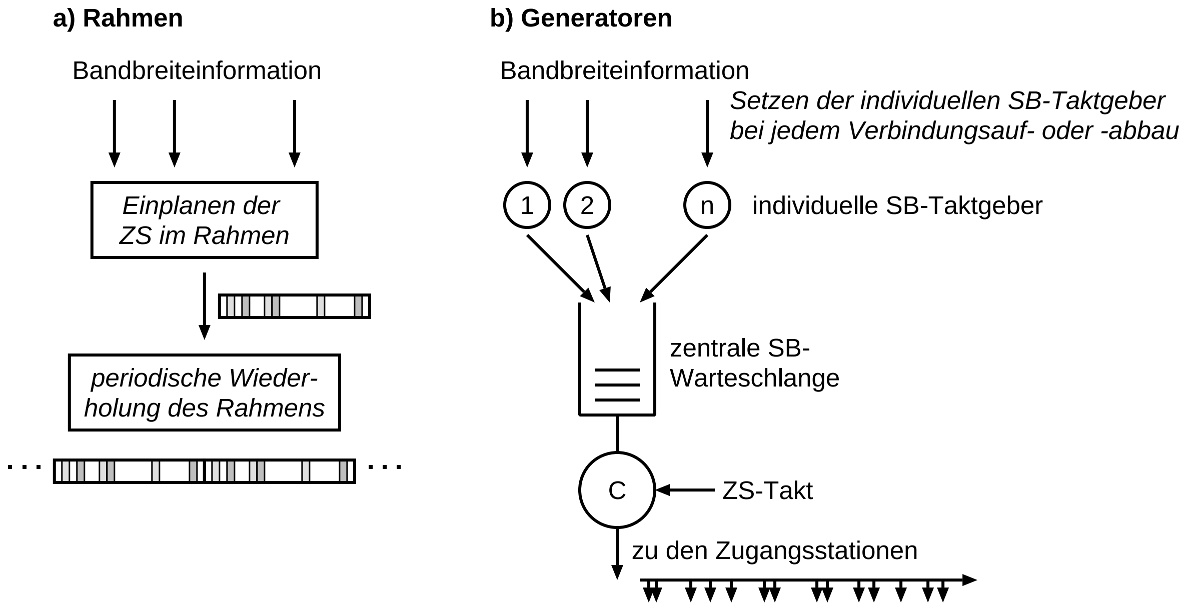


Abb. 4.3: *Methoden zum statischen Multiplexen mit Dynamik auf Verbindungsebene a) im Zeitrahmen, b) mit individuellen Taktgeneratoren für jede Zugangsstation*

4.3 Bedarfsangaben

Bedarfsangaben (*Requests*) sind ein Mittel, um der Kopfstation Zellankünfte an den Zugangsstationen zu melden (siehe auch Abschnitt B.1). Bedarfsangaben zusammen mit den durch sie ausgelösten Sendeberechtigungen werden derzeit in den meisten Vorschlägen für TDMA-basierte ATM-Zugangsnetze eingesetzt [95, 113, 125, 36], um die dynamische Vergabe von Sendeberechtigungen auf der Zellen- oder Büschelebene zu ermöglichen. Das Zusammenspiel zwischen Bedarfsangaben und Sendeberechtigungen ist in Abb. 4.4 für eine Zugangsstation und einen Zyklus skizziert. Da wegen der langen Signallaufzeiten gleichzeitig mehrere Zugangsstationen abgefragt werden und mehrere Bedarfsangaben auf dem Zugangsnetz unterwegs sind, wird auch von "Pipeline Polling" gesprochen [125].

Beim Einsatz von Bedarfsangaben zur Steuerung des Medienzugriffsprotokolles ist genauer zu unterscheiden, welche Information in der Bedarfsangabe übermittelt wird und wann die Sendeberechtigungen für Bedarfsangaben eingeplant werden.

4.3.1 Inhalt der Bedarfsangaben

Wie in Abschnitt B.1 diskutiert, ist es sinnvoll, in der Bedarfsangabe die aktuelle Warteschlangenlänge der Zugangsstation zu übertragen. Um die Synchronisierung des Empfängers in der Kopfstation vor dem Decodieren der Bedarfsinformation zu sparen, wurden auch Methoden vorgeschlagen, um von jeder Zugangsstation nur eine binäre Information zu über-

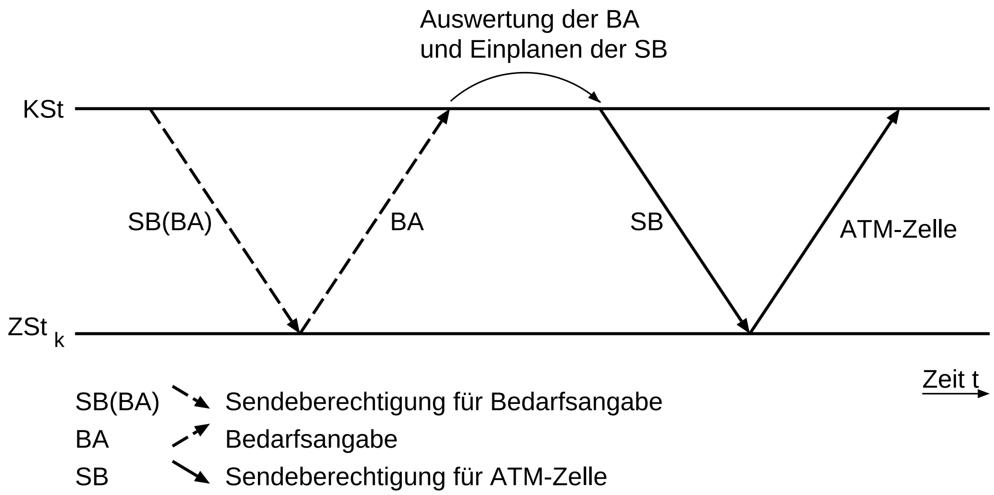


Abb. 4.4: *Zusammenspiel zwischen Bedarfsangaben und Sendeberechtigungen in einem TDMA-basierten ATM-Zugangsnetz*

mitteln. Hierbei wird entweder im Frequenzmultiplex [12] oder im Zeitmultiplex [145, 11] die binäre Information über mehrere Bit-Takte gestreckt, so daß sie im Empfänger ohne explizite Bit-Synchronisation decodiert werden kann. Abb. 4.5 stellt den Signalverlauf für diese binären Bedarfsangaben dem Verlauf bei expliziten Bedarfsangaben gegenüber.

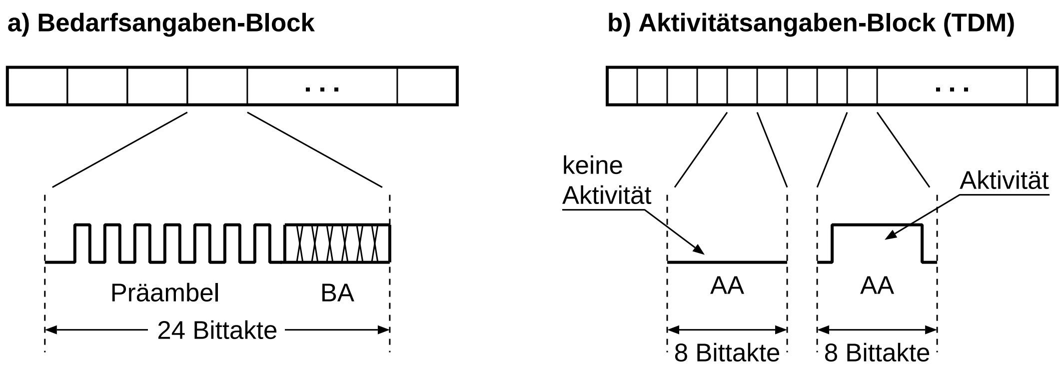


Abb. 4.5: *Inhalt der Bedarfsangaben: a) Explizite Bedarfsangabe nach Synchronisation, b) Binäre Aktivitätsangabe ohne Synchronisation*

Die Verwendung binärer Ankunftsinformationen wird im folgenden auch als „Aktivitätsangabe“ (AA) bezeichnet. Es ist davon auszugehen, daß für die Übertragung der binären Aktivitätsinformation ohne vorherige Synchronisation etwa acht Bit-Takte benötigt werden [11]. Somit können innerhalb eines Zeitschlitzes (vgl. Abschnitt 2.7.3.3) etwa 50 Aktivitätsangaben von unterschiedlichen Zugangsstationen übertragen werden, während mit 2 Oktetts für Synchronisation [95] im günstigsten Falle nur etwa 17 Bedarfsangaben pro Zeitschlitz möglich sind.

Die Aktivitätsangaben können nicht ohne einen weiteren Mechanismus zur Bedarfsangabe verwendet werden, der Informationen über die genaue Anzahl neuer Ankünfte liefert.

Dazu dienen in der Regel Bedarfsangaben, die in einem gemeinsamen Zeitschlitz mit einer ATM-Zelle von der Zugangsstation zur Kopfstation gesendet werden (s. Abschnitt 2.7.3.3). Hier muß die Synchronisation für den erfolgreichen Empfang der ATM-Zelle ohnehin erfolgen, so daß außer den für die Codierung der Bedarfsangabe nötigen Bits keine weitere Übertragungskapazität eingesetzt werden muß.

Eine „1“ in einer Aktivitätsangabe kann, je nach Spezifikation des Systems, für eine von Null verschiedene Warteschlangenlänge stehen oder dafür, daß seit der letzten Bedarfs- oder Aktivitätsangabe neue ATM-Zellen zur Übertragung in Rückrichtung an der Kopfstation eingetroffen sind. Für die zweite Option soll im folgenden der Begriff „inkrementelle Aktivitätsangabe“ (IAA) verwendet werden. Die Robustheit der Bedarfsangaben ist allerdings in diesem Fall nicht gewährleistet.

In Abb. 4.1 sind außer den hier dargestellten noch zwei weitere Optionen für den Inhalt der Bedarfsangaben eingetragen: Die Angabe einer momentanen Ankunftsrate von ATM-Zellen an der Zugangsstation war Bestandteil früherer Vorschläge des DAA-Protokolls (*Dynamic Allocation Algorithm*) [95, 57]. Die Angabe eines Ankunftsmusters anstelle der Warteschlangenlänge oder der Aktivität einer Zugangsstation wird in Abschnitt 4.4.4 diskutiert.

4.3.2 Einplanen der Bedarfsangaben

Die Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen im Rückkanal kann nicht als einziger Mechanismus zur Mitteilung von Ankunftsinformationen an die Kopfstation eingesetzt werden. Zugangsstationen, die nach langer Pause eine ATM-Zelle zu senden haben oder solche mit einer sehr geringen Zellrate könnten sonst Informationen über neu angekommene ATM-Zellen nicht an die Kopfstation weiterleiten.

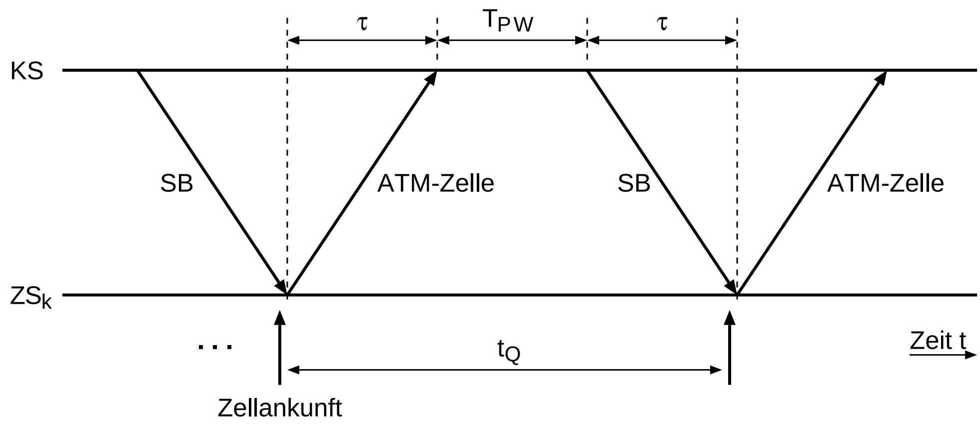


Abb. 4.6: *Grenzfall für den alleinigen Einstatz von an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben im stationären Zustand.*

Abb. 4.6 zeigt, daß die ATM-Zellen höchstens mit dem Abstand

$$t_Q \leq 2\tau + T_{PW} \tag{4.1}$$

an der Zugangsstation ankommen dürfen, wenn jede Ankunft in einem gemeinsamen Zeitschlitz mit einer ATM-Zelle in Rückrichtung gemeldet werden soll. Da die Wartezeit T_{PW} zwischen der Ankunft einer Bedarfsangabe an der Kopfstation und dem Absenden der entsprechenden Sendeberechtigung bei geringer Systemauslastung nahe Null sein kann, ergibt sich, daß der Abstand zweier ATM-Zellen an der Zugangsstation nicht größer sein darf als die beim Laufzeitausgleich eingestellte Rundlaufdauer 2τ, damit der Mechanismus der an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben im stationären Zustand ohne weitere Mechanismen eingesetzt werden kann. Bei einer in PON-Netzen üblichen Rundlaufdauer von $2\tau = 100\mu s$ ergibt sich daraus eine Mindestzellrate von 10^4 Zellen/s, was bei 48 Oktetts Nutzdaten je Zelle einer Nutzbitrate von 3,84 Mbit/s entspricht.

Deswegen müssen zusätzlich Bedarfsangaben-Blöcke vorgesehen werden, in denen die Zugangsstationen der Kopfstation Ankünfte melden können. Den Zugangsstationen wird durch spezielle Sendeberechtigungen für Bedarfsangaben (*request block permit*) mitgeteilt, wann sie Bedarfsangaben zur Kopfstation absenden können. Diese Sendeberechtigungen entsprechen den Sendeberechtigungen für ATM-Zellen, abgesehen davon, daß hier eine Gruppe von Zugangsstationen auf einmal adressiert wird. Jede Zugangsstation kennt ihre Gruppenadresse für BA-Sendeberechtigungen und ihre Position im BA-Block. Wenn sie eine Sendeberechtigung für eine BA empfängt, dann verzögert sie das Abschicken ihrer BA über die Verzögerung zum Laufzeitausgleich (s. Abschnitt 2.7.2.2) hinaus so lange, wie es ihrer Position im BA-Block entspricht.

In der zentralen MAC-Instanz der Kopfstation müssen die Sendeberechtigungen für BA-Blöcke so eingeplant werden, daß einerseits möglichst wenig Bandbreite im Rückkanal für BA-Blöcke verwendet wird, andererseits aber eine möglichst schnelle Reaktion auf neue Ankünfte an den Zugangsstationen erreicht wird [37]. Im wesentlichen werden hier vier Ansätze unterschieden:

Zyklische Sendeberechtigungen für Bedarfsangaben

In die Folge der Sendeberechtigungen für ATM-Zellen werden zyklisch Sendeberechtigungen für BA-Blöcke eingefügt. Dadurch werden eventuell zur Übertragung anstehende ATM-Zellen weiter verzögert, aber es ist sichergestellt, daß jede Zugangsstation spätestens nach einer Periodendauer des Zyklus abgefragt wird.

Leerlauf-Sendeberechtigungen für Bedarfsangaben

Die Vorgabe, zur Übertragung anstehende ATM-Zellen nicht weiter zu verzögern, führte zu der Idee, Sendeberechtigungen für Bedarfsangaben immer dann zu erteilen, wenn keine anderen Sendeberechtigungen von der Kopfstation auszusenden sind [31]. Dadurch kann bei einer geringen Systemauslastung eine sehr geringe Reaktionszeit erreicht werden, und bei großer Systemauslastung wird keine zusätzliche Übertragungskapazität für die Sendeberechtigungen benötigt. Andererseits begünstigt dieses Verfahren solche Zugangsstationen, die ein hohes Verkehrsaufkommen in der Rückrichtung haben, gegenüber solchen, die nur sporadisch etwas zu senden haben.

Begrenzte BA-Zyklen
Die Strategie der Leerlauf-Sendeberechtigungen für BA-Blöcke wird hier durch zusätzliche Sendeberechtigungen ergänzt, um einen maximalen zeitlichen Abstand aufeinanderfolgender Bedarfsangaben von jeder Zugangsstation auch unter hoher Systemauslastung zu garantieren.

Vielfachzugriff auf BA-Blöcke
Anstatt jeder Zugangsstation eine eigene Position in einem BA-Block zuzuordnen, wird in der Literatur auch vorgeschlagen, daß die Zugangsstationen im Vielfachzugriff auf die einzelnen Positionen in einem BA-Block zugreifen sollen [49, 23]. Ähnliche Verfahren werden oft für drahtlose ATM-Netze [91, 120] oder für die Paketvermittlung in Satellitensystemen [151] eingesetzt.

4.4 Formung von Verkehrsprofilen

Das Verkehrsprofil, also der genaue zeitliche Abstand zwischen den ATM-Zellen einer Verbindung, wird in der Rückrichtung eines ATM-Zugangsnetzes durch den Medienzugriff verändert. Um dennoch dafür zu sorgen, daß am V-Referenzpunkt die für die Verbindungen vereinbarten Verkehrsparameter eingehalten werden, müssen eventuell zusätzliche Mechanismen im Zugangsnetz vorgesehen werden. Diese Aufgabe kann von einer Verkehrsformungseinheit (*Traffic Shaper*) wahrgenommen werden, die zwischen der Kopfstation und dem V-Referenzpunkt eingesetzt wird und die Zellen jeder Verbindung individuell so verzögert, daß der Verkehrsvertrag eingehalten wird [140].

Eine Reihe anderer Verfahren, die die Verkehrsformung oder die Wiederherstellung des ursprünglichen Verkehrsprofiles bereits bei der Einplanung von Sendeberechtigungen für die einzelnen Zugangsstationen vorsehen, werden im folgenden kurz dargestellt.

4.4.1 Phasensynchronisation

Beim Einsatz der in Abschnitt 4.2 diskutierten periodischen Sendeberechtigungen für Zugangsstationen wird teilweise ein Synchronisationsmechanismus vorgesehen, der die Folge der Sendeberechtigungen den Zellankünften an der Zugangsstation anpassen soll. Dies kann über einen Phasenregelalgorithmus geschehen, der das Ziel hat, die Wartezeit von ATM-Zellen in der Zugangsstation auf einem relativ kleinen Wert konstant zu halten [58, 12], so daß auch in Zugangsstationen mit geringer Zellrate die Wartezeit der Zellen wesentlich kürzer ist als die Periode der Bedienung.

Fraglich ist, ob der Einsatz solcher Algorithmen sinnvoll ist, wenn nicht von einer konstanten Zellrate an der Zugangsstation ausgegangen werden kann. Beispielsweise wird eine Verbindung mit variabler Zellrate, die zwischen Ruhe- und Aktivitätsphasen wechselt, bei jedem Aktivitätsbeginn einen neuen Einschwingvorgang der Phasenregelung auslösen und dabei zunächst eine zufällige Verzögerung der Zellen erfahren. Außerdem muß sichergestellt sein, daß der Phasenregelalgorithmus durch solche Veränderungen der Zellrate nicht instabil wird und trotzdem einen großen Synchronisationsbereich für unterschiedliche Zellraten aufweist, die eventuell geringer sind als die beim Verbindungsaufbau vereinbarte Zellrate.

4.4.2 Verkehrsformung im Bündel

Um die Summen-Zellrate einer Zugangsstation zu begrenzen, kann ein Mindestabstand der Sendeberechtigungen beim Eintritt in die globale Warteschlange in der Kopfstation vorgesehen werden. Dieser Mindestabstand kann aus der über die V_{B5}-Schnittstelle erhältlichen Summenrate jeder Zugangsstation berechnet werden [55]. Dadurch wird eine Verkehrsformung auf das Bündel aller Verbindungen (*Bundle Spacing*) ausgeführt, die über die betrachtete Zugangsstation geführt werden. In der Literatur finden sich analytische Untersuchungen, die dieses Verfahren positiv bewerten [55] und solche, die zeigen, daß es unnötig große Zellverzögerungsschwankungen erzeugt [115].

Eine Alternative zur Verkehrsformung im Bündel durch Begrenzung der maximalen SB-Rate ist ein Verfahren, das auf der Funktion des GCRA basiert [113, 116], der auch zur ATM-Quellflußkontrolle (*Usage Parameter Control, UPC*) eingesetzt wird [82]. Auch dieser Algorithmus wirkt auf das Bündel aller Verbindungen einer Zugangsstation, aber er setzt nicht strikt eine maximale Rate von Sendeberechtigungen und damit eine maximale Zellrate durch, sondern er erlaubt, wie der GCRA, einer gewissen durch eine Fenstergröße gegebenen Anzahl von Zellen kurz nacheinander die Übertragung. Erst wenn dabei eine vorgegebene mittlere Zell- bzw. SB-Rate überschritten wird, werden wie oben die Sendeberechtigungen verzögert in die globale Warteschlange eingereiht.

4.4.3 Verkehrsformung im Zeitrahmen

Eine Möglichkeit, das Profil des von einer Zugangsstation kommenden Summenverkehrs zu formen, ohne die genauen Verkehrsparameter zu kennen, wird im CPP-Protokoll (*Cyclic Permit Programmer*) [8] angewandt. Die zeitliche Verteilung der Sendeberechtigungen ist

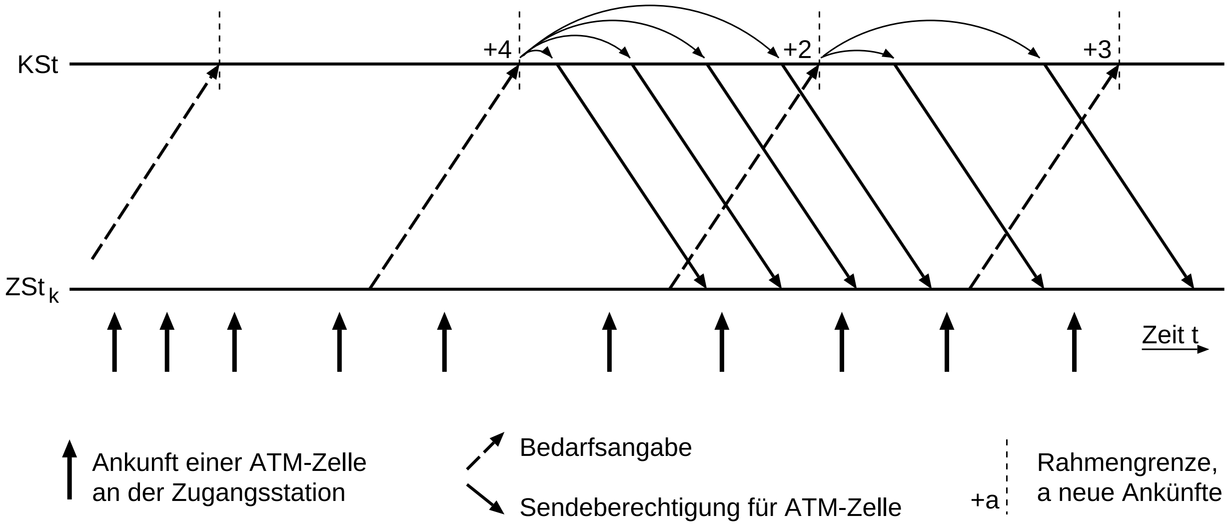


Abb. 4.7: *Verkehrsformung im Zeitrahmen beim CPP-Protokoll (vereinfacht).*

in Abb. 4.7 illustriert: Die Kopfstation empfängt periodisch Bedarfsangaben von jeder Zugangsstation. Die MAC-Instanz in der Kopfstation verteilt die gewünschte Anzahl von Sendeberechtigungen für die Zugangsstation ZSt$_k$ gleichmäßig in der folgenden Periode (auch als „Rahmen“ bezeichnet) bis zum Empfang der nächsten Bedarfsangabe von derselben Zugangsstation. Hierdurch wird, automatisch an die momentane Zellrate angepaßt, in jedem Rahmen der maximale Abstand zwischen den von einer Zugangsstation kommenden ATM-Zellen eingestellt.

Dieses Verfahren hat den Vorzug, unabhängig von genaueren Verkehrsparametern das Bilden von „Zellklumpen“ zu verhindern. Auf der anderen Seite wird eine zusätzliche Zellverzögerungsschwankung verursacht, wenn beispielsweise eine Quelle mit hoher Spitzenzellrate ihren Zellstrom unterbricht. In diesem Fall werden die letzten Zellen, die in einen neuen Rahmen des CPP fallen, zu lange verzögert.

4.4.4 Explizite Wiederherstellung des Verkehrsprofiles

Ausgehend von dem in Abschnitt 4.4.3 beschriebenen CPP-Protokoll, das mit einer Genauigkeit des Rahmentaktes für jede Zellankunft an der Zugangsstation eine Sendeberechtigung erzeugt, wurde das BPP-Protokoll (*Belt Permit Programmer*) entwickelt [9], das mit einer Genauigkeit von einem Zeitschlitz das Ereignis jeder Zellankunft an einer Zugangsstation registriert.

In dem in [9] beschriebenen System ist jede Zugangsstation für drei Netzabschlüsse zuständig, so daß in jedem Zeitschlitz bis zu drei ATM-Zellen an der Zugangsstation ankommen können. Die Anzahl der in einem Zeitschlitz angekommenen ATM-Zellen kann somit durch zwei Bits codiert werden. Somit wird für jede Zugangsstation in jedem Rahmen ein Bedarfsangaben-Feld benötigt, das für jeden Zeitschlitz des Rahmens zwei Bits für Ankunftsinformationen zur Verfügung stellt.

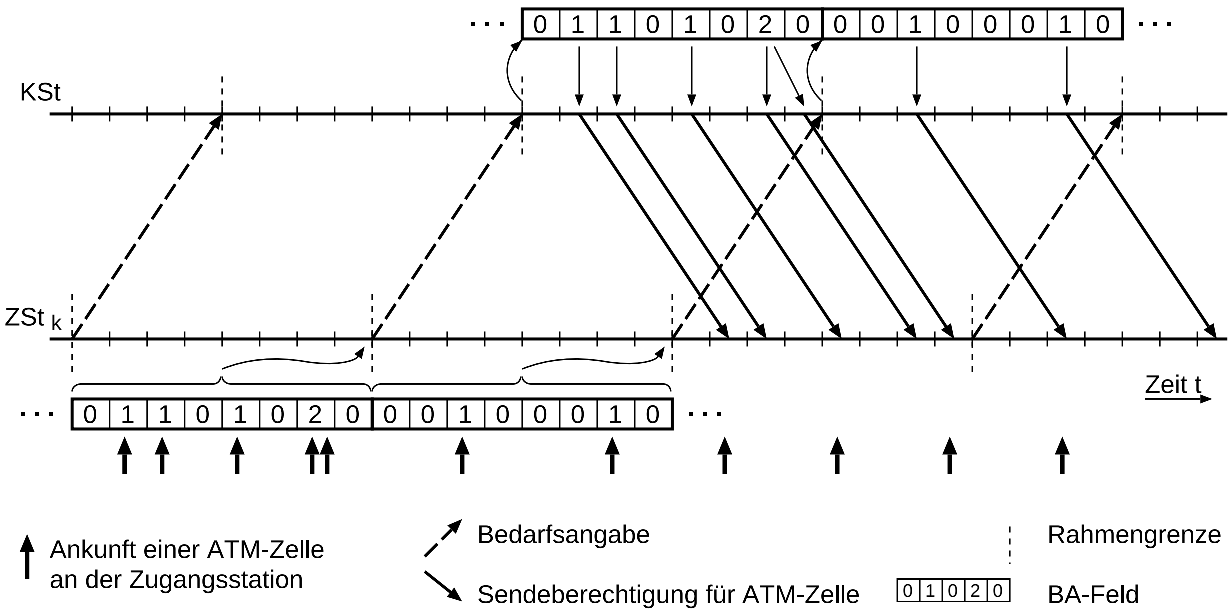


Abb. 4.8: *Explizite Wiederherstellung des Verkehrsprofiles beim BPP-Protokoll (stark vereinfacht).*

In Abb. 4.8 sind die Ankunftszeitpunkte von ATM-Zellen an einer Zugangsstation zusammen mit den aus ihnen generierten BA-Feldern und den in der Kopfstation danach erzeugten Sendeberechtigungen stark vereinfacht dargestellt. Wie bei dem oben beschriebenen CPP-Protokoll müssen zusätzliche Vorkehrungen getroffen werden, um den Überlauf von Anforderungen in den nächsten Zeitschlitz oder in den nächsten Rahmen zu bearbeiten. Außerdem müssen die BA-Felder von mehreren Zugangsstationen gleichzeitig verarbeitet werden. Die Details hierzu sind in [9] und [29] beschrieben.

Aus Gründen der Effizienz muß in den BA-Feldern von BPP die Anzahl der neuen Ankünfte anstelle der momentanen Warteschlangenlänge in der Bedarfsangabe codiert werden. Daher kann das Medienzugriffsverfahren nicht mit den in Abschnitt B.1 beschriebenen Maximum- und Minimum-Operationen gegenüber Übertragungsfehlern robust gemacht werden, sondern es muß ein zusätzlicher Mechanismus vorgesehen werden, der im Falle von Übertragungsfehlern von Bedarfsangaben die entsprechenden ATM-Zellen aus der Warteschlange der Zugangsstation verwirft [95, Abschnitt 3.6.7.4].

Die Zellverzögerungsschwankungen können durch die detaillierten Ankunftsinformationen in BPP fast bis zum theoretischen Minimum reduziert werden, das in einem konzentrierten ATM-Multiplexer zu beobachten ist [29, 95]. Die verbleibende Differenz entsteht durch die zur Übertragung der Bedarfsangaben-Felder notwendige Unterbrechung des Zellstromes in der Rückrichtung. Außerdem ist die Mindest-Durchlaufzeit für ATM-Zellen bei BPP um die Rahmendauer länger als bei anderen MAC-Verfahren, die die Ankunftsinformation direkt zur Erzeugung von Sendeberechtigungen verwenden.

4.4.5 Bezug zwischen MAC-Protokoll und Quellflußkontrolle

In früheren Versionen der ITU-Empfehlung I.371 [82] wurde explizit gefordert, daß am Ende des ersten Abschnitts einer VC- oder VP-Verbindung in einem Netz die Verkehrsparameter der entsprechenden virtuellen Verbindung oder des virtuellen Pfades durch eine Quellflußkontrolle überwacht werden. Da in ATM-Zugangsnetzen, die das VPI-Feld des ATM-Zellkopfes zur Adressierung der Zugangsstationen verwenden, eine VPI-Umsetzung durchgeführt wird, wird in der Literatur gefolgert, daß deswegen in diesem Fall der erste virtuelle Pfad an der Zugangsstation ende [116]. Andererseits kann durch eine einfache Erweiterung der Datenblöcke in beiden Senderichtungen des ATM-Zugangsnetzes um ein Adreßfeld für den betroffenen Netzabschluß diese VPI-Umsetzungsfunktion vermieden werden, so daß das oben genannte Argument entkräftet ist. Daher trifft dieser formale Grund für eine Quellflußkontrolle am Eingang jedes ATM-Zugangsnetzes sicher nicht zu.

Da in einem ATM-Zugangsnetz verschiedene Zugangsstationen den Rückkanal gemeinsam nutzen, muß allerdings ohnehin eine Methode vorgesehen werden, um Verbindungen eines Anschlusses vor Einflüssen anderer Verbindungen zu schützen, auf denen die Verkehrsparameter nicht eingehalten werden. Daher empfiehlt sich der Einfluß einer VP- oder gar VC-basierten Quellflußkontrolle am Netzabschluß, also in der B-NT.

Ein Problem beim Einsatz einer Quellflußkontrolle im Netzabschluß besteht darin, die entsprechenden Parameter einzustellen. Nach den derzeit vorliegenden Vorschlägen für die Standardisierung der V_{B5}-Schnittstelle bei ETSI ist es nicht vorgesehen, VC-spezifische Informationen an das Zugangsnetz zu geben. Andererseits sollen Zugangsnetze keine eigenen Signalisierinstanzen enthalten, so daß die für die Konfiguration der Quellflußkontrolle benötigten Parameter im Zugangsnetz nicht verfügbar sind. Um diesem Problem zu begegnen, gibt es im wesentlichen zwei Möglichkeiten: Die Standardisierung, beispielsweise des LAIP [95, Kap. 9], wird auf die Übertragung von VC-Parametern ausgedehnt, oder im Zugangsnetz muß eine Signalisierinstanz vorgesehen werden, die dem Signalisierverkehr zumindest die zwischen den Endgeräten und der Vermittlungsstelle ausgehandelten Verkehrsparameter entnimmt.

Um die Quellflußkontrolle nicht explizit in den Zugangsstationen durchführen zu müssen, wird in einigen Systemvorschlägen vorgesehen, eine entsprechende Funktion in das Medienzugriffsprotokoll bzw. in den Algorithmus zur Zuweisung der Sendeberechtigungen zu integrieren [116, 117, 31]. Diese Funktion – die Durchsetzung eines UPC-konformen Verkehrsprofiles – ist grundsätzlich zu unterscheiden von den in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Methoden zur Verkehrsformung, die davon ausgehen, daß der Eingangsverkehr des Zugangsnetzes bereits dem Verkehrsvertrag entspricht. Um eine Quellflußkontrolle in das Medienzugriffsprotokoll zu integrieren, muß ein zusätzlicher Mechanismus zum Verwerfen nicht konformer ATM-Zellen *in der Zugangsstation* vorgesehen werden.

4.5 Unterstützung mehrerer ATM-Dienstklassen

Die einfachste Möglichkeit zur Unterstützung mehrerer ATM-Dienstklassen in einem Zugangsnetz besteht darin, lokal in der Zugangsstation für jede ATM-Dienstklasse eine eigene Warteschlange mit einer vorgegebenen statischen Priorität vorzusehen und beim Empfang einer Sendeberechtigung entsprechend nach einer lokalen Entscheidung eine ATM-Zelle aus der Warteschlange mit der jeweils höchsten Priorität zur Kopfstation zu senden. Wenn die MAC-Instanz in der Kopfstation selbst jedoch den Verkehrsklassen auch in unterschiedlichen Zugangsstationen Sendeberechtigungen gezielt zuweisen soll, dann muß ein Weg vorgesehen werden, zusätzlich in den Bedarfsangaben zwischen Ankünften aus unterschiedlichen Klassen zu unterscheiden.

Die oben beschriebenen Mechanismen für den Medienzugriff in ATM-Zugangsnetzen sind zunächst dazu gedacht, auf das Bündel aller Verbindungen zu wirken, die durch eine Zugangsstation verlaufen. Um darin mehrere ATM-Dienstklassen zu unterstützen und voneinander zu trennen, muß sowohl die in den Bedarfsangaben und Sendeberechtigungen übermittelte Steuerinformation angepaßt werden, als auch in der Kopfstation ein Mechanismus vorgesehen werden, der die Vergabe von Sendeberechtigungen an die verschiedenen ATM-Dienstklassen regelt. Eine verbindungsindividuelle Behandlung der ATM-Zellen in einem Zugangsnetz ist unrealistisch, da hierfür für jede Verbindung eine eigene Bedarfsangabe an die Kopfstation übertragen werden müßte.

Eine einfache Erweiterung durch eine zweite Prioritätsklasse und eine entsprechende SB-Vergabe nach statischer Priorität ist für CPP in [10] beschrieben. Auch das PACS-Protokoll aus [113] stellt zwei statische Prioritätsklassen für zeitkritischen und weniger zeitkritischen Verkehr zur Verfügung. Die einzelnen Bedarfsangaben werden nach dem in Abschnitt 4.4.2 dargestellten UPC-basierten Verfahren bedient, wobei Bedarfsangaben für die zweite Prioritätsklasse erst bearbeitet werden, wenn alle Bedarfsangaben mit höherer Priorität in Sendeberechtigungen umgesetzt wurden.

In den meisten anderen Vorschlägen der Literatur für die Unterstützung mehrerer ATM-Dienstklassen im Zugangsnetz wird eine Kombination verschiedener MAC-Mechanismen für die unterschiedlichen Dienstklassen eingesetzt. In dem in [11] beschriebenen MAC-Protokoll für ein SuperPON werden für Echtzeit-Dienste die Sendeberechtigungen nach dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen generatorbasierten statischen Verfahren vergeben, während die weniger zeitkritischen Dienste über eine sogenannte „ABR“-Klasse für alle Verbindungen ohne Echtzeit-Anforderungen nach einem CPP-ähnlichen Prinzip mit geringer Priorität bedient werden.

Die in [117] beschriebene Erweiterung des GF-Protokolles [31, 95] unterscheidet zwischen den drei Dienstklassen CBR/VBR, ABR und UBR. Für CBR/VBR wird ein einfaches Verfahren mit zyklischen BA-Blöcken, daraus direkt generierten Sendeberechtigungen und zentraler Warteschlange eingesetzt. Für ABR werden die Sendeberechtigungen nur in die zentrale Warteschlange eingereiht, wenn diese leer ist oder sonst die garantierte Mindestzellrate (*Minimum Cell Rate, MCR*) der Zugangsstation für ABR nicht erreicht wird. Für UBR werden Sendeberechtigungen ohne Auswertung von Bedarfsangaben zyklisch an alle Stationen verteilt, wenn die zentrale Warteschlange keine anderen Sendeberechtigungen enthält.

In neueren ATM-Vermittlungsknoten wird die Bearbeitung der verschiedenen ATM-Dienstklassen nicht durch statische Prioritäten geregelt, sondern durch Verfahren, die auf dem WFQ (*Weighted Fair Queueing*) basieren [56]. Eine entsprechende Zuteilung der Sendeberechtigungen, die anstelle statischer Prioritäten ein WFQ-Verfahren einsetzt, ist auch für ATM-Zugangsnetze denkbar [36].

Bei der Unterstützung der ATM-Dienstklassen in ATM-Zugangsnetzen stellt sich außerdem dasselbe Problem wie bei der Konfiguration der Quellflußkontrolle: die MAC-Instanz in der

Kopfstation muß Informationen über die Parameter der unterschiedlichen Verbindungen erhalten, damit ein entsprechendes Einplanen der Sendeberechtigungen möglich wird.

Auch bei der Unterstützung der ABR-Dienstklasse im ATM [90, 82, 18] sind in der Literatur unterschiedliche Grundpositionen zu finden. Eine ABR-Verbindung, deren Nutzdatenstrom in der Verteilrichtung verläuft, sendet häufig in der Rückrichtung ATM-Zellen zur Ressourcenverwaltung (*Resource Management, RM*). Um die Übertragungskapazität im Rückkanal nicht für diese RM-Zellen zu verwenden, wird in [13] eine Unterbrechung der ABR-Verbindungen vorgeschlagen. Andererseits ist davon auszugehen, daß ABR für Dienste wie den Transport von TCP/IP-Verbindungen eingesetzt wird, die ihrerseits auch in der Rückrichtung selbst Protokolldaten zur Bestätigung und Fehlersicherung übertragen, so daß die zusätzlich durch die RM-Zellen benötigte Übertragungskapazität unwesentlich sein sollte. Daher wird in [117] und [36] davon ausgegangen, daß auch im Zugangsnetz RM-Zellen für die ABR-Flußsteuerung verwendet werden, die durch die betroffene Zugangs- und die Kopfstation entsprechend der Auslastung des Zugangsnetzes modifiziert werden können.

4.6 Klassifikation

Die Verwendung der in den vorangegangenen Abschnitten diskutierten Mechanismen in MAC-Protokollen und Zugangsnetz-Systemvorschlägen aus der Literatur ist in Tab. 4.1 zusammengestellt. Die Tabelle gliedert sich in drei Teile zur Unterscheidung zwischen MAC-Protokollen für ATM-PONs für eine und für mehrere Verkehrsklassen sowie MAC-Protokollen für andere ATM-Zugangsnetze. Zu diesem letzten Teil gehören die Protokolle S^3R-HFC [12] und MLAP [23] für HFC-Netze und DSA++ [120] für ein mobiles Breitbandnetz (*Mobile Broadband System, MBS*).

Der in die Tabelle mit aufgenommene DAA-Algorithmus (*Dynamic Allocation Algorithm*) zur Zuweisung der Sendeberechtigungen verwendet die Bedarfsangaben zur Schätzung einer momentanen Ankunftsrate an jeder Zugangsstation. Die Anpassung dieser Rate an zeitvariante Ankunftsströme verursacht besonders bei büschelförmigem Verkehr und hoher Systemauslastung größere Zellverzögerungsschwankungen als vergleichbare Algorithmen, da am Ende der Aktivitätsphase einer Quelle viele Sendeberechtigungen ungenutzt bleiben. Dadurch verringert sich die für die anderen Stationen zur Verfügung stehende Übertragungskapazität, und die ATM-Zellen der anderen Stationen erfahren entsprechend höhere Durchlaufzeiten [95, 57].

Protokoll	Daten			Reservierung				BA-Inhalt				Formung				Prioritäten		
	stat. Mux.	reserviert	wahlfrei	period. BA	Leerlauf	an Datenzellen	wahlfrei	Phase	Aktivität	neue Ank.	Ank.-Muster	Phasensync.	im Bündel	im Zeitrahmen	explizit	Anzahl Klassen	stat. Priorität	WFQ
statisch [58]	x					x		x				x				1		
BAF-GF [31, 95]		x			x	x				x			x			1		
CPP [8]		x		x						x				x		1		
BPP [9]		x		x							x				x	1		
DAA [95]		x			x					x[1]				x[1]		1		
GF++ [116]		x			x	x				x			x[2]			1		
GF/3 [117]	x	x		x		x				x			x[2,3]			3	x	
SuperPON [11]	x	x		x		x			x[4]	x[5]				x		2[6]	x	
PACS [113, 116]		x		x		x				x			x[2]			2	x	
WFQ-MAC [36]		x		x		x				x						5		x
S^3R-HFC [12]	x	x				x	x	x	x			x				2	x	
MLAP [23]	x	x	x[7]			x	x		x[8]	x[5]						256	x	
DSA++ [120]		x				x	x	x[7]	x[7]	x[7]						1		

[1] Aus der Ankunftsinformation wird in der MAC-Instanz eine Zellrate geschätzt
[2] GCRA
[3] nur für die „ABR“-Verkehrsklasse
[4] in periodischen BA
[5] an Datenzellen
[6] zwei ATM-Klassen und zusätzliche Zeitschlitze für synchrone Schmalbanddienste
[7] als Option
[8] bei wahlfreiem Zugriff auf Mini-Zeitschlitze

Tabelle 4.1: *Klassifikation der MAC-Protokolle nach eingesetzten Mechanismen*

Kapitel 5

Leistungsbewertung der MAC-Mechanismen

Die in Kapitel 4 erläuterten Mechanismen für den Medienzugriff in ATM-Zugangsnetzen werden hier untersucht und verglichen. Zunächst wird in Abschnitt 5.1 der Einfluß des statischen Multiplexens von Datenzellen auf den Verkehr einer Station untersucht. Dazu wird ein neues Modell zur Beschreibung eines getakteten asynchronen Multiplexers eingeführt. Beim statischen Multiplexen kann kein Multiplexgewinn auf Zell- oder Büschelebene erzielt werden, so daß die Betrachtungen sich nur auf den von einer einzelnen Zugangsstation ausgehenden Verkehr erstrecken.

Die weiteren Mechanismen werden mit Szenarien untersucht, die eine größere Anzahl von Zugangsstationen einbeziehen, so daß auch das statistische Multiplexen auf der Zell- und der Büschelebene untersucht werden kann (zur Definition der Ebenen siehe [71]). Diese Szenarien werden in Abschnitt 5.2 eingeführt und die Vergleichsergebnisse für einen konzentrierten Multiplexer dargestellt. Zum Vergleich der Medienzugriffsmechanismen wird zunächst der Mittelwert und das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit betrachtet. Zusammen mit dem Minimum der Durchlaufzeit von 3τ erhält man aus dem Quantil ein Maß für die Zweipunkt-Zellverzögerungsschwankungen, die wiederum die Mindestverzögerung angeben, wenn zwischen dem Zugangsnetz und dem Weitverkehrsnetz zusätzlich eine externe Verkehrsformung durchgeführt wird.

In Abschnitt 5.3 wird zunächst das Einplanen von BA-Blöcken (vgl. Abschn. 4.3.2) in Kombination mit der Option der Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen näher untersucht. Das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit der ATM-Zellen vom Eintritt in die Zugangsstation bis zum Erreichen der Kopfstation wird verglichen zwischen zyklischen BA-Blöcken, begrenzten BA-Zyklen und der Verwendung von BA-Blöcken nur im Leerlauf.

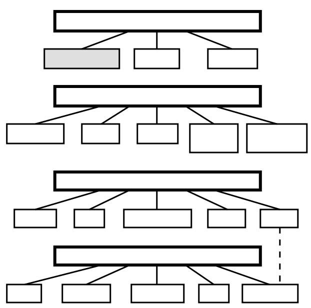
Der Einsatz von Vielfachzugriffsverfahren zum wahlfreien Zugriff auf Zeitschlitze zur Übertragung von Bedarfsangaben wird in Abschnitt 5.4 untersucht. Nach einer Darstellung der Randbedingungen des Verfahrens und des simulierten Stationsmodells werden Durchlaufzeitverteilungen und -quantile für die Referenzszenarien mit den Ergebnissen aus Abschnitt 5.3 verglichen.

Die in Abschnitt 4.3.1 vorgestellten binären Aktivitätsangaben, zu deren Übertragung keine vollständige Synchronisation des Empfängers nötig ist, werden in Abschnitt 5.5 im Einsatz sowohl als Ersatz für die Bedarfsangaben aus Abschnitt 5.3 als auch für die wahlfreien Bedarfsmeldungen aus Abschnitt 5.4 untersucht und mit diesen wieder anhand der Referenzszenarien verglichen.

In Abschnitt 5.6 wird die Wirkung der verschiedenen Mechanismen zur Formung von Verkehrsprofilen untersucht. Dazu wird die Verteilung der Einpunkt-Zellverzögerungsschwankungen als Maß für die Wirksamkeit der Mechanismen herangezogen. Einige wesentliche Abhängigkeiten der Leistungsgrößen von grundlegenden Systemparametern werden schließlich in Abschnitt 5.7 zusammengestellt.

5.1 Statisches Multiplexen

Beim statischen Multiplexen wird jeder Zugangsstationen im Zeitmultiplex ein eigener Kanal in der Rückrichtung zur Verfügung gestellt. Daher hat, im Gegensatz zu den in den folgenden Abschnitten untersuchten Mechanismen, der von anderen Zugangsstationen übertragene Verkehr keinen wesentlichen Einfluß auf die Verzögerungszeiten, die der Verkehr einer betrachteten Zugangsstation erfährt. Die Einordnung des statischen Multiplexens in die Klassifikation aus Abb. 4.1 zeigt Abb. 5.1.



Datenübertragung:
statisches TDM je Zugangsstation
Übertragung von Reservierungen:
keine
Inhalt der Bedarfsangaben:
keine Bedarfsangaben
Formung des Verkehrsprofiles:
keine

Abb. 5.1: *Eingesetzter Mechanismus beim Statischen Multiplexen.*

Zur Beschreibung der zyklischen Bedienung der Zugangsstationen wird zunächst in Abschnitt 5.1.1 ein analytisches Modell eines getakteten Multiplexers vorgestellt, das es erlaubt, den Einfluß der Periode der Sendeberechtigungen auf die Ensemble-Durchlaufzeitverteilung mehrerer Quellen an einer Zugangsstation zu bestimmen.

5.1.1 Das Modell n*D/C/1

Für die in der Rückrichtung zu übertragenden ATM-Zellen stellt die Zugangsstation einen Schalter dar, der periodisch mit der Periode h_D geschlossen wird und dabei jeweils maximal einer ATM-Zelle den Übertragungskanal zur Kopfstation freigibt, s. Abb. 5.2 a. Diese Bedienstrategie der Warteschlange entspricht der von Polling-Systemen her bekannten „begrenzten“ Bedienung mit der Grenze 1 (*limited-1*). Die Durchlaufzeit durch das Zugangsnetz ist also die Summe aus der Wartezeit bis zur Übertragung, der Übertragungsdauer und der Laufzeit τ auf dem Medium. Der einzige variable Anteil darin – die Wartezeit bis zur Übertragung – ist identisch mit der *Wartezeit* in einem Ersatzmodell, das eine getaktete Bedieneinheit mit der deterministischen Bediendauer h_D anstelle des Schalters enthält. Dieses Modell ist in Abb. 5.2 b dargestellt. Die Kombination aus einem mit der Periode h_D geschlossenen Schalter und einer Bedieneinheit mit der konstanten Bediendauer h_D soll im folgenden durch die in Abb. 5.2 b dargestellte „C“-Bedieneinheit zusammengefaßt und symbolisiert werden.

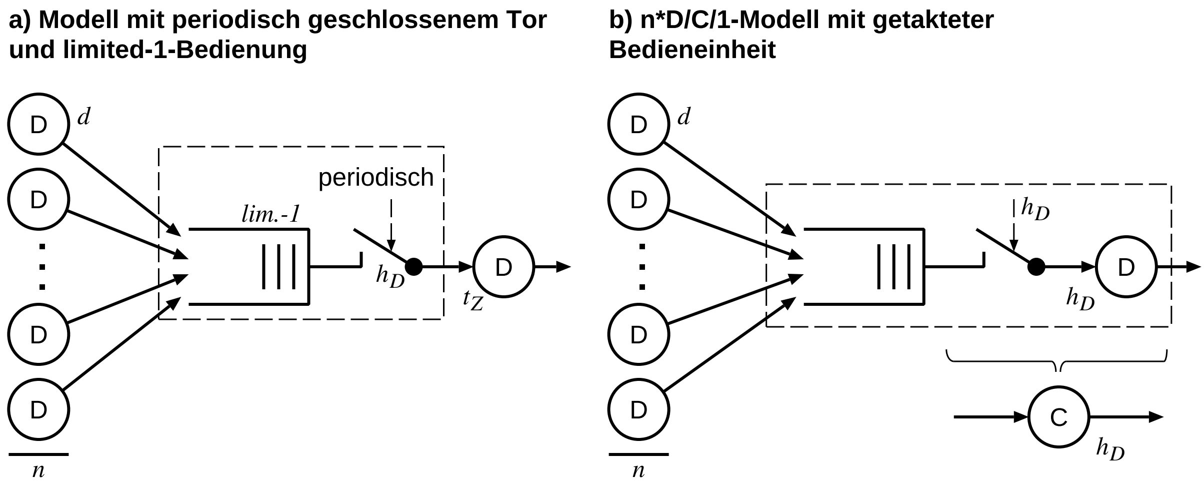


Abb. 5.2: *a) Modell für statisches Multiplexen: getaktetes Tor mit 1-begrenzter Abfertigung; b) n*D/C/1-Modell als Ersatzmodell für die Wartezeit.*

Aus der Literatur ist für das Multiplexen mehrerer periodischer Zellströme das n*D/D/1-Modell bekannt [46, 62, 148, 131, 130]. Die Analyse liefert die Ensemble-Verteilung der virtuellen Wartezeit in einem asynchronen Multiplexer, dessen Eingangsverkehr von n periodischen Quellen erzeugt wird und der jede Anforderung mit der Bediendauer h_D bedient. Anforderungen, die in ein leeres System eintreffen, werden dabei sofort bedient. Bei der Anwendung dieses Modells zur Beschreibung eines in Wirklichkeit getakteten ATM-Multiplexers stellt diese Eigenschaft eine kleine, aber meist vernachlässigbare Abweichung dar.

In dem hier zu untersuchenden Szenario kann die Dauer der Bedienperiode h_D jedoch eine große Anzahl von Zeitschlitzen betragen, so daß der Unterschied zwischen der klassischen freilaufenden und der eigentlich vorliegenden getakteten Bedienung wesentlich wird. Daher wurde das in Anhang A.1 vorgestellte n*D/C/1-Modell[1] analysiert. Ausgehend von einer neuen Definition der virtuellen Wartezeit für getaktete Systeme wird die Laplace-Transformierte der Verteilungsdichtefunktion der virtuellen Wartezeit im n*D/C/1-System hergeleitet (A.9). Durch Laplace-Rücktransformation der einzelnen Terme erhält man die Verteilungsdichtefunktion der virtuellen Wartezeit als Summe von abschnittsweise definierten Funktionen (A.10). Auch der Erwartungswert (A.19) und die Varianz (A.21) der virtuellen Wartezeit lassen sich aus der Laplace-Transformierten leicht berechnen. Die entsprechenden Größen der tatsächlichen Wartezeit in einem n*D/C/1-System sind jeweils identisch mit den Größen für die virtuelle Wartezeit in einem $(n-1)$*D/C/1-System. Die Übereinstimmung zwischen Analyse- und Simulationsergebnissen wird in den Abschnitten 3.3.2.4 und 5.2.3 gezeigt.

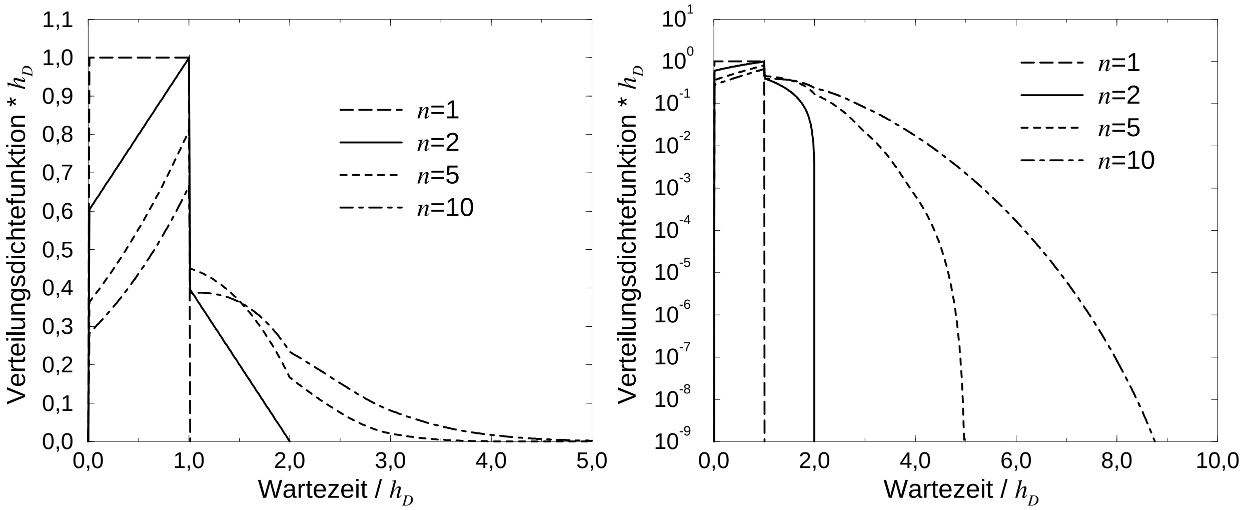


Abb. 5.3: *VDF der Wartezeit in einem n*D/C/1-System mit $n = 1/2/5/10$ Quellen und einem Angebot von 80%; Links: linearer Maßstab. Rechts: logarithmischer Maßstab.*

Abb. 5.3 zeigt die Verteilungsdichtefunktion der Wartezeit im n*D/C/1-System mit 1, 2, 5 oder 10 Quellen bei einem Angebot von $nh_D/d = 80\%$ im linearen (links) und im logarithmischen Maßstab (rechts). Die Größe d ist die Periodendauer der Quellen. Im linearen

[1] Die Bezeichnung „C“ für eine getaktete (*clocked*) Bedieneinheit in der Kendallschen Notation für Bediensysteme wird aus der Literatur [101] übernommen. Sie sollte nicht mit der Bezeichnung „CK“ oder „Cn“ für das Coxsche Phasenmodell verwechselt werden.

Maßstab ist der Einfluß der Wartezeit bis zum nächsten Taktzeitpunkt der Bedieneinheit deutlich im Bereich zwischen 0 und h_D zu sehen. Speziell im Fall $n=1$ unterscheidet sich das n*D/C/1-System deutlich von dem klassischen n*D/D/1-System: im klassischen System mit freilaufender Bedieneinheit werden die Anforderungen aus einer einzelnen Quelle niemals warten müssen, während sich mit einer getakteten Bedieneinheit für $n=1$ die erwartete Gleichverteilung der Wartezeit in Abb. 5.3 zeigt.

Diese Gleichverteilung zwischen 0 und h_D beschreibt die Wartezeit der Zellen einer einzelnen periodischen Quelle an einer Zugangsstation beim statischen Multiplexen. Um alle Zellen der Quelle verlustfrei übertragen zu können, muß die Bedienperiode h_D kürzer als die Quellenperiode d sein, oder die Quelle muß auf die Bedienung synchronisiert sein, was in einem asynchronen Netz nicht vorgesehen ist (vgl. Abschnitt 4.4.1). Der Bereich größerer Wartezeiten in der Ensemble-Wartezeit-VDF ist in der logarithmischen Darstellung in Abb. 5.3 rechts für größere n deutlicher zu unterscheiden, während der Verlauf der Verteilungsfunktion bei kleinen Wartezeiten in der linearen Darstellung links besser zu erkennen ist.

5.1.2 Vergleich zwischen n*D/C/1 und n*D/D/1

In Abb. 5.4 ist die komplementäre Ensemble-Verteilungsfunktion der Wartezeit in einem n*D/C/1-System und in einem n*D/D/1-System dargestellt. Der Unterschied der Wartezeit in den beiden Systemen, der beim selben Ankunftsprozeß bis zu eine Taktperiode ausmachen kann, ist auch in der Ensemble-Wartezeitverteilung deutlich zu sehen. Das Maximum der Wartezeit liegt im getakteten System bei $n \cdot h_D$, während es bei freilaufender Bedieneinheit $(n-1)h_D$ beträgt.

In den im folgenden Abschnitt betrachteten Systemen sind Wartezeiten relevant, die in der Größenordnung einer Zeitschlitz-Dauer und damit eines Bruchteiles der Bedientakt-Periode liegen. Daher sollte hier, wie auch für Untersuchungen an ATM-Multiplexern mit einer kleinen Anzahl n von Quellen, das korrekte getaktete Modell n*D/C/1 anstelle des klassischen n*D/D/1-Modells eingesetzt werden.

5.1.3 Zusammenfassen von Verkehrsströmen

Wenn in einem Zugangsnetz mit statischem Multiplexen der Datenzellen die Wartezeit in der Zugangsstation verringert werden soll, muß die Taktperiode h_D der Sendeberechtigungen für diese Zugangsstation verringert werden. Da dies bei einer Quelle mit geringer Zellrate

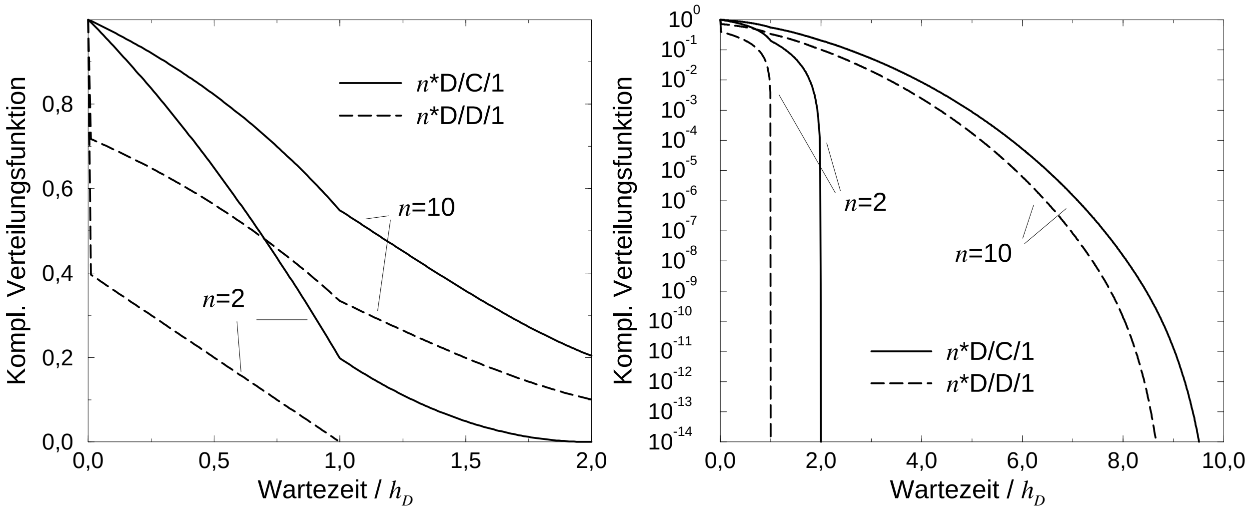


Abb. 5.4: *Vergleich der komplementären Ensemble-Wartezeitverteilungen in einem n*D/C/1-System und einem n*D/D/1-System. Das Angebot ist $nh_D/d = 80\%$ bei $n = 2$ bzw. 10 Quellen. Links: linearer Maßstab. Rechts: logarithmischer Maßstab.*

eine Verschwendung von Übertragungskapazität in der Rückrichtung bedeutet, wird hier untersucht, wie die Wartezeit beziehungsweise ihr (1-10^{-8})-Quantil[2] abnimmt, wenn sich mehrere Quellen an einer Zugangsstation die Bedienung durch entsprechend häufigere Sendeberechtigungen teilen.

Die Auslastung des durch die Sendeberechtigungen vergebenen Kanals in der Rückrichtung beträgt $\rho_{ZSt} = nh_D/d$. Die maximale Wartezeit in der Zugangsstation ist nach (A.25) durch das Produkt $n \cdot h_D$ gegeben, das bei konstanter Auslastung und Quellenperiode unabhängig von der Anzahl der Quellen ist:

$$\max(W_n) = nh_D = d \cdot \rho_{ZSt} \tag{5.1}$$

Je größer die Anzahl der gemeinsam bedienten Quellen an einer Zugangsstation ist, um so geringer wird die mittlere Wartezeit und auch das (1-10^{-8})-Quantil der Wartezeit. Dieser Zusammenhang ist in Abb. 5.5 für Auslastungen ρ_{ZSt} von 50, 80 und 95% dargestellt. Die Wartezeit ist dabei auf die Quellenperiode d normiert. Die Werte für nicht-ganzzahlige n sind nur zur besseren Übersicht interpoliert. Allerdings ist in Abb. 5.5 auch zu sehen, daß die Anzahl der an einer Zugangsstation gemeinsam bedienten Quellen auf die mittlere Wartezeit einen wesentlich größeren Einfluß hat als auf das (1-10^{-8})-Quantil der Wartezeit. Das (1-10^{-8})-Quantil der Wartezeit kann nur durch eine Verringerung der Auslastung ρ_{ZSt} wesentlich reduziert werden, wie bereits Gleichung (5.1) zeigt. Quantile und Erwartungswerte der Wartezeit sind in Abb. 5.6 als Funktion von ρ_{Zst} dargestellt.

[2]Anstelle des absoluten Maximums der Durchlaufzeit wird das (1-10^{-8})-Quantil als Maß für die mit großer Wahrscheinlichkeit größte Durchlaufzeit betrachtet, wenn die Ergebnisse analytisch gewonnen werden. Bei Simulationsergebnissen wird stattdessen das (1-10^{-5})-Quantil verwendet.

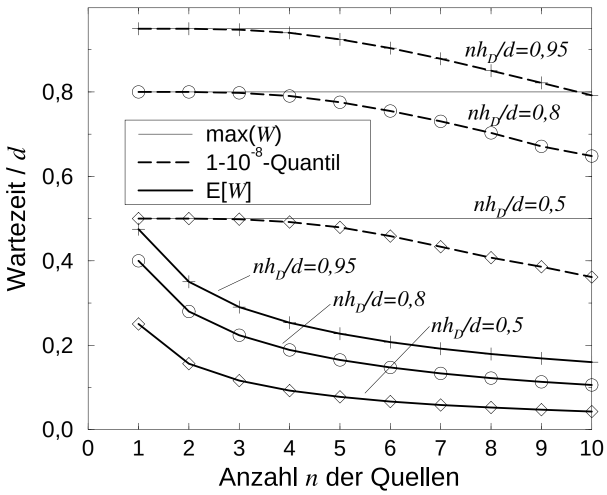


Abb. 5.5: *Maximum, (1-10^{-8})-Quantil und Erwartungswert der Wartezeit im System n*D/C/1 als Funktion der Anzahl der Quellen bei einem Angebot von 0,5/0,8/0,95.*

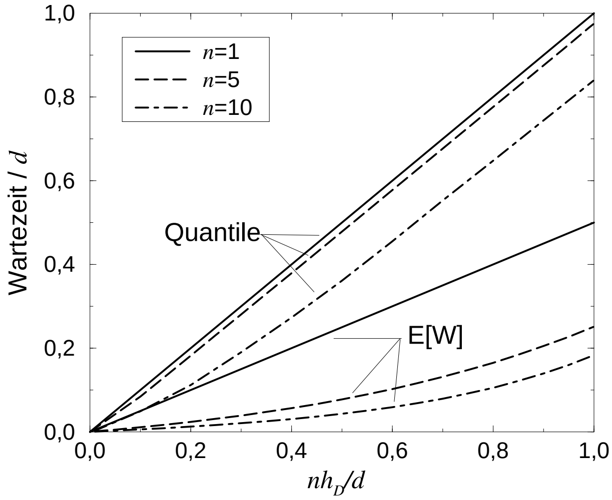


Abb. 5.6: *(1-10^{-8})-Quantil und Erwartungswert der Wartezeit im System n*D/C/1 als Funktion des Angebotes bei* $n = 1/5/10$ *Quellen.*

Bei der Anwendung des n*D/C/1-Modelles wurde davon ausgegangen, daß der betrachtete periodische Zellstrom (*Constant Cell Rate, CCR*) mit Verkehr aus gleichartigen Quellen zusammengefaßt wird. Wenn der betrachtete Zellstrom stattdessen mit Verkehr von variabler Zellrate (*Variable Cell Rate, VCR*) zusammengefaßt wird und die Rate der Sendeberechtigungen mindestens der Summe der Spitzenzellraten der Verkehre entspricht, können ohne weitere Untersuchungen die folgenden beiden Aussagen gemacht werden:

- Im ungünstigsten Fall ist die Wartezeit durch $\rho_{ZSt} \cdot d$ beschränkt, wenn der VCR-Verkehr ständig seine Spitzenzellrate benötigt.
- Wenn der VCR-Verkehr zeitweise Zellraten unterhalb der Spitzenzellrate annimmt, dann werden nicht alle Sendeberechtigungen benötigt, und die Wartezeit für die Zellen der betrachteten periodischen Quelle ist entsprechend geringer.

5.1.4 Ratenanpassung

Die Ergebnisse der oben ausgeführten Untersuchungen treffen in gleicher Weise auf das in Abschnitt 2.7.1.1 erwähnte Problem der Ratenanpassung in der Verteilrichtung von Zugangsnetzen zu. Dort ist allerdings die Bedienperiode t_D durch die Übertragungsgeschwindigkeit des Kanals in der Verteilrichtung festgelegt, so daß nur beim Verbindungsaufbau die Verbindungsannahmefunktion entscheiden muß, ob bei der Annahme einer neuen Verbindung das dann auftretende Angebot noch akzeptiert werden kann. Außerdem haben die vom Weitverkehrsnetz kommenden Verkehrsströme meist bereits mehrere Vermittlungsknoten durchlaufen, so daß der Verkehr nicht mehr exakt dem n*D-Modell entspricht.

5.2 Der konzentrierte Multiplexer zum Vergleich

Wenn alle Teilnehmer über einen lokalen Vermittlungsknoten anstelle eines Zugangsnetzes an das Weitverkehrsnetz angeschlossen wären, würden ihre Verkehrsströme in einem räumlich konzentrierten asynchronen Multiplexer zusammengefaßt, der ohne Medienzugriffsverfahren und zusätzliche Verzögerungen die ATM-Zellen der Teilnehmeranschlüsse in der Reihenfolge ihres Eintreffens auf die Ausgangsleitung gibt. Dieser soll hier als Vergleichsbasis für die nicht zu vermeidenden Zellverzögerungsschwankungen verwendet werden, die durch die gleichzeitige Ankunft mehrerer ATM-Zellen von verschiedenen Teilnehmeranschlüssen während eines Zeitschlitzes der abgehenden Leitung entstehen.

5.2.1 Verkehrstheoretisches Modell

In Abb. 5.7 a ist die Übermittlungsfunktion des Zugangsnetzes für ATM-Zellen in der Rückrichtung schematisch dargestellt. An n_0 Zugangsstationen können jeweils mehrere Verkehrsquellen ATM-Zellen erzeugen. Diese werden in der Warteschlange ihrer Zugangsstation zwischengespeichert, bis die Zugangsstation, über die Medienzugriffssteuerung (MAC) gesteuert, die Zellen an die Kopfstation weitergibt. Für die Medienzugriffssteuerung werden, abhängig von den eingesetzten Mechanismen, mehrere Meldungen zwischen den Zugangsstationen und der Kopfstation ausgetauscht.

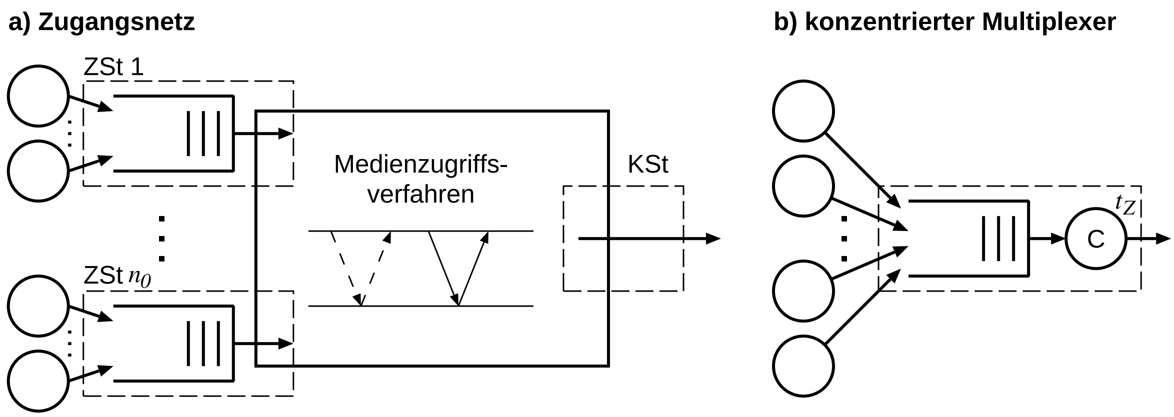


Abb. 5.7: *Konzentrierter Multiplexer (rechts) als Vergleichsmodell für die Rückkanäle eines ATM-Zugangsnetzes (links) zwischen den Zugangsstationen (ZSt) und der Kopfstation (KSt).*

Wenn nur die Zellverzögerungsschwankungen betrachtet werden sollen, die durch die gleichzeitige Ankunft mehrerer ATM-Zellen von verschiedenen Teilnehmeranschlüssen entstehen, dann kann der mit dem Zeitschlitztakt getaktete, räumlich konzentrierte Multiplexer in Abb. 5.7 b als Vergleichsmodell eingesetzt werden. Hier treffen die ATM-Zellen aller Quellen direkt in der zentralen Warteschlange des Multiplexers ein. Die Bedieneinheit des Multiplexers hat die Dauer t_Z eines Zeitschlitzes im Zugangsnetz (a) als Bediendauer. Genaugenommen müßten die Quellen zunächst nach Zugangsstationen gruppiert werden, so daß in jedem Zeitschlitz von jeder Zugangsstation nur je eine ATM-Zelle in die zentrale Warteschlange abgegeben werden kann. Da die zentrale Bedieneinheit jedoch je Zeitschlitz ohnehin nur eine ATM-Zelle abarbeiten kann und das Gesamtsystem nicht unter Überlastbedingungen betrachtet wird, sollte diese Vereinfachung keinen großen Einfluß auf die Ergebnisse haben.

5.2.2 Verkehrsszenarien

Für den Vergleich der verschiedenen Mechanismen der Medienzugriffsverfahren werden zunächst vier Verkehrsszenarien definiert. Sie sollen die Leistung der Medienzugriffsverfahren für Quellen mit geringer oder mit hoher Zellrate sowie für Quellen mit konstanter (*Constant Cell Rate, CCR*) oder mit variabler (zeitweise konstanter) Zellrate (*Variable Cell Rate, VCR*) zeigen. Diese Quellen werden ohne weiteren Bezug zu realen Diensten der Breitbandkommunikation so definiert, daß die Unterschiede der Verfahren sichtbar sind.

In einem Zugangsnetz mit einer einfachen Laufzeit von $\tau = 18 t_Z$ (Parameter aus Abschnitt 2.7.3.4) können an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelte Bedarfsangaben (vgl. Abb. 4.6) eingesetzt werden, wenn die Quellenperiode $t_Q \leq 36 t_Z + t_{PW}$ ist. Um hier einen klaren Unterschied zu sehen, wird die Quellenperiode für die Quelle mit geringer Zellrate zu $t_Q = 100 t_Z$ und für die Quelle mit hoher Zellrate zu $t_Q = 10 t_Z$ gewählt.

Die Quellen mit variabler Zellrate sollen vom „Talkspurt-Silence"-Typ (TS) sein. Sie erzeugen eine gewisse, geometrisch verteilte und durch die Büschellänge C_B gegebene Anzahl von Zellen in konstantem zeitlichem Abstand t_Q. Daran schließt sich eine Pause an, deren Dauer negativ-exponentiell verteilt ist. Das Verhältnis der Zellrate im Büschel (Spitzenzellrate) zur mittleren Zellrate über lange Zeit ist durch den Büschelfaktor b gegeben. Die Spitzenzellraten der VCR-Quellen entsprechen denen der CCR-Quellen. Die mittlere Büschellänge wird so gewählt, daß ein Büschel im Mittel mehrere Rundlaufzeiten lang andauert, so daß das Medienzugriffsverfahren einen „eingeschwungenen" Zustand erreichen kann. Bereits bei einem Büschelfaktor $b = 2$ sind die Pausendauern dadurch im Mittel so lang, daß die Zugangsstation wieder in einen definierten Ruhezustand bezüglich des Medienzugriffs gelangt. Analog zu den CCR-Quelltypen werden so zwei VCR-Quelltypen definiert, die in ihren Spitzenzellraten den CCR-Quellen entsprechen.

Name		ND100	ND10	TS100	TS10
Quellenperiode	t_Q/t_Z	100	10	100	10
Büschelfaktor	b	1	1	2	2
mittlere Büschellänge	c_B	–	–	10	20
Stationen insgesamt	n_0	128	128	128	128
aktive Stationen	n	80	8	70	10
Quellen pro Station	b_Q	1	1	2	1
Angebot in %	A_R	80	80	70	50
Multiplexgewinn	$b \cdot A_R$	0,8	0,8	1,4	1,0

Tabelle 5.1: *Definition der Verkehrsszenarien.*

Die Quellenparameter sind im oberen Teil von Tab. 5.1 zusammengestellt. Mit diesen Quellen werden nun quasi-symmetrische Verkehrsszenarien definiert, in denen alle n aktiven Zugangsstationen im Zugangsnetz dieselbe Quellenkonfiguration haben. Im unteren Teil von Tab. 5.1 finden sich die für die Konfiguration wesentlichen Angaben. Die für das Einplanen der Bedarfsangaben maßgebliche Gesamtzahl der Stationen betrage $n_0 = 128$. Die Anzahl n der aktiven Stationen und die Anzahl b_Q der Quellen an jeder aktiven Zugangsstation werden so gewählt, daß das Angebot $A_R = 80\%$ beträgt.

Das Angebot von VCR-Quellen wird so dimensioniert, daß die Verlustwahrscheinlichkeit durch gleichzeitig auftretende Zellbüschel in einem Multiplexer ohne Pufferspeicher bei 10^{-9} liegen würde. Die Anzahl gleichzeitig aktiver unabhängiger Quellen ist durch eine Binomialverteilung gegeben:

$$\mathrm{P}\{k \text{ von } n \text{ Quellen aktiv}\} = p_k = \binom{n}{k} \left(\frac{1}{b}\right)^k \left(1 - \frac{1}{b}\right)^{n-k} \tag{5.2}$$

Nach [130, (7.1.5)] erhält man daraus die Verlustwahrscheinlichkeit

$$P_{Verl} = \frac{b}{n} \sum_{k=\lceil n_{SZR} \rceil}^{n} p_k \cdot (k - n_{SZR}) \quad . \tag{5.3}$$

Dabei ist $n_{SZR} = t_Z/t_Q$ die Anzahl von Quellen, die, wenn sie ausschließlich im aktiven Zustand wären, den Multiplexer zu 100 % auslasten würden.

Mit den oben festgelegten Parametern erhält man für die beiden VCR-Quelltypen $n_{SZR} = 100$ beziehungsweise $n_{SZR} = 10$. Daraus ergeben sich mit der Randbedingung $P_{Verl} < 10^{-9}$ maximale Quellenzahlen von $n = 140$ bzw. $n = 10$ und damit ein mittleres Angebot von 70 % bzw. 50 %. Um 140 Quellen im Szenario TS100 quasi-homogen in einem Zugangsnetz mit 128 Stationen zu verteilen, werden 70 aktive Stationen mit je zwei Quellen vorgesehen.

5.2.3 Wartezeiten im konzentrierten Multiplexer

Die Verteilung der Wartezeiten in einem konzentrierten Multiplexer für die oben definierten Szenarien ist in den Abbildungen 5.8 und 5.9 dargestellt. Die lineare Darstellung der Verteilungsdichtefunktion (links) zeigt jeweils besser die auftretenden Effekte, während sich in der logarithmischen Darstellung der komplementären Verteilungsfunktion (rechts) die Wahrscheinlichkeiten für sehr große Wartezeiten besser erkennen lassen.

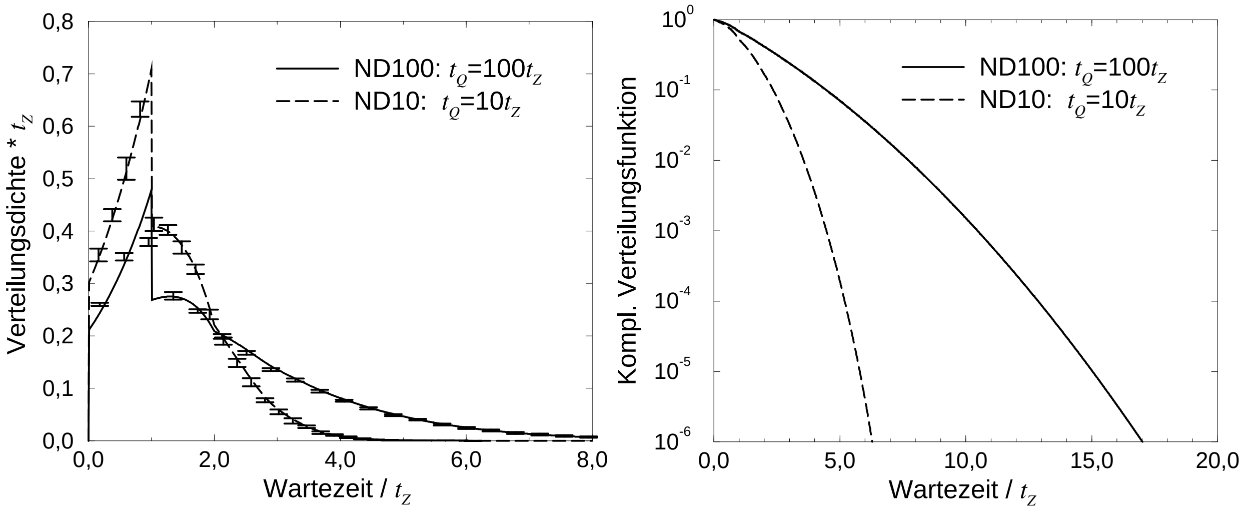


Abb. 5.8: *Verteilungsdichtefunktion (links) und komplementäre Verteilungsfunktion (rechts) der Wartezeit in einem n*D/C/1-System mit den Szenarien ND100 und ND10. Linien: Analyse; Vertrauensintervalle: Simulation.*

Die Verteilungsdichtefunktionen der Wartezeiten für die Szenarien ND100 und ND10 in Abb. 5.8 wurden aus der Analyse des in Abschnitt 5.1.1 beschriebenen und in Anhang A.1 analysierten n*D/C/1-Modells gewonnen und nach Gleichung (A.10) berechnet. In der Simulation des getakteten Multiplexers wurde die Wartezeitverteilung in 400 Klassen aufgezeichnet und durch Multiplikation mit der Klassenbreite in eine disktrete Näherung für die Verteilungsdichtefunktion umgerechnet, vgl. [93]. Die 95%-Konfidenzintervalle sind aus Gründen der besseren Übersichtlichkeit nur für jeden zehnten Wert eingezeichnet. Es besteht eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus Simulation und Analyse. Die besonders große Häufigkeit von Wartezeiten bis zu einer Zeitschlitzdauer ist charakteristisch für die getaktete Bedienung in Verbindung mit asynchronen Ankünften in einem Multiplexer mit einem Verkehrsangebot von weniger als 100 %.

Der Unterschied der Quellenperioden ist in der logarithmischen Darstellung der komplementären Verteilungsfunktion der Wartezeit in Abb. 5.8 deutlich zu sehen: Bei gleicher Auslastung des Multiplexers treten bei einer großen Quellenperiode größere Extremwerte der Wartezeit auf als bei einer kleinen Quellenperiode. Die absoluten Maxima liegen nach (A.25) bei nt_Z, also bei 80 beziehungsweise acht Zeitschlitzdauern.

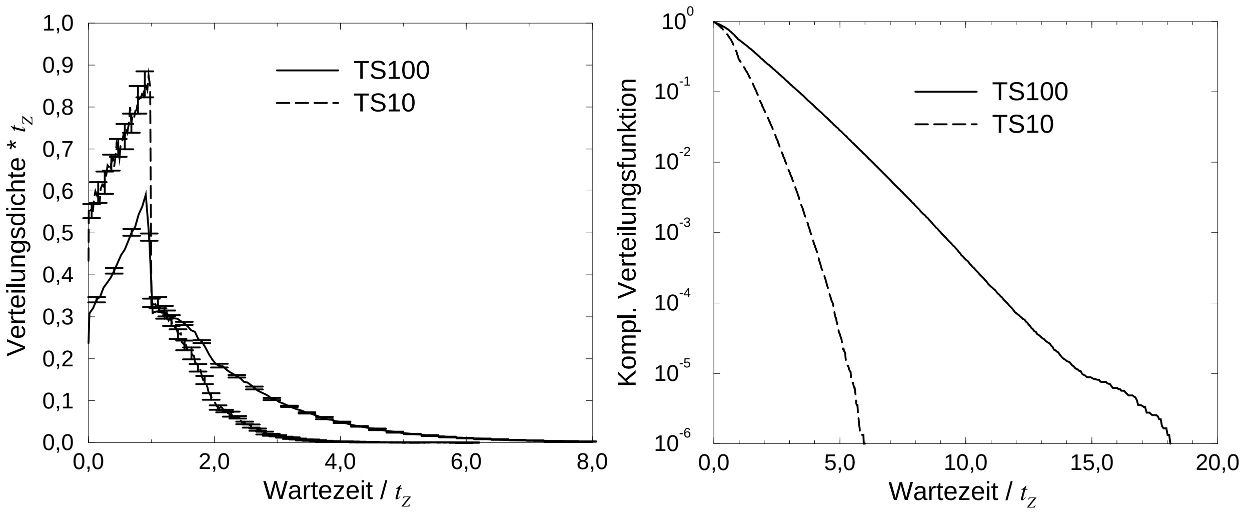


Abb. 5.9: *Verteilungsdichtefunktion (links) und komplementäre Verteilungsfunktion (rechts) der Wartezeit in einem konzentrierten Multiplexer mit den Szenarien TS100 und TS10 (Simulationsergebnisse).*

Die Ergebnisse der ND-Szenarien werden durch die Simulationsergebnisse der TS-Szenarien in Abb. 5.9 bestätigt. Auch hier sind sehr lange Wartezeiten bei langer Quellenperiode häufiger anzutreffen als bei kurzer Quellenperiode. Zusätzlich ist im Bereich großer Wartezeiten im Szenario TS100 ein Effekt der Büschelebene zu sehen: größere Wartezeiten treten auf, wenn sehr viele Quellen gleichzeitig aktiv sind, so daß der Multiplexer zeitweise in Überlast gerät [130, 100]. Dieser Effekt ist umso stärker ausgeprägt, je größer der Büschelfaktor des betrachteten Verkehrs und je größer das Verkehrsangebot ist.

5.3 Einplanen der Bedarfsangaben-Blöcke und Kopplung an Datenzellen

In diesem Abschnitt wird das Einplanen der Bedarfsangaben-Blöcke und der Einfluß von zusätzlich an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben untersucht. Die eingesetzten Mechanismen nach Abb. 4.1 sind in Abb. 5.10 zusammengestellt. Es werden drei Strategien der Einplanung von Bedarfsangaben-Blöcken betrachtet: zyklische Bedarfsangaben-Blöcke („zyklisch“), Bedarfsangaben-Blöcke im Leerlauf mit begrenzter Zyklusdauer („begrenzt“) und Bedarfsangaben-Blöcke im Leerlauf („Leerlauf“). Bei zyklischen Bedarfsangaben-Blöcken wird außerdem noch unterschieden, ob zusätzlich an die ATM-Zellen der Rückrichtung noch Bedarfsangaben-Felder gekoppelt sind oder nicht („zyklisch o. Koppl.“). Bei den anderen beiden Strategien werden immer Bedarfsangaben-Felder an die ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelt. Dadurch ergeben sich insgesamt vier Strategien, die in den Abschnitten 5.3.4 und 5.3.5 verglichen werden.

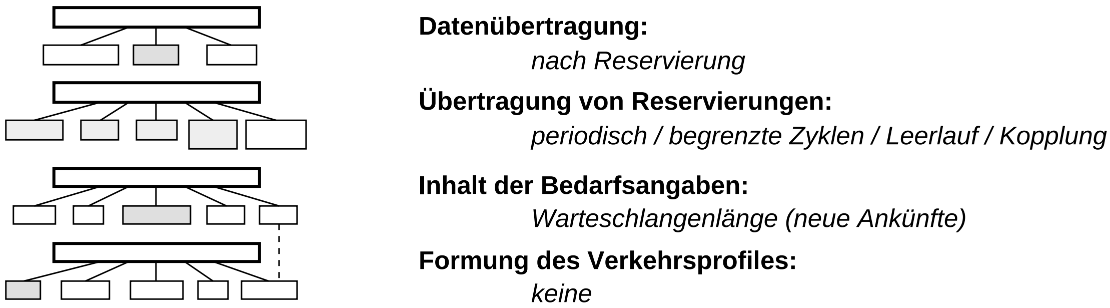


Abb. 5.10: *Eingesetzte Mechanismen.*

Bei der zyklischen Abfrage der Zugangsstationen wird ein Teil ρ_P der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität zur Übertragung der Bedarfsangaben-Blöcke in der Rückrichtung eingesetzt. Je größer dieser Teil ist, um so häufiger können Zugangsstationen ihren Zustand an die Kopfstation melden. Andererseits ist die maximale Übertragungskapazität für ATM-Zellen um den entsprechenden Anteil verringert. Um ein Optimum für ρ_P zu finden, wird der Mittelwert und das (1-10^{-5})-Quantil der Ende-zu-Ende-Verzögerung der ATM-Zellen in der Rückrichtung eines Zugangsnetzes in den verschiedenen Szenarien aus Tab. 5.1 als Funktion von ρ_P dargestellt. Dazu werden das im folgenden Abschnitt 5.3.1 beschriebene analytische Modell und das in Abschnitt 5.3.3 vorgestellte Simulationsmodell verwendet.

5.3.1 Modell zur Analyse

Die gesamte Durchlaufzeit einer ATM-Zelle durch die Rückrichtung eines Zugangsnetzes, dessen Medienzugriff auf Bedarfsangaben beruht, besteht aus einer Summe von konstanten und variablen Beiträgen, die in Abb. 5.11 dargestellt sind. Die Ankunft einer ATM-Zelle an der Zugangsstation kann der Kopfstation erst mitgeteilt werden, wenn diese Zugangsstation eine Sendeberechtigung für eine Bedarfsangabe empfängt, oder wenn sie eine Sendeberechtigung für ATM-Zellen empfängt und Bedarfsangaben an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelt werden. Die Dauer der Zeitspanne von der Ankunft der ATM-Zelle an der Zugangsstation bis zum Absenden der ersten Bedarfsangabe, in der diese Ankunft der Kopfstation mitgeteilt wird, sei mit der Zufallsvariable T_{RW} bezeichnet. Die Bedarfsangabe kommt nach der Übertragungsdauer τ an der Kopfstation an und wird dort als Sendeberechtigung für die betrachtete Zugangsstation in die zentrale Warteschlange für Sendeberechtigungen eingereiht. Die Zufallsvariable T_{PW} beschreibe die Wartezeit der Sendeberechtigung in dieser Warteschlange. Wenn die Sendeberechtigung die Warteschlange verläßt, löst sie eine Laufzeit τ später die Übertragung der betrachteten ATM-Zelle von der Zugangsstation zur Kopfstation aus, so daß die ATM-Zelle nach einer weiteren Laufzeit τ die Kopfstation erreicht und dort das Zugangsnetz verläßt. Die konstanten Übertragungsdauern t_Z der Zellen und die Dauern von Verarbeitungsvorgängen innerhalb der Zugangsstationen und der Kopfstation seien in der Laufzeit τ bereits mit eingeschlossen.

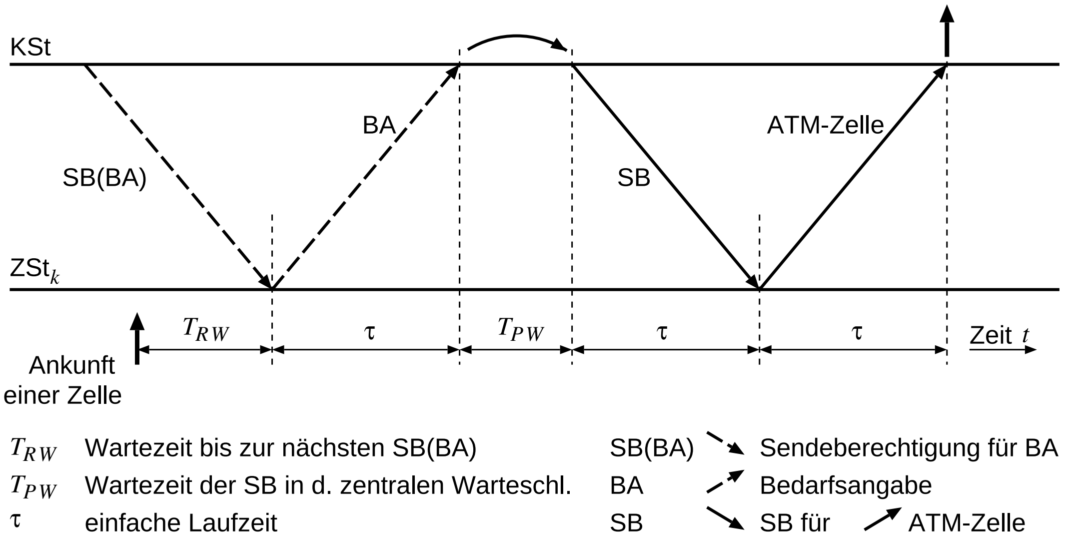


Abb. 5.11: *Beiträge zur Durchlaufzeit und Zufallsvariablen.*

Die gesamte Durchlaufzeit T_D ist damit durch die Summe (5.4) gegeben:

$$T_D = T_{RW} + T_{PW} + 3\tau \tag{5.4}$$

Die variablen Anteile T_{RW} und T_{PW} der Durchlaufzeit werden nun für Systeme mit zyklischen BA-Blöcken *ohne* Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen durch ein verkehrstheoretisches Modell beschrieben. Die konstanten Anteile von 3τ in der Durchlaufzeit werden nicht berücksichtigt, da sie keinen Einfluß auf die Zellverzögerungsschwankungen haben. Das Modell des $\mathrm{D}^{[GI]}/\mathrm{C}/1$-Systems mit zyklischer Auszeit ist in Abb. 5.12 dargestellt.

Die periodisch an den Zugangsstationen eintreffenden Sendeberechtigungen für BA-Blöcke und die entsprechende Übertragung der Bedarfsangaben an die Kopfstation werden durch den periodisch geschlossenen Schalter S_2 modelliert. Da in einem BA-Block nur die Bedarfsangaben von m Zugangsstationen Platz finden, müssen von $\lceil n_0/m \rceil$ Gruppen von Zugangsstationen BA-Blöcke übertragen werden. Die Warteschlangen der Zugangsstationen jeder Gruppe werden im Modell jeweils zu einer gemeinsamen Warteschlange zusammengefaßt. Die Auswahl der Gruppe von Zugangsstationen, von der die Bedarfsangaben übertragen werden, erfolgt zyklisch; dies ist in Abb. 5.12 durch den Schalter S_1 symbolisiert. In jedem Zyklus können nur die Bedarfsangaben von einer Gruppe von Zugangsstationen an die Kopfstation übertragen werden. Da ein BA-Block einen Zeitschlitz belegt, kann nicht gleichzeitig eine ATM-Zelle übertragen werden. Deshalb wird die getaktete Bedieneinheit

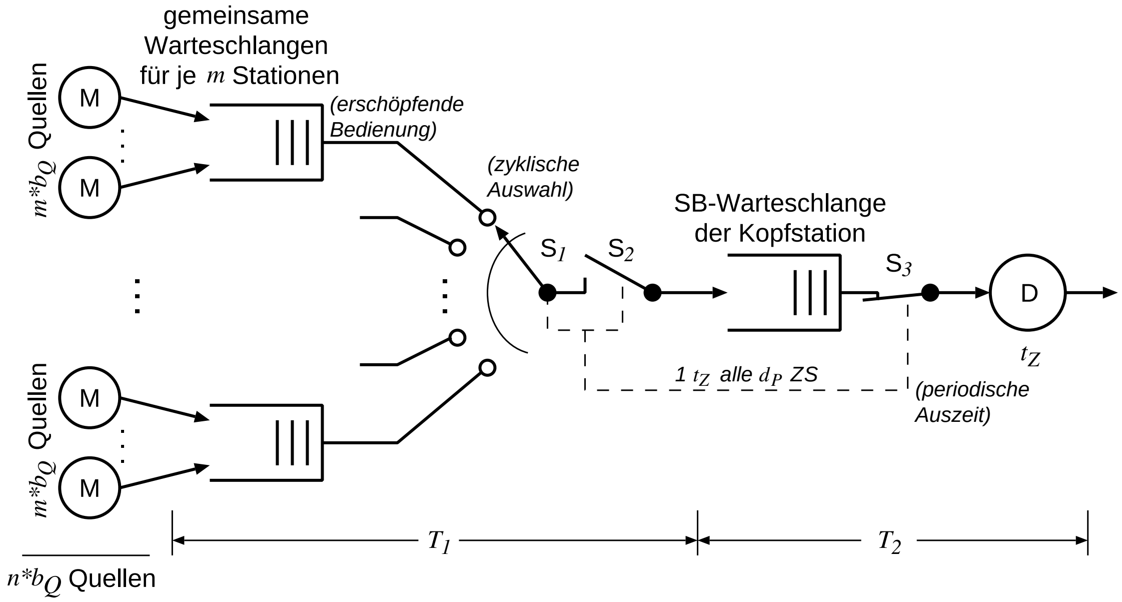


Abb. 5.12: *Modell für periodische BA-Blöcke ohne an ATM-Zellen gekoppelte Bedarfsangaben.*

(C) so modelliert, daß sie in jedem d_P-ten Zeitschlitz eine Auszeit (*Vacation*) von der Dauer eines Zeitschlitzes nimmt.

Anstelle der von den Quellen erzeugten ATM-Zellen behandelt das Modell nur Anforderungen, die mit dem BA-Block als Stapel (*Batch*) die Stationsgruppen-Warteschlange verlassen und daraufhin in die Warteschlange der Kopfstation eingereiht werden. Dort nehmen die Anforderungen die Rolle der Sendeberechtigungen ein, von denen in jedem Zeitschlitz eine aus der zentralen Warteschlange genommen wird. Die Auszeit der Bedieneinheit steht für das Absenden einer Sendeberechtigung für einen BA-Block.

Die Zufallsvariablen T_1 für die Wartezeit in einer Stationsgruppen-Warteschlange und T_2 für die Wartezeit in der zentralen Warteschlange der Kopfstation entsprechen somit den Wartezeiten T_{RW} und T_{PW} im Zugangsnetz. Andererseits wird der Warteprozeß der ATM-Zellen selbst in den Warteschlangen der Zugangsstationen nicht modelliert, da die Anforderungen im Modell die Warteschlangen der Zugangsstationen-Gruppen jeweils $2\tau + T_2$ früher verlassen als die entsprechende ATM-Zelle die reale Warteschlange ihrer Zugangsstation verläßt.

Die Wartezeit T_1 ist im Ensemble gleichverteilt zwischen 0 und t_P.

$$f_{T_1}(t) = \mathbf{1}\{t \in (0, t_{PE}]\} \tag{5.5}$$

Dies gilt allgemein für Ankunftsprozesse, die unabhängig vom Raster der periodischen BA-Blöcke sind.

Die effektive Abfrageperiode t_{PE} ist durch die Anzahl n_0 von Zugangsstationen im System, die Anzahl m von Bedarfsangaben je BA-Block und den Abstand t_P zwischen Sendeberechtigungen für BA-Blöcke bestimmt. Dieser bestimmt den Anteil ρ_P der für BA-Blöcke eingesetzen Übertragungskapazität:

$$\rho_P = \frac{t_Z}{t_P} \tag{5.6}$$

$$t_{PE} = \left\lceil \frac{n_0}{m} \right\rceil t_P = \left\lceil \frac{n_0}{m} \right\rceil \frac{t_Z}{\rho_P} \tag{5.7}$$

Die Verteilung der Wartezeit T_2 wird aus einem $\mathrm{D}^{[GI]}/\mathrm{D}/1$-Modell[3] eines Systems mit deterministischer Bediendauer, Gruppenankünften zu äquidistanten Zeitpunkten und zyklischen Auszeiten der Bedieneinheit berechnet [37]. Die Größen aufeinanderfolgender Gruppen müssen unabhängig sein, um die folgende Modellierung des Systems mit einer eingebetteten Markoff-Kette zu ermöglichen.

Die Gruppengröße ist durch die Anzahl von Ankünften an einer Gruppe von Zugangsstationen während der effektiven Abfrageperiode t_{PE} bestimmt. Wenn die Anforderungen aus jeder der $n \cdot b_Q$ Quellen einen mit Parameter λ_0 negativ-exponentiell verteilten Abstand haben, dann ist die Größe R der Gruppe von Anforderungen, die nach einem Intervall der Dauer t_{PE} von einer Gruppe von Zugangsstationen kommt, Poisson-verteilt. Der Parameter der Poisson-Verteilung ist $m b_Q \lambda_0 t_{PE}$. Wenn das Verhältnis n/m ganzzahlig ist, erhält man $m b_Q \lambda_0 t_{PE} = n b_Q \lambda_0 t_P = \lambda t_P$, wenn $\lambda = n b_Q \lambda_0$ die Summenrate aller Quellen ist.

$$\mathrm{P}\{R = r\} = \frac{(\lambda t_P)^r}{r!} \mathrm{e}^{-\lambda t_P} \tag{5.8}$$

Für periodische Quellen wurde in [37] die Verteilung von R angegeben. Die Verwendung dieser Verteilung stellt allerdings eine grobe Näherung dar, da die Folge der Gruppengrößen bei periodischen Quellen starke Korrelationen aufweist, die im $\mathrm{D}^{[GI]}/\mathrm{D}/1$-Modell vernachlässigt werden.

Die Methode zur Analyse der Verteilung der Durchlaufzeit T_2 im $\mathrm{D}^{[GI]}/\mathrm{D}/1$-System ist in [37] beschrieben und soll hier nur kurz skizzert werden. Wenn die Gruppengrößen der Ankünfte einen Erneuerungsprozeß darstellen, können am Beginn und Ende der Auszeiten der Bedieneinheit zwei Markoff-Ketten X und Y eingebettet werden, vgl. Abb. 5.13.

Aus den Übergangsgleichungen für die eingebetteten Markoff-Ketten erhält man ein lineares Gleichungssystem für die stationären Zustandswahrscheinlichkeiten der eingebetteten

[3] Da die Zeitpunkte der Gruppenankünfte fest an die Bedienperiode gekoppelt sind, muß hier nicht zwischen D- und C-Bedienung unterschieden werden.

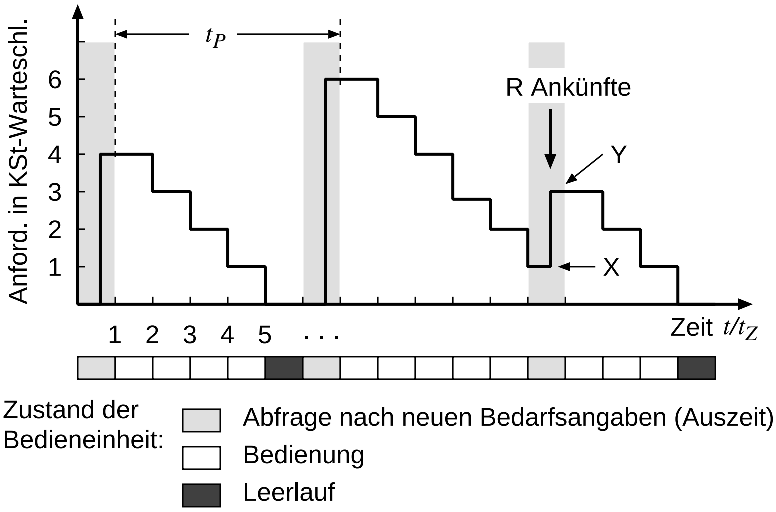


Abb. 5.13: *Beispiel für den Zustandsprozeß im $D^{[GI]}/D/1$-System mit periodischen Auszeiten.*

Markoff-Kette X bei der Gruppenankunft der Anforderungen. Über eine Betrachtung der Verteilung der Eintrittspositionen einzelner Anforderungen in die Warteschlange und der Wartezeit unter Berücksichtigung der Auszeiten der Bedieneinheit gelangt man zur Verteilung der Durchlaufzeit T_2.

Die Verteilungsdichte der Durchlaufzeit durch das gesamte System wird als Faltung der Verteilungsdichten von T_1 und T_2 angenähert. Diese Näherung ist zulässig, wenn sich in einer Gruppenankunft nur wenige Anforderungen von derselben Quelle befinden, wenn die Anforderungen unterschiedlicher Stationen in zufälliger Reihenfolge abgearbeitet werden und die Ensemble-Verteilung der Durchlaufzeit aller Anforderungen betrachtet wird.

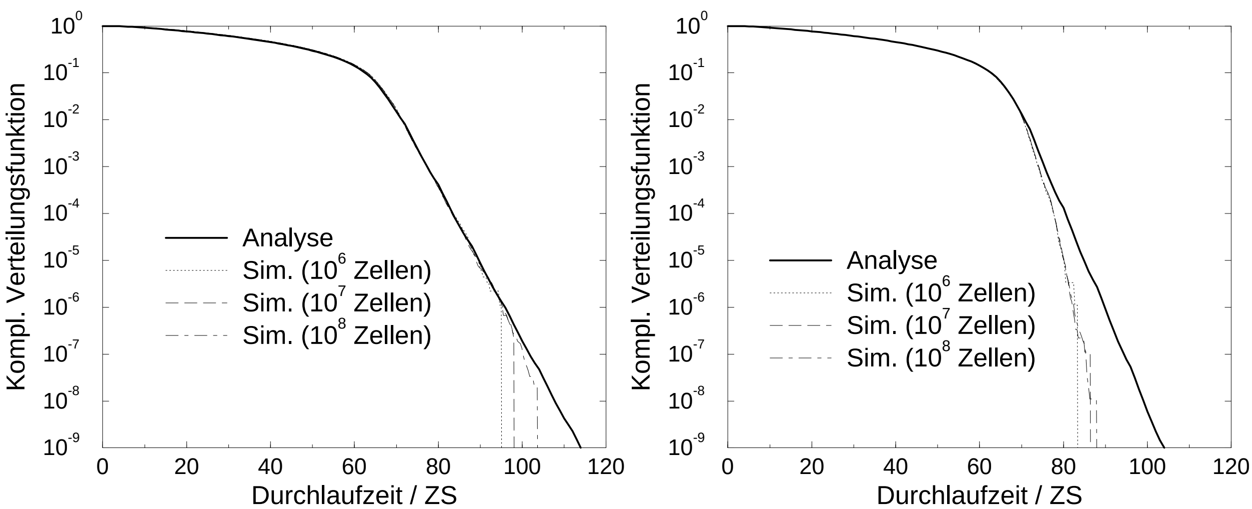


Abb. 5.14: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit in Analyse und Simulation (mit 10^6–10^8 Zellen) des Modells für periodische Bedarfsabfrage. Links: M-Verkehr, $m = 16$, $\rho_P = 12,5\,\%$, $n = n_0 = 128$, $b_Q = 1$, $A_R = 70\,\%$. Rechts: n*D-Verkehr, $m = 10$, $\rho_P = 12,5\,\%$, $n = 80$, $b_Q = 1$, $A_R = 80\,\%$.*

Abb. 5.14 zeigt die Durchlaufzeitverteilung für das Modell aus Abb. 5.12 nach [37] im Vergleich zwischen Analyse und Simulation. Die Analyse liefert bei M-Verkehr (negativ-exponentielle Verteilung der Ankunftsabstände) die Durchlaufzeitverteilung sehr genau, während sehr viele Anforderungen simuliert werden müssen, damit man aus der Simulation hinreichend genaue Aussagen für kleine Wahrscheinlichkeiten treffen kann. Für periodischen Verkehr wird die Wahrscheinlichkeit langer Durchlaufzeiten durch die Analyse stark überschätzt, wie Abb. 5.14 rechts zeigt. Dies liegt an der oben erwähnten Vernachlässigung der Korrelation der Gruppengrößen aufeinanderfolgender Ankünfte in der zentralen Warteschlange der Kopfstation.

Die Verkehrsszenarien, die Abb. 5.14 zugrundeliegen, wurden so gewählt, daß sie möglichst weitgehend den in Tab. 5.1 definierten entsprechen, andererseits aber die Grundvoraussetzung für die Analyse erfüllen, in der alle Stationen aktiv sein müssen ($n = n_0$) und die gleichen Quellen haben müssen. Das Verhältnis n_0/m ist auch hier jeweils $n_0/m = 8$, so daß sich die effektiven Abfrageperioden t_{PE} in allen Szenarien entsprechen.

5.3.2 Häufigkeit periodischer BA-Blöcke

Die oben beschriebene Analyse erlaubt, zumindest für M-Verkehr, eine sehr genaue Berechnung der Durchlaufzeitquantile als Funktion des zur Übertragung von BA-Blöcken eingesetzten Mehraufwandes ρ_P bei periodischer Bedarfsabfrage ohne an ATM-Zellen gekoppelte Bedarfsangaben.

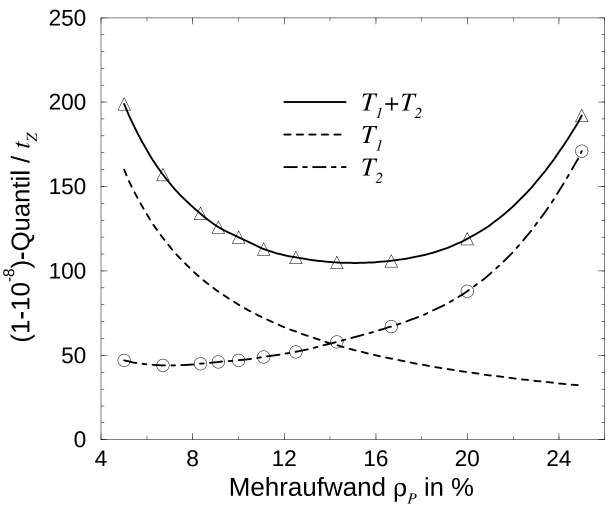


Abb. 5.15: *$(1\text{-}10^{-8})$-Quantil von $T_1 + T_2$ (——) und die Quantile der Beiträge T_1 (– – –) und T_2 (–·–) aus der Analyse für M-Verkehr mit 80 Stationen, $m = 10$, als Funktion von ρ_P bei einem Angebot von $A_R = 70\%$.*

Abb. 5.15 zeigt die Abhängigkeit des (1-10^{-8})-Quantils der Summe $T_1 + T_2$ von ρ_P. Zur Verdeutlichung der einzelnen Effekte sind die entsprechenden Quantile der einzelnen Komponenten T_1 und T_2 mit eingezeichnet. Das (1-10^{-8})-Quantil von T_1 ist praktisch gleich der effektiven Abfrageperiode t_{PE}, die nach (5.6) umgekehrt proportional zu ρ_P ist und damit bei zunehmendem ρ_P abnimmt. Auf der anderen Seite führt ein größerer Anteil ρ_P an Zeitschlitzen für BA-Blöcke zu einer Abnahme der verbleibenden Übertragungskapazität für ATM-Zellen, so daß das Quantil von T_2 entsprechend mit ρ_P zunimmt, bis bei $\rho_P \to 1 - A_R$ die Stationaritätsgrenze erreicht wird. Das Optimum liegt hier für M-Verkehr und $A_R = 70\%$ bei $\rho_P \approx 1/7$. Es ist also sinnvoll, den Rückkanal des Zugangsnetzes zu etwa 14 % durch BA-Blöcke auszulasten, um dadurch seine verbleibende Übertragungskapazität schneller nutzen zu können und damit die Durchlaufzeit der ATM-Zellen insgesamt zu verringern.

Die Betrachtung des Durchlaufzeit-Quantiles als Funktion des Anteils ρ_P der für BA-Blöcke eingesetzten Übertragungskapazität wird auch in den folgenden Abschnitten zum simulativen Vergleich der verschiedenen Medienzugriffsmechanismen eingesetzt. Allerdings muß hier die weniger extreme Quantilen-Wahrscheinlichkeit (1-10^{-5}) gewählt werden, da der Messung von Quantilen in der Simulation durch die Anzahl simulierter Zellen engere Grenzen gesetzt sind.

5.3.3 Simulationsmodell für zyklische Bedarfsabfrage

Das Modell für die Simulation der verschiedenen Bedarfsabfrage-Strategien ist in Abb. 5.16 skizziert. Die von den Verkehrsquellen erzeugten ATM-Zellen werden in der Eingangswarteschlange der jeweils betroffenen Zugangsstation ZSt_1 bis ZSt_{n_0} zwischengespeichert. Wenn eine Zugangsstation von der Kopfstation eine Sendeberechtigung (SB) erhält, dann wird die am längsten in der ZSt-Warteschlange wartende ATM-Zelle zur Kopfstation übertragen. Dieser Vorgang benötigt die einfache Laufzeit τ. Wenn die Option der an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben (BA) gewählt ist, dann wird zusammen mit der ATM-Zelle eine Bedarfsangabe zur Kopfstation übertragen. In der Kopfstation wird die in der Bedarfsangabe übermittelte Warteschlangenlänge entsprechend Anhang B.1 ausgewertet und in die Anzahl neuer Ankünfte umgerechnet. Für jede dieser neuen Ankünfte wird eine Sendeberechtigung für die betroffene ZSt in die zentrale Warteschlange der Kopfstation eingereiht. Aus dieser Warteschlange wird normalerweise in jedem Zeitschlitz eine Sendeberechtigung entnommen und an die entsprechende Zugangsstation geschickt.

Abhängig von der Bedarfsabfrage-Strategie werden Sendeberechtigungen für BA-Blöcke anstelle solcher für ATM-Zellen generiert und übertragen. *Zyklische* Sendeberechtigungen für BA-Blöcke unterbrechen die SB-Folge periodisch. Sendeberechtigungen für BA-Blöcke

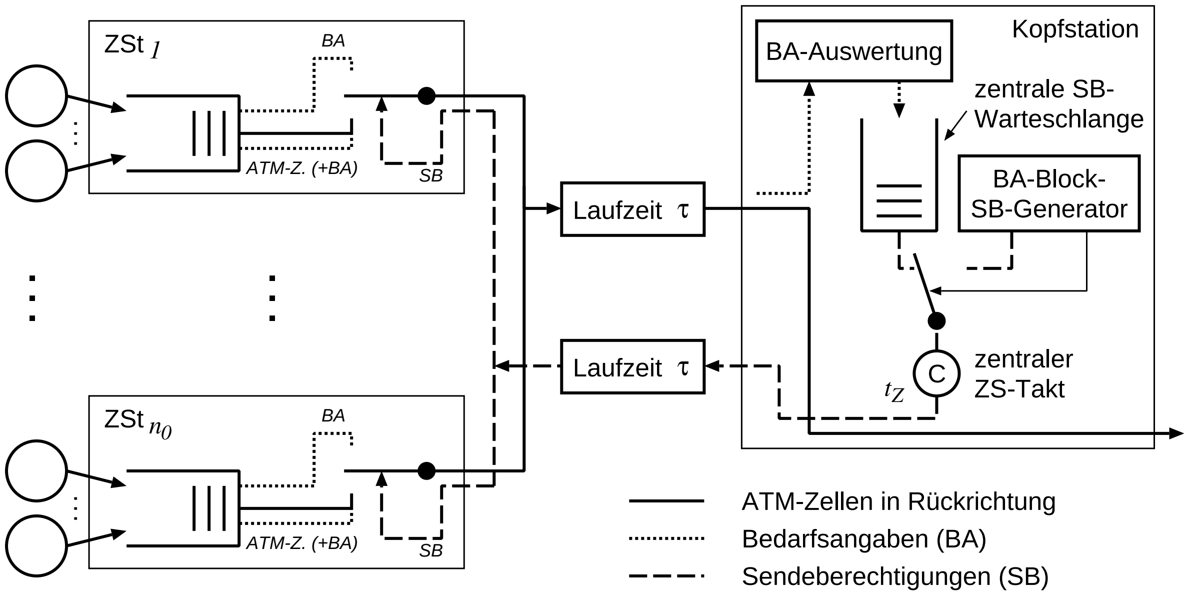


Abb. 5.16: *Simulationsmodell.*

im Leerlauf werden nur eingefügt, wenn keine Sendeberechtigung in der zentralen SB-Warteschlange wartet; sie können also als Sendeberechtigungen mit geringerer Priorität betrachtet werden. Bei *begrenzten BA-Zyklen* werden Sendeberechtigungen für BA-Blöcke immer dann übertragen, wenn sich keine Sendeberechtigungen für ATM-Zellen in der Warteschlange der Kopfstation befinden. Sobald jedoch der zeitliche Abstand zur zuletzt gesendeten Sendeberechtigung für einen BA-Block eine vorgegebene Grenze überschreitet, wird die Folge der Sendeberechtigungen für ATM-Zellen unterbrochen und eine zusätzliche Sendeberechtigung für einen BA-Block übertragen. Wenn eine Zugangsstation zu der Gruppe von Adressaten einer Sendeberechtigung für BA-Blöcke gehört, dann überträgt sie nur eine Bedarfsangabe und keine ATM-Zelle zur Kopfstation. In den folgenden beiden Abschnitten 5.3.4 und 5.3.5 werden die drei unterschiedlichen Bedarfsabfrage-Strategien in der Kombination mit einer Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen untersucht. Außerdem werden zum Vergleich Ergebnisse für die *zyklische Bedarfsabfrage ohne Kopplung* von Bedarfsangaben an ATM-Zellen dargestellt.

5.3.4 ND-Szenarien

Die vier oben und am Beginn von Abschnitt 5.3 beschriebenen Bedarfsabfrage-Strategien werden zunächst hinsichtlich ihrer Leistung bei Verkehr mit einer konstanten geringen Zellrate verglichen (Szenario ND100 aus Tab. 5.1). Dazu ist in Abb. 5.17 die Verteilungsdichtefunktion (links) und die komplementäre Verteilungsfunktion (rechts) der Durchlaufzeit zum Vergleich der Strategien dargestellt. Die Periode der zyklischen Bedarfsabfrage und die

Grenze bei den Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand wurde zu acht Zeitschlitzdauern gewählt, so daß sich ein Mehraufwand von $\rho_P = 12,5\%$ der Übertragungskapazität für die Bedarfsabfrage einstellt.

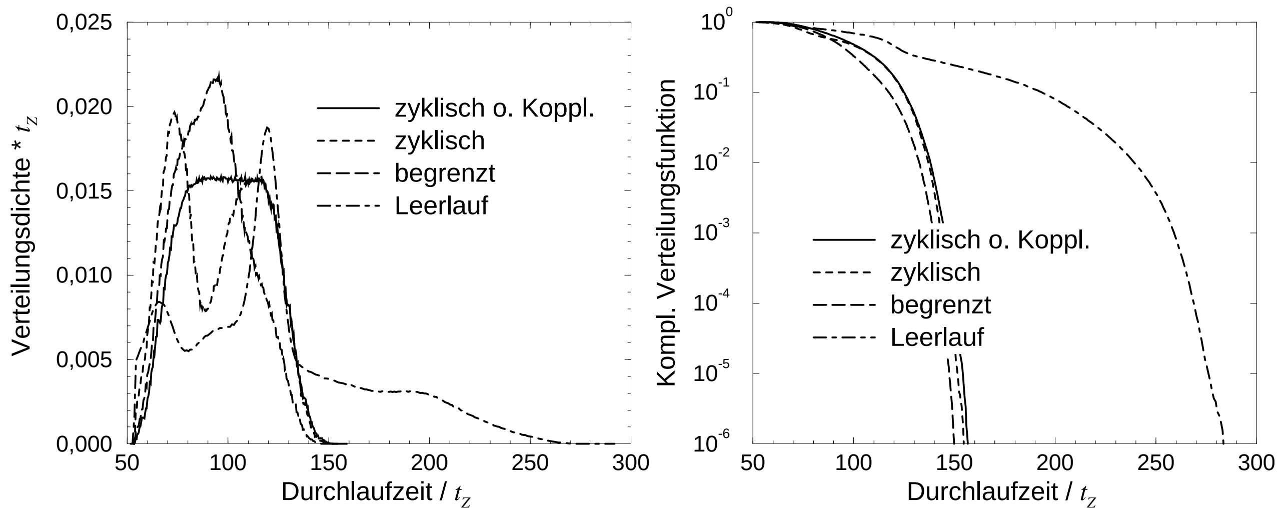


Abb. 5.17: *Szenario ND100: Verteilungsdichtefunktion (links) und komplementäre Verteilungsfunktion (rechts) der Durchlaufzeit bei $\rho_P = 12,5\%$ für zyklische Bedarfsabfrage mit und ohne Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen sowie Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand (acht Zeitschlitze) oder im Leerlauf, jeweils mit Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen.*

In der linearen Darstellung der VDF läßt sich die Funktionsweise der Mechanismen gut erkennen. Die VDF der Durchlaufzeit für zyklische Bedarfsabfrage mit Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen (------) zeigt zwei Maxima: Ankünfte, die über an ATM-Zellen gekoppelte Bedarfsangaben gemeldet werden, erfahren eine geringere Durchlaufzeit als solche, die erst nach bis zu einer effektiven Abfrageperiode gemeldet werden können. Die effektive Abfrageperiode liegt nach (5.7) bei $n_0 = 128$ Stationen, $m = 16$ Bedarfsangaben in einem BA-Block und einer BA-Block-Periode von $t_P = 8t_Z$ bei $t_{PE} = 64\,t_Z$, während das Minimum der Durchlaufzeit $3\tau = 54t_Z$ beträgt. Ohne die Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen entfällt die Möglichkeit der früheren Meldung, so daß die Durchlaufzeit von der Gleichverteilung von T_{RW} zwischen 0 und $64\,t_Z$ dominiert wird (——). Durch Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand und zusätzlicher Kopplung an ATM-Zellen (– – –) kann die Durchlaufzeit gegenüber der zyklischen Bedarfsabfrage oft noch etwas verringert werden. Bei diesem Vergleich muß allerdings beachtet werden, daß durch die Verwendung von Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand, wie auch durch Leerlauf-Bedarfsangaben, in der Rückrichtung *jeder Zeitschlitz* entweder durch eine ATM-Zelle oder durch einen BA-Block belegt ist, so daß diese Strategien nicht eingesetzt werden können, wenn für eine andere Prioritätsklasse noch Restbandbreite zur Verfügung stehen soll.

Die logarithmische Darstellung der komplementären Verteilungsfunktionen der Wartezeiten mit den verschiedenen Strategien in Abb. 5.17 rechts zeigt deutlich, daß der Gewinn durch die Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand gegenüber zyklischen Bedarfsangaben sehr gering ist, wenn es auf die Verzögerungsschwankungen und nicht nur auf die mittlere Durchlaufzeit der ATM-Zellen ankommt. Es ist auch zu sehen, daß die reine Leerlauf-Bedarfsabfrage (—·—) als Strategie zur besseren Ausnützung der Übertragungskapazität ungeeignet ist, da die Wartezeit T_{RW} bis zur nächsten Bedarfsmeldung für eine neu ankommende ATM-Zelle hier nicht durch t_{PE}, sondern durch die maximale Betriebsperiode der zentralen SB-Warteschlange der Kopfstation bestimmt ist.

Betrachtet man nun das Szenario ND10, in dem die Quellen eine so hohe Zellrate erzeugen, daß die Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen alleine ausreicht, um der Kopfstation alle an den Zugangsstationen neu ankommenden ATM-Zellen zu melden, dann sieht man nur noch den Unterschied zwischen den drei Strategien mit an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben (— — — , ······· und —·—in Abb. 5.18) und der reinen zyklischen Bedarfsabfrage ohne eine solche Kopplung, die in diesem Fall keine entsprechende Verkürzung der Durchlaufzeit erreichen kann (—— in Abb. 5.18). Die größten beobachteten Wartezeiten liegen allerdings in allen Fällen unter denen im Szenario ND100, was durch die kürzere Betriebsperiode beim Multiplexen von acht Quellen mit kurzer Periode gegenüber dem Multiplexen von 80 Quellen mit langer Periode bei gleicher Gesamt-Ankunftsrate zu erklären ist. Derselbe Unterschied ist auch in den in Abb. 5.8 dargestellten Ergebnissen für den konzentrierten Multiplexer deutlich zu sehen.

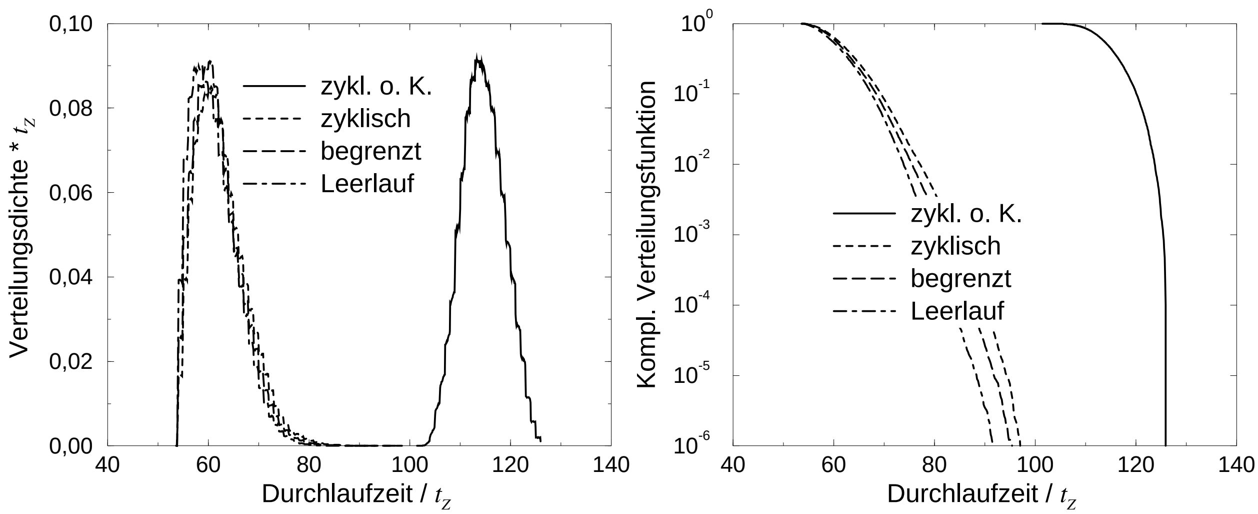


Abb. 5.18: *Szenario ND10: Verteilungsdichtefunktion (links) und komplementäre Verteilungsfunktion (rechts) der Durchlaufzeit bei $\rho_P = 12,5\%$ für zyklische Bedarfsabfrage mit und ohne Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen sowie Bedarfsangaben mit begrenztem Abstand (acht Zeitschlitze) oder im Leerlauf, jeweils mit Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen.*

Die mittlere Durchlaufzeit und das $(1\text{-}10^{-5})$-Quantil der Durchlaufzeit ist in Abb. 5.19 für das Szenario ND100 über dem Anteil ρ_P der Übertragungskapazität, der zur Übertragung von BA-Blöcken eingesetzt wird, aufgetragen. Die eingetragenen 95 %-Vertrauensintervalle für die mittlere Durchlaufzeit wurden nach der Teiltestmethode [103] berechnet. Die Histogramm-Methode für die Bestimmung der Quantile und ihrer Vertrauensintervalle wurde in Abschnitt 3.3.3 beschrieben. Bei der zyklischen Bedarfsabfrage gibt ρ_P über (5.6) die Periode der BA-Blöcke an. Bei der Bedarfsabfrage mit begrenztem Abstand von BA-Blöcken bezeichnet die mit (5.6) berechnete Größe t_P den maximalen zeitlichen Abstand zweier BA-Blöcke. Für ρ_P können nur Werte eingesetzt werden, deren Kehrwert t_P/t_Z eine ganze Zahl ergibt; die Kurven sind nur zur besseren Übersicht zwischen diesen Werten interpoliert. Bei der Strategie der Bedarfsabfrage im Leerlauf gibt es keinen mit ρ_P vergleichbaren Parameter, so daß der Wert der mittleren Durchlaufzeit beziehungsweise ihres $(1\text{-}10^{-5})$-Quantiles als Gerade über alle ρ_P-Werte eingezeichnet wurde.

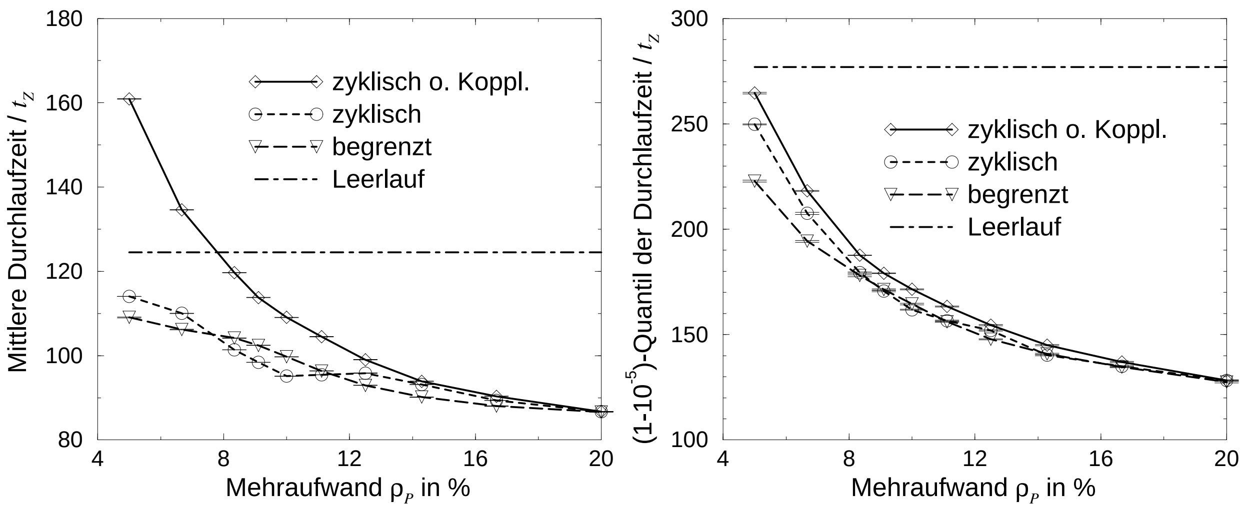


Abb. 5.19: *Szenario ND100: Mittelwert (links) und $(1\text{-}10^{-5})$-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit in Abhängigkeit des für BA-Blöcke eingesetzten Anteiles ρ_P der Übertragungskapazität.*

Die Kurven zeigen, daß es in diesem Szenario sinnvoll ist, ρ_P möglichst groß zu wählen, da die Wartezeit T_{RW} bis zur Meldung einer neuen Ankunft gegenüber der Wartezeit T_{PW} der Sendeberechtigung in der Kopfstation überwiegt, selbst wenn die Warteschlange in der Kopfstation durch das Angebot von 80 % und einen Mehraufwand von $\rho_P = 20\%$ der Übertragungskapazität bereits an der Stationaritätsgrenze bedient wird. Dieser Effekt kann nur bei periodischem Eingangsverkehr beobachtet werden, da zufallsabhängige Verkehre keine Auslastung von 100 % zulassen.

Die mittlere Durchlaufzeit ist bei allen anderen Strategien kleiner als bei der Bedarfsabfrage im Leerlauf, mit Ausnahme der zyklischen Bedarfsabfrage ohne Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen bei $\rho_P < 0,08$. Die Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen verkürzt in diesem Szenario die mittlere Durchlaufzeit, während sie keinen so großen Einfluß auf das rechts dargestellte (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit zeigt. Diese Verkürzung der mittleren Durchlaufzeit kommt zustande, wenn eine neu in der Warteschlange einer Zugangsstation eintreffende ATM-Zelle die Meldung ihrer Ankunft an die um $t_Q = 100t_Z$ früher angekommene Zelle koppeln kann. Dies findet dann statt, wenn bei der zyklischen Bedarfsabfrage ohne BA-Kopplung an ATM-Zellen die Durchlaufzeit $T_D > t_Q + \tau$ ist, was im Mittel (—— in Abb. 5.19 links) bei kleinen ρ_P häufig vorkommt. Der Effekt verschwindet bei Betrachtung des (1-10^{-5})-Quantils der Durchlaufzeit, weil er nur für einen Teil der neu ankommenden Zellen wirksam sein kann.

Abb. 5.20 zeigt den Mittelwert und das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario ND10. Hier tritt der bereits oben beobachtete Unterschied zwischen Bedarfsabfrage-Strategien mit und ohne Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen noch deutlicher zu Tage. Bei der kurzen Quellenperiode von $t_Q = 10t_Z$ kann für jede neue Ankunft sicher eine Bedarfsangabe zusammen mit einer früher angekommenen ATM-Zelle zur Kopfstation übertragen werden.

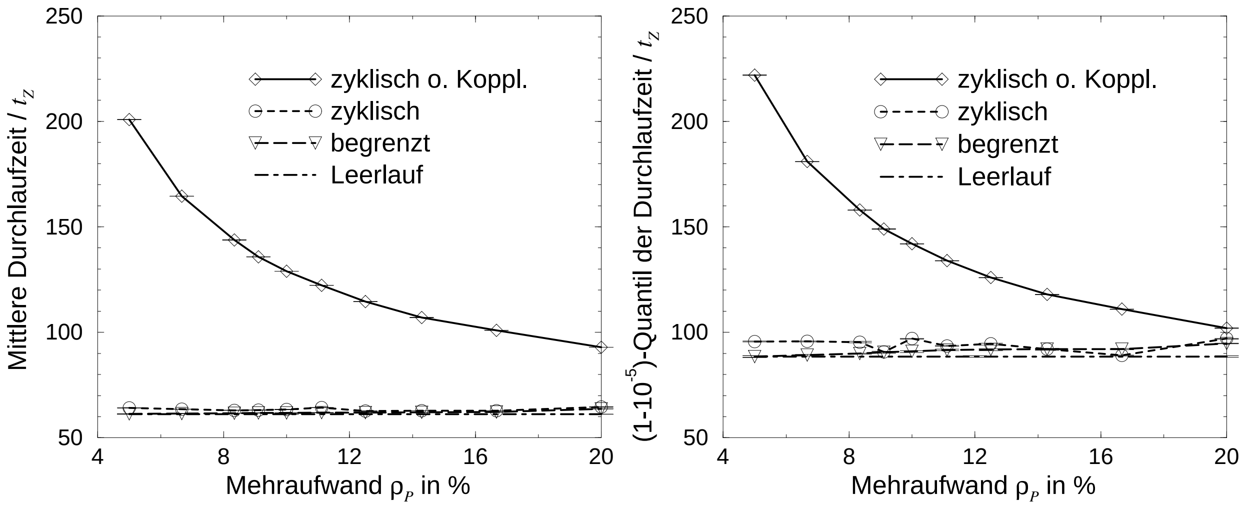


Abb. 5.20: *Szenario ND10: Mittelwert (links) und (1-10^{-5})-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit in Abhängigkeit des für BA-Blöcke eingesetzten Anteiles ρ_P der Übertragungskapazität.*

In Abb. 5.19 und 5.20 ist zu erkennen, daß bei den ND-Szenarien die Strategien der Bedarfsabfrage im Leerlauf oder mit begrenzter Periode keine oder nur eine sehr geringe Verringerung der Durchlaufzeiten oder ihrer Schwankungen gegenüber einer rein zyklischen Bedarfsabfrage zusammen mit einer Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen erreichen können. Andererseits wird durch diese Strategien jeder Zeitschlitz des Rückkanals entweder mit einer ATM-Zelle oder mit einem BA-Block belegt, so daß für eventuell zu berücksichtigende andere Verkehrsklassen keine Restbandbreite mehr zur Verfügung steht.

5.3.5 TS-Szenarien

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen ND-Szenarien mit periodischem Verkehr zeigt sich in Abb. 5.21 und 5.22, daß in den TS-Szenarien ein Optimum der für die Übertragung von BA-Blöcken eingesetzten Übertragungskapazität existiert.

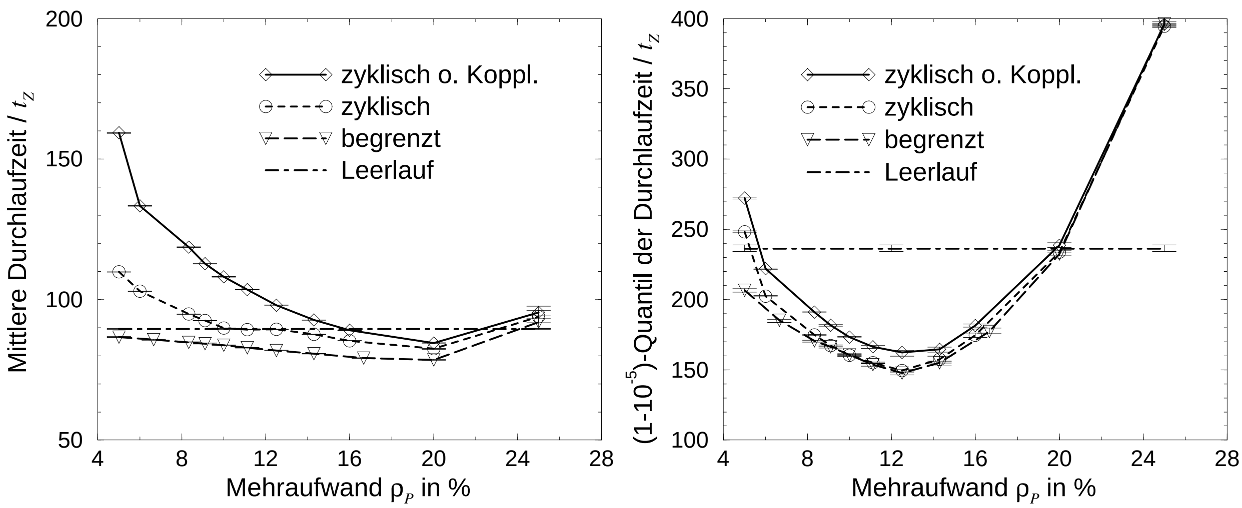


Abb. 5.21: *Szenario TS100: Mittelwert (links) und (1-10^{-5})-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit in Abhängigkeit des für BA-Blöcke eingesetzten Anteiles ρ_P der Übertragungskapazität.*

Im Szenario TS100 (Abb. 5.21) liegt das Verkehrsangebot bei $A_R = 70\%$. Wenn dazuhin $\rho_P = 12,5\%$ der Übertragungskapazität, also jeder achte Zeitschlitz, für die Übertragung von BA-Blöcken eingesetzt wird, ergibt sich ein Minimum des (1-10^{-5})-Quantils der Durchlaufzeit. Bei größerem ρ_P steigt die Wartezeit T_{PW} der Sendeberechtigungen in der Kopfstation, während bei kleinerem ρ_P die Wartezeit T_{RW} der ATM-Zellen in den Zugangsstationen bis zur Möglichkeit einer Meldung an die Kopfstation überwiegt (vgl. Abb. 5.15). Die mittlere Wartezeit zeigt das Optimum dagegen erst bei $\rho_P = 20\%$, weil hier die schnellere Meldung aller ATM-Zellen stärker zu Buche schlägt als die längere Wartezeit in der stark ausgelasteten Warteschlange der Kopfstation unter der relativ seltenen Überlast.

Dieselben Effekte zeigen sich auch im Szenario TS10, in dem wegen der geringeren mittleren Systemauslastung von nur 50 % das Optimum für ρ_P bei 14 bis 16 % liegt. Bei mittleren Werten von ρ_P zwischen 10 und 15 % ist das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit mit zyklischer Bedarfsabfrage nicht wesentlich größer als mit Bedarfsabfrage mit begrenzter Periode, obwohl dabei im Mittel 35–40 % der Übertragungskapazität frei bleiben.

Der statistische Multiplexgewinn von 1 beziehungsweise 1,4 (vergleiche Abschnitt 5.2.2) läßt sich mit allen vier untersuchten Bedarfsabfrage-Strategien erreichen, während dies mit der in Abschnitt 5.1 untersuchten statischen Zuteilung der Übertragungskapazität an die einzelnen Zugangsstationen nicht möglich ist.

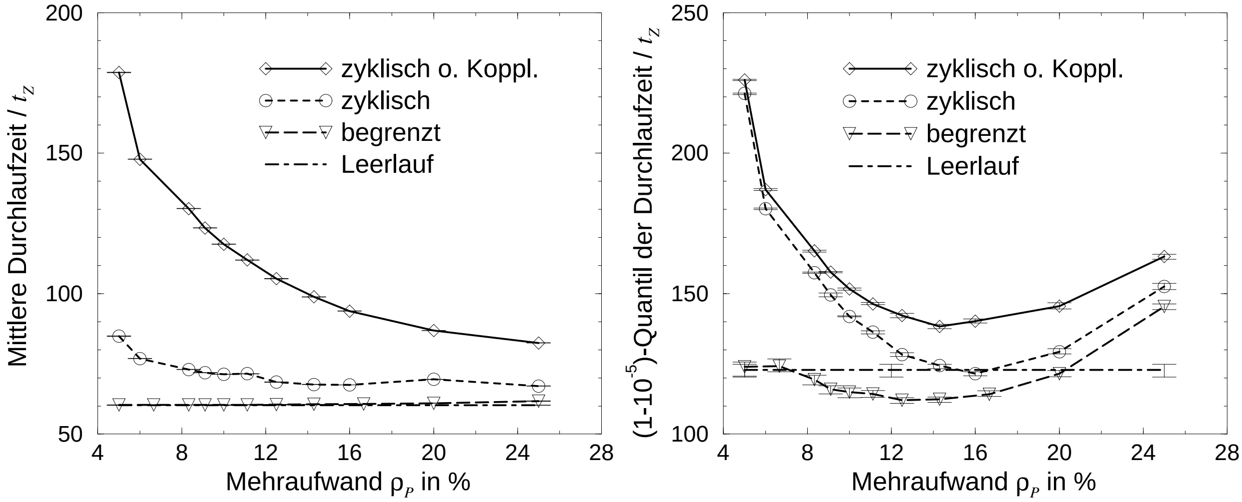


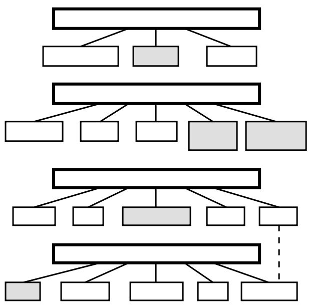
Abb. 5.22: *Szenario TS10: Mittelwert (links) und (1-10^{-5})-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit in Abhängigkeit des für BA-Blöcke eingesetzten Anteiles ρ_P der Übertragungskapazität.*

5.4 Wahlfreie Bedarfsmeldung

Um den Durchlaufzeit-Anteil T_{RW} zu senken, wird in verschiedenen Vorschlägen (s. Abschnitt 4.3.2) ein wahlfreier Vielfachzugriff auf BA-Blöcke erlaubt. Im Vergleich zur periodischen Bedarfsabfrage könnte dies zu einer Verringerung von T_{RW} führen, weil spätestens nach der Zeit t_P anstelle von $t_{PE} = \lceil n_0/m \rceil t_P$ die nächste Möglichkeit zum Absenden einer Bedarfsmeldung bestünde. Andererseits erhöht sich die Zugriffszeit auf den BA-Block drastisch, wenn es zu Kollisionen kommt, da Wiederholungen erst nach einer Rundlaufzeit von 2τ möglich sind. Für einen Vergleich zwischen dieser wahlfreien Bedarfsmeldung und der zyklischen Bedarfsabfrage werden in Abschnitt 5.4.1 das Simulationsmodell für wahlfreie Bedarfsmeldung und die Randbedingungen des Verfahrens beschrieben. In Abschnitt 5.4.2 wird die Wahl des Aufspreizungsfaktors zur Kollisionsauflösung diskutiert. Die Leistungsfähigkeit des Verfahrens wird in Abschnitt 5.4.3 vorgestellt und anhand der in Abschnitt 5.2.2 eingeführten Szenarien mit der der zyklischen Bedarfsangaben verglichen.

5.4.1 Simulationsmodell für wahlfreie Bedarfsmeldung

Die eingesetzten Mechanismen für den Medienzugriff nach der Klassifikation von Abb. 4.1 sind in Abb. 5.23 zusammengestellt. Die Übertragung von ATM-Zellen erfolgt nach einer Reservierung, die entweder durch wahlfreien Zugriff auf ein Feld eines BA-Blockes oder durch Kopplung einer Bedarfsangabe an eine ATM-Zelle zur Kopfstation übertragen wird. Die Entscheidung zwischen beiden Mechanismen wird in der jeweiligen Zugangsstation durch einen unten beschriebenen Zustandsautomaten gesteuert. Der Inhalt der Bedarfsangabe ist die Anzahl neuer Ankünfte an der Zugangsstation, die in Form der aktuellen Warteschlangenlänge zur Kopfstation übertragen und dort nach dem in Anhang B.1 beschriebenen Algorithmus umgerechnet wird. Es werden keine Mechanismen eingesetzt, um das Verkehrsprofil durch das Medienzugriffsverfahren zu formen.



Datenübertragung:
nach Reservierung
Übertragung von Reservierungen:
wahlfr. Zugriff auf BA-Blöcke + Koppl. an ATM-Zellen
Inhalt der Bedarfsangaben:
Warteschlangenlänge (neue Ankünfte)
Formung des Verkehrsprofiles:
keine

Abb. 5.23: *Eingesetzte Mechanismen.*

Abb. 5.24 zeigt das Simulationsmodell. Im Gegensatz zur zyklischen Bedarfsabfrage, bei der jede Zugangsstation einen festen Mini-Zeitschlitz in einem bestimmten BA-Block belegen darf, muß hier in jeder Zugangsstation ein Medienzugriffsprozeß die Entscheidung treffen, auf welchen Mini-Zeitschlitz eines BA-Blockes zugegriffen wird. Außerdem muß die Kollisionsauflösung in der Zugangsstation geschehen, da die Kopfstation keine Information darüber erhalten kann, welche Zugangsstationen gleichzeitig auf einen Mini-Zeitschlitz zugegriffen haben. Die Kopfstation kann lediglich in der Verteilrichtung Informationen darüber abgeben, in welchen Mini-Zeitschlitzen Kollisionen aufgetreten sind.

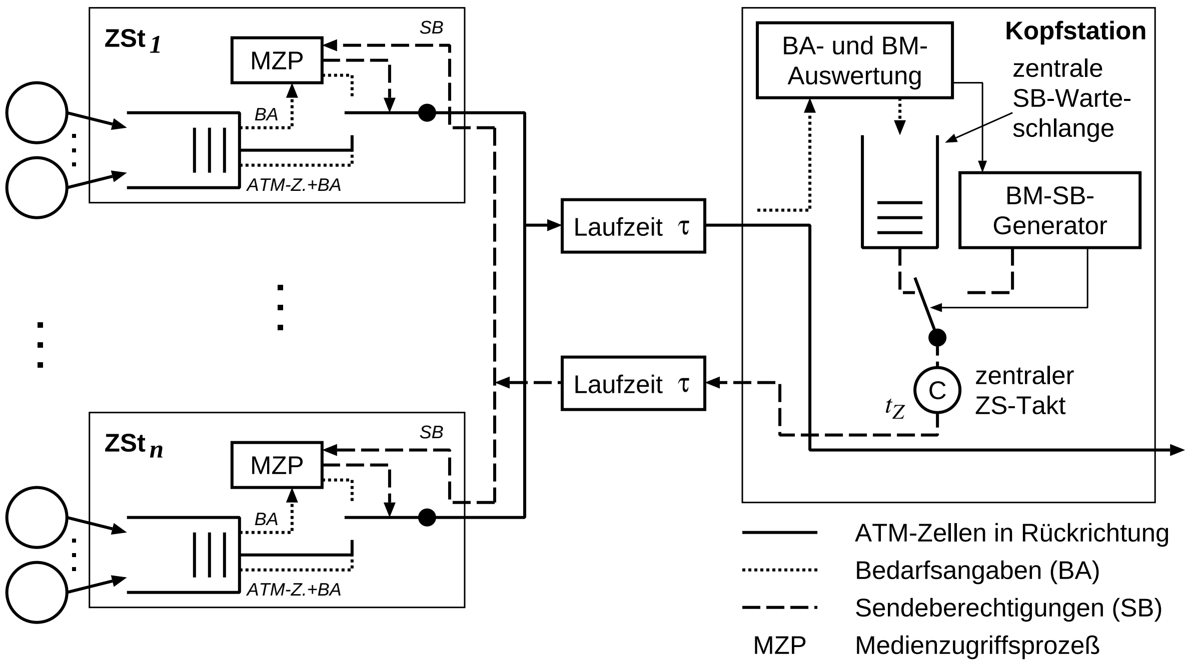


Abb. 5.24: *Simulationsmodell für wahlfreie Bedarfsmeldung.*

Für die Kollisionsauflösung wird eine angepaßte Form des in [22, 59] beschriebenen Stack-Algorithmus eingesetzt. Um diesen Algorithmus zur Kollisionsauflösung in einem System mit langen Laufzeiten τ verwenden zu können, muß die Rückmeldung über Kollisionen in Mini-Zeitschlitzen an den Zugangsstationen eintreffen, bevor der nächste Zyklus des wahlfreien Zugriffes beginnt, damit in diesem Zyklus kollidierte Bedarfsmeldungen wiederholt werden können. Bei Rundlaufdauern von $2\tau \geq 30\, t_Z$ würde dies bedeuten, entsprechend selten Zeitschlitze für BA-Blöcke vorzusehen. Da andererseits für eine schnelle Kollisionsauflösung eine große Zahl von Zeitschlitzen zur Verfügung stehen muß, wird in den hier untersuchten Modellen eine Folge von $r_B > 1$ Zeitschlitzen für wahlfreie Bedarfsmeldung in jeder Periode vorgesehen. Diese Gruppierung ist in Abb. 5.25 skizziert.

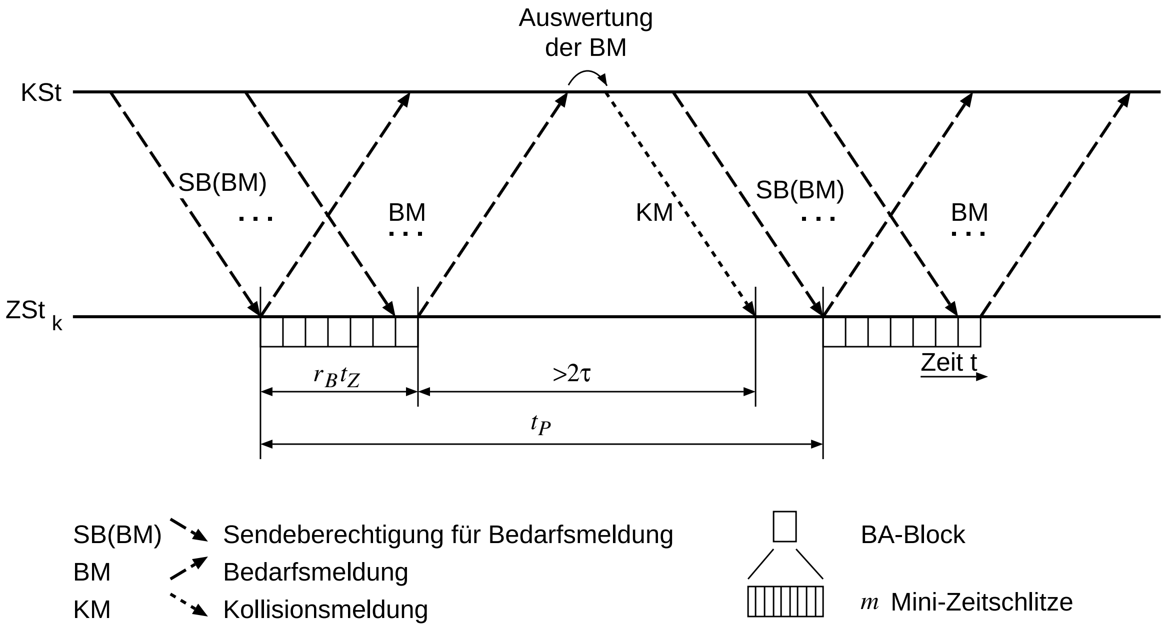


Abb. 5.25: *Grenzen bei wahlfreier Bedarfsmeldung.*

Damit die Nachricht über den Erfolg des Zugriffs auf einen Mini-Zeitschlitz an der Zugangsstation ankommt, bevor eventuelle Wiederholungen des Zugriffs wegen Kollisionen nötig sind, muß die Periode der Zeitschlitz-Gruppen für wahlfreie Bedarfsmeldung

$$t_P > 2\tau + r_B t_Z \tag{5.9}$$

betragen. Der Anteil der für Bedarfsmeldungen eingesetzten Übertragungskapazität ist damit durch die Periodendauer t_P und die Anzahl der BA-Blöcke in einer Gruppe r_B gegeben:

$$\rho_P = \frac{r_B t_Z}{t_P} \tag{5.10}$$

Bei m Mini-Zeitschlitzen in jedem Zeitschlitz für wahlfreie Bedarfsmeldung stehen somit $m \cdot r_B$ Mini-Zeitschlitze in jeder Periode der Dauer t_P zur Verfügung. Für die Simulationen wurde (wie bei der periodischen Bedarfsabfrage in Abschnitt 5.3) $m = 16$ und $\tau = 18t_Z$ gewählt. Um maximal etwa ein Viertel der Bandbreite für die wahlfreie Bedarfsmeldung zur Verfügung stellen zu können, wurde $t_P = 50t_Z$ gewählt. Dadurch sind mit $r_B = 1, 2, \ldots 14$ Werte von $\rho_P = 2$–$28\,\%$ einstellbar.

Um die Kollisionshäufigkeit bei wahlfreier Bedarfsmeldung möglichst gering zu halten, werden zusätzlich an ATM-Zellen gekoppelte Bedarfsangaben verwendet. Dadurch muß eine Zugangsstation nur dann auf die Möglichkeit zur wahlfreien Bedarfsmeldung zurückgreifen, wenn ihre letzte Bedarfsangabe eine Warteschlangenlänge von Null gemeldet hat. Ein Zustands-Übergangsgraph für den Medienzugriffsprozeß in der Zugangsstation ist in Abb. 5.26 dargestellt. Die Notation *A[B]/C* soll andeuten, daß der so bezeichnete Übergang zwischen zwei Zuständen stattfindet, wenn das Ereignis A eintritt und die Bedingung B erfüllt ist. Beim Übergang wird dann die Aktion C ausgeführt.

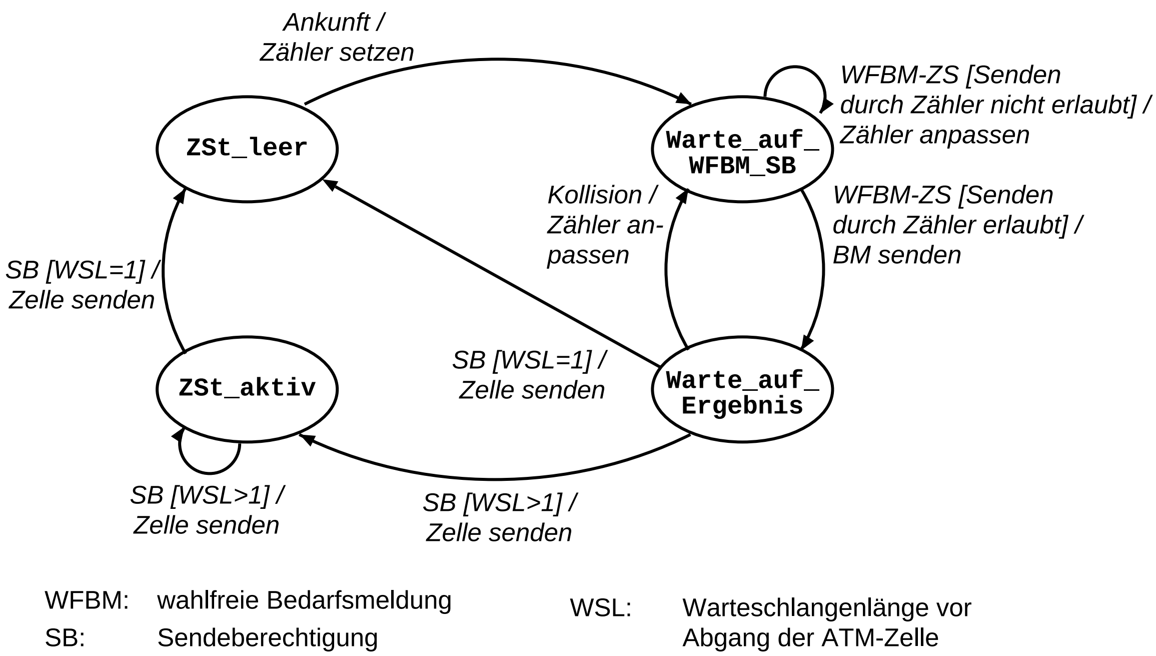


Abb. 5.26: *Zustands-Übergangsdiagramm für den Medienzugriffsprozeß.*

Der Zustand `ZSt_leer` ist der Anfangszustand des Medienzugriffsprozesses jeder Zugangsstation, solange keine ATM-Zellen in ihrer Warteschlange warten. Bei der Ankunft der ersten ATM-Zelle zur Übertragung in der Rückrichtung geht der Prozeß in den Zustand `Warte_auf_WFBM_SB` über und initialisiert den Zähler (*Count*) [22]. Wenn in diesem Zustand eine Sendeberechtigung für wahlfreien Zugriff auf einen Zeitschlitz für Bedarfsmeldungen eintrifft und die Zugangsstation auf einen entsprechenden Mini-Zeitschlitz zugreifen darf (dies ist durch den Zähler bestimmt), dann wird eine Bedarfsmeldung zur Kopfstation gesendet und der Medienzugriffsprozeß geht in den Zustand `Warte_auf_Ergebnis` über. Weitere Ankünfte von ATM-Zellen haben nur noch einen indirekten Einfluß auf den Ablauf des Medienzugriffsprozesses, da sie keine direkten Zustandsübergänge mehr auslösen, und werden daher nicht mehr als Ereignisse in Abb. 5.26 dargestellt. Die in der ausgesendeten Bedarfsmeldung gemeldete Warteschlangenlänge enthält im simulierten Modell auch alle bis zum Zeitpunkt des Aussendens eingetroffenen ATM-Zellen. Im Zustand `Warte_auf_Ergebnis` wartet der Medienzugriffsprozeß, bis entweder die Nachricht eintrifft, daß in dem gewählten Mini-Zeitschlitz eine Kollision aufgetreten ist, oder bis eine Sendeberechtigung für eine ATM-Zelle empfangen wird. Im ersten Fall wird der interne Zähler auf die Anzahl von Kollisionen in Minizeitschlitzen vor dem von der betrachteten Zugangsstation verwendeten Minizeitschlitz gesetzt (s.u., vgl. [22]), und die Zugangsstation wartet im Zustand `Warte_auf_WFBM_SB` auf die nächste Möglichkeit, eine wahlfreie Bedarfsmeldung abzusetzen. Im zweiten Fall – die Zugangsstation hat eine Sendeberechtigung für eine ATM-Zelle empfangen – wird die erste ATM-Zelle aus der Warteschlange der Zugangsstation zur Kopfstation übertragen. An diese Zelle wird eine Bedarfsangabe gekoppelt, die die Anzahl der in der Warteschlange verbleibenden Zellen angibt. Wenn die übertragene ATM-Zelle die einzige in der Warteschlange war (WSL=1), dann geht die Zugangsstation wieder in den Ausgangszustand `ZSt_leer` über und wartet, bis eine neue ATM-Zelle ankommt. Wenn dagegen mindestens eine Zelle in der Warteschlange zurückbleibt, dann geht die Zugangsstation in den Zustand `ZSt_aktiv` über und verbleibt in diesem, bis die Warteschlange wieder leer ist. Im Zustand `ZSt_aktiv` wird der Medienzugriff ausschließlich über Reservierungen durch die an die ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben durchgeführt.

Behandlung des Zählers

Der oben erwähnte Zähler bestimmt, auf welchen Mini-Zeitschlitz eine Zugangsstation zugreifen darf. Seine Verwendung wird durch die folgenden Punkte beschrieben, wobei Z für den Zählerstand in der betrachteten Zugangsstation stehen soll:

- Wenn eine Zugangsstation vom Zustand `ZSt_leer` in den Zustand `Warte_auf_WFBM_SB` übergeht, initialisiert sie den Zähler mit einer zwischen 0 und $m \cdot r_B$ gleichverteilten Zufallszahl. $m \cdot r_B$ ist dabei die Anzahl aufeinanderfolgender Mini-Zeitschlitze in einem Zyklus.

- Im Zustand `Warte_auf_WFBM_SB` ist das Senden im $Z+1$-ten Mini-Zeitschlitz erlaubt, wenn $Z < m \cdot r_B$ ist. Wenn anschließend im Zustand `Warte_auf_Ergebnis` gemeldet wird, daß im verwendeten Mini-Zeitschlitz eine Kollision aufgetreten ist, dann wird der Zähler auf
$$q_W \cdot K(Z) + \text{Zufall}(0, \ldots, q_W - 1)$$
gesetzt. Dabei ist $K(Z)$ die Anzahl der Mini-Zeitschlitze vor dem $Z+1$-ten Mini-Zeitschlitz im betrachteten Zyklus, in denen Kollisionen auftraten.

Zufall$(0, \ldots, q_W - 1)$ bezeichnet eine Zufallszahl, die gleichverteilt aus der Menge der ganzen Zahlen zwischen 0 und $q_W - 1$ gezogen wird.

- Wenn im Zustand `Warte_auf_WFBM_SB` bei $Z \geq m \cdot r_B$ das Senden einer Bedarfsmeldung nicht erlaubt ist, dann wird der Zähler auf

$$q_W \cdot K(m \cdot r_B) + Z - m \cdot r_B$$

gesetzt.

5.4.2 Wahl des Aufspreizungsfaktors

In der Literatur [107, 108] wird gezeigt, daß der Stack-Algorithmus mit dem Aufspreizungsfaktor $q_W = 3$ die geringsten Durchlaufzeiten und die größte Stabilität bei großem Verkehrsangebot erreicht. Daher wurde dieser Wert auch im den Vorschlag des MLAP-Protokolles [22] eingesetzt und bei der Bewertung der Vorschläge für IEEE 802.14-Protokolle durch ein unabhängiges Gremium [59] zugrundegelegt.

Die ursprünglichen Analysen des Stack-Algorithmus [107, 108] gehen allerdings davon aus, daß die Rückmeldung über Kollisionen sofort an den betroffenen Stationen vorliegt und daß Datenpakete anstelle von Bedarfsmeldungen im wahlfreien Zugriff gesendet werden. Diese Annahmen treffen hier (und unter den Randbedingungen in [22, 59]) jedoch nicht zu. Anstelle der Datenpakete werden Bedarfsangaben in Mini-Zeitschlitzen gesendet und die lange Laufzeit auf dem Übertragungsmedium verlangt die in Abb. 5.25 skizzierte Gruppierung der Mini-Zeitschlitze.

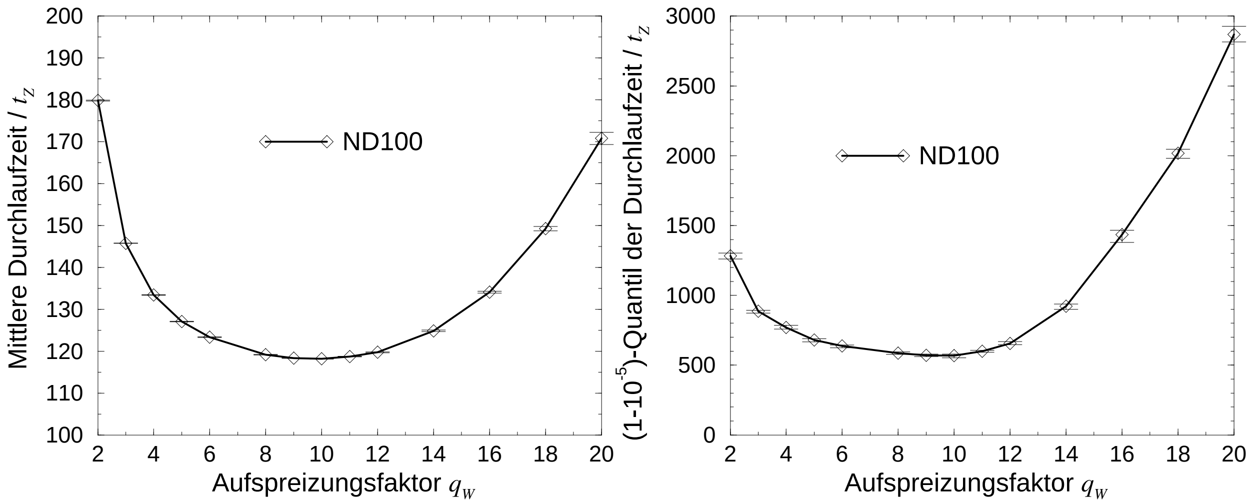


Abb. 5.27: *Die mittlere Durchlaufzeit (links) und ihr (1-10^{-5})-Quantil (rechts) als Funktionen des Aufspreizungsfaktors q_W im Stack-Algorithmus für das Szenario ND100.*

Unter den hier vorliegenden Randbedingungen ist daher eine wesentlich größere Aufspreizung mit $q_W > 3$ sinnvoll. In Abb. 5.27 ist die Durchlaufzeit mit ihrem Mittelwert (links) und ihrem (1-10^{-5})-Quantil (rechts) im Szenario ND100 als Funktion von q_W aufgetragen. Der optimale Aufspreizungsfaktor liegt bei den hier betrachteten Größenordnungen von τ, m und r_B um $q_W \approx 10$. Im folgenden Abschnitt werden daher die Ergebnisse sowohl für $q_W = 3$, als auch für $q_W = 10$ dargestellt.

5.4.3 Vergleich zwischen Bedarfsangaben und wahlfreien Bedarfsmeldungen

Die Verteilung der Durchlaufzeiten in einem System mit wahlfreien Bedarfsmeldungen nach Abschnitt 5.4.1 wird mit Hilfe der vier Verkehrsszenarien aus Tab. 5.1 bewertet. Die Durchlaufzeiten werden mit denen eines Systemes mit zyklischen Bedarfsangaben und Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen nach Abschnitt 5.3.3 verglichen, die bereits in den Abschnitten 5.3.4 und 5.3.5 dargestellt wurden. Der Anteil ρ_P der Übertragungskapazität, der für Zeitschlitze zur Bedarfsangabe oder zur wahlfreien Bedarfsmeldung zur Verfügung steht, ist in beiden Fällen vergleichbar. Allerdings wird, bedingt durch die in Abb. 5.25 skizzierten Randbedingungen, in dem System mit wahlfreien Bedarfsmeldungen die Zykluszeit $t_P = 50 t_Z$ nicht variiert, sondern nur die Anzahl der Zeitschlitze für Bedarfsmeldungen je Zyklus.

ND-Szenarien

Im Szenario ND100 ist der zeitliche Abstand zweier ATM-Zellen so groß, daß die Zugangsstationen bei wahlfreier Bedarfsmeldung jede ATM-Zelle einzeln mit Hilfe des in Abb. 5.26 dargestellten Prozesses für den Medienzugriff an die Kopfstation melden. Die dabei teilweise auftretenden Folgekollisionen bei dem Versuch, eine Bedarfsmeldung zur Kopfstation zu übertragen, führen zu den recht erheblichen Wahrscheinlichkeiten für große Durchlaufzeiten, die in Abb. 5.28 zu sehen sind. Auch durch die starke Aufspreizung mit $q_W = 10$ kann die Durchlaufzeit bei $\rho_P = 12\%$ nicht wesentlich verringert werden.

Die Folgekollisionen von Bedarfsmeldungen sind auch dafür verantwortlich, daß im Szenario ND100 (Abb. 5.29) sowohl die mittlere Durchlaufzeit, als auch ihr (1-10^{-5})-Quantil bei wahlfreier Bedarfsmeldung wesentlich über den Werten der zyklischen Bedarfsabfrage liegt. Wenn der für wahlfreie Bedarfsmeldungen eingesetzte Anteil ρ_P der Übertragungskapazität zu klein ist, steigt die Durchlaufzeit stark an (Abb. 5.29 links). Dieser Effekt tritt für den auf $\rho_P = 12\%$ optimierten Parameter $q_W = 10$ bereits bei $\rho_P < 12\%$ auf. Im günstigsten Fall ist die mittlere Durchlaufzeit bei wahlfreier Bedarfsmeldung etwa 4/3 mal so groß wie bei zyklischen Bedarfsangaben; für das (1-10^{-5})-Quantil ist dieser Faktor etwa vier.

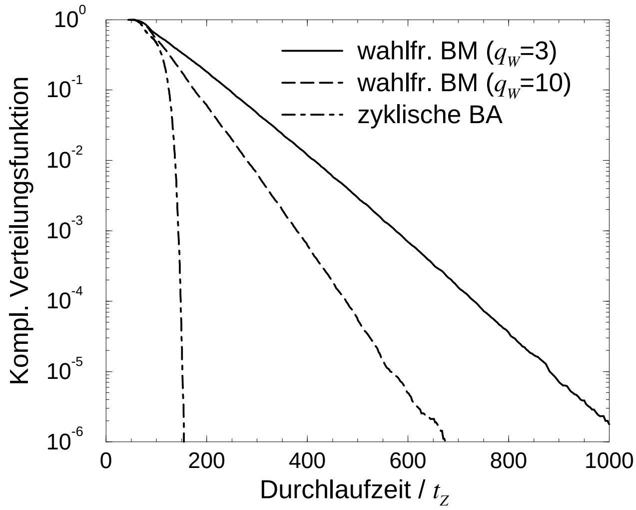


Abb. 5.28: *Vergleich der komplementären Verteilungsfunktionen der Durchlaufzeit zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (–·–) für das Szenario ND100 bei $\rho_P = 12\%$ bzw. $\rho_P = 12,5\%$.*

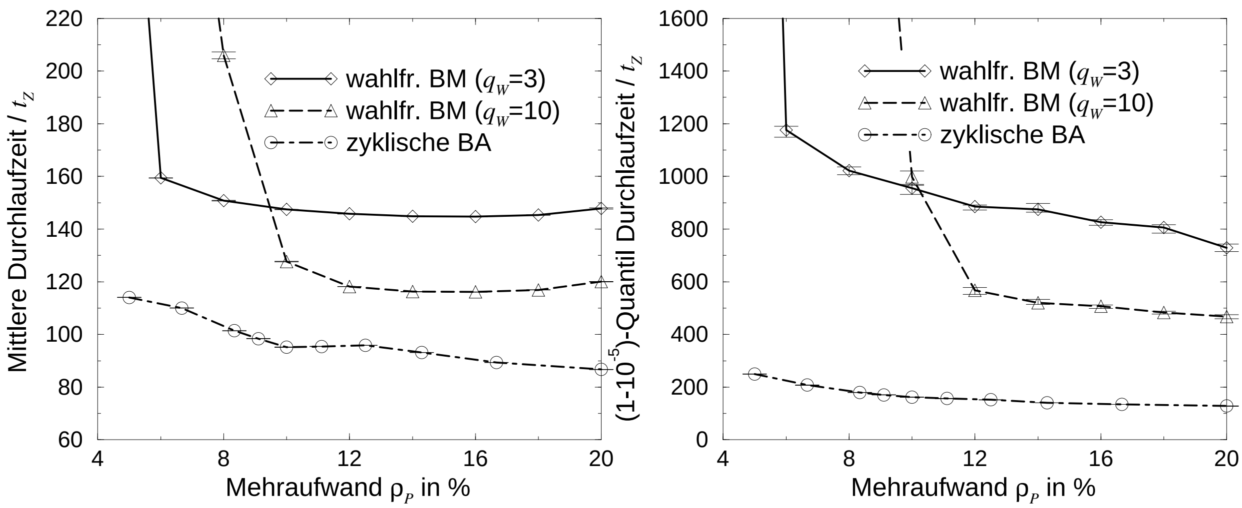


Abb. 5.29: *Vergleich zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (–·–) für das Szenario ND100 anhand der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts).*

Im Szenario ND10 (Abb. 5.30) verringern die an die zur Kopfstation übertragenen ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben in beiden Systemen die Durchlaufzeiten gegenüber dem Szenario ND100. Der Mechanismus des wahlfreien Zugriffes auf Zeitschlitze für Bedarfsmeldungen wird im stationären Zustand nicht mehr eingesetzt, da sich alle Zugangsstationen ständig im Zustand `ZSt_aktiv` nach Abb. 5.26 befinden. Daher führen größere Werte von ρ_P in diesem Szenario nur zu längeren Pausen im Zellstrom (r_B Zeitschlitze in jedem Zyklus) und dadurch zu größeren Durchlaufzeiten. Im Gegensatz zur wahlfreien Bedarfsmeldung werden bei zyklischer Bedarfsabfrage die BA-Blöcke auch bei ständig aktiven Zugangssta-

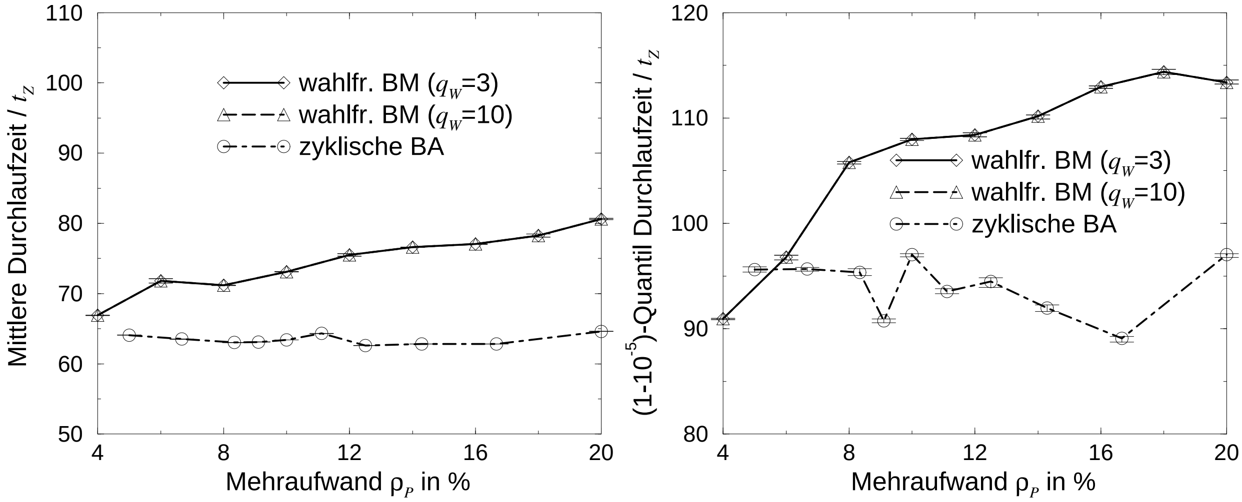


Abb. 5.30: *Vergleich zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (–·–) für das Szenario ND10 anhand der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts). Die Kurven für $q_W = 3$ und $q_W = 10$ fallen jeweils zusammen.*

tionen zusätzlich eingesetzt, um der Kopfstation neu angekommene ATM-Zellen zu melden. Daher kompensiert die kürzere Wartezeit T_{RW} in diesem Fall die längere Wartezeit T_{PW} bei größerem ρ_P, so daß Mittelwert und (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit hier nahezu von ρ_P unabhängig sind.

TS-Szenarien

Zugangsstationen in einem System mit wahlfreier Bedarfsmeldung, die Verkehr von Quellen mit variabler Zellrate zu übertragen haben, geraten immer wieder in den Zustand `ZSt_leer` (Abb. 5.26), wenn die Quellen eine zeitlang keine ATM-Zellen mehr erzeugt haben, so daß die Warteschlange der Zugangsstation leer wird. In diesem Fall muß auch bei Quellen mit hoher Zellrate die betroffene Zugangsstation am Beginn eines Zellenbüschels zunächst wahlfrei auf einen Mini-Zeitschlitz zur Bedarfsmeldung zugreifen.

Abb. 5.31 zeigt, daß im Szenario TS100 (links), bei dem jede Ankunft einer ATM-Zelle durch wahlfreien Zugriff auf einen Mini-Zeitschlitz zur Bedarfsmeldung an die Kopfstation gemeldet wird, die Durchlaufzeit wesentlich höher ist als bei zyklischer Bedarfsabfrage (BA). Auch im Szenario TS10 (Abb. 5.31 rechts) greifen diejenigen Zugangsstationen auf die Mini-Zeitschlitze zur wahlfreien Bedarfsmeldung zu, die zu einem Zeitpunkt ein neues Büschel von ATM-Zellen empfangen haben. Dadurch ist die Kollisionshäufigkeit für Bedarfsmeldungen zwar geringer als im Szenario TS100, aber die durch Folgekollisionen verursachte Verlängerung der Durchlaufzeit gegenüber der zyklischen Bedarfsabfrage ist – zumindest mit kleinen Wahrscheinlichkeiten – dennoch beträchtlich.

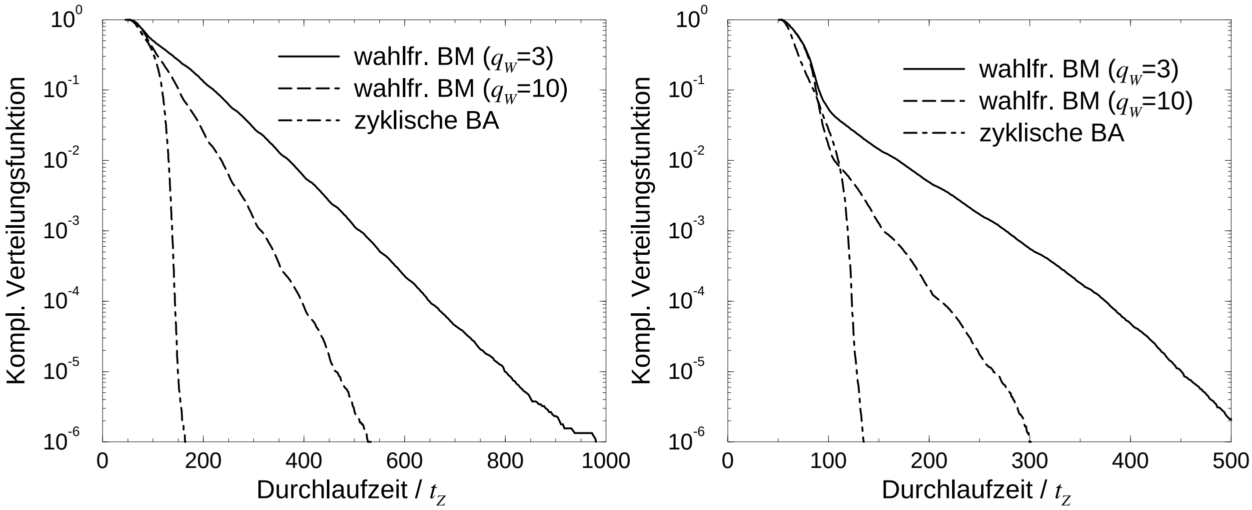


Abb. 5.31: *Vergleich der komplementären Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (—·—) für die Szenarien TS100 (links) und TS10 (rechts) bei $\rho_P = 12\%$ bzw. $\rho_P = 12,5\%$.*

In Abb. 5.32 sind Mittelwert (links) und (1-10^{-5})-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit für das Szenario TS100 als Funktion von ρ_P aufgetragen. Es zeigt sich wieder die im Mittel zwar akzeptable, im Quantil aber sehr deutliche Vergrößerung der Durchlaufzeit bei wahlfreier Bedarfsmeldung im Vergleich zur zyklischen Bedarfsabfrage. Auch die Tendenz der wahlfreien Bedarfsmeldung zur Instabilität bei kleinen Werten von ρ_P ist in Abb. 5.32 links wieder zu sehen. Die großen Wartezeiten für sehr große ρ_P sind eine Folge der sehr hohen Auslastung der SB-Warteschlange in der Kopfstation (98 % Angebot bei $A_R = 70\%$ und $\rho_P = 28\%$).

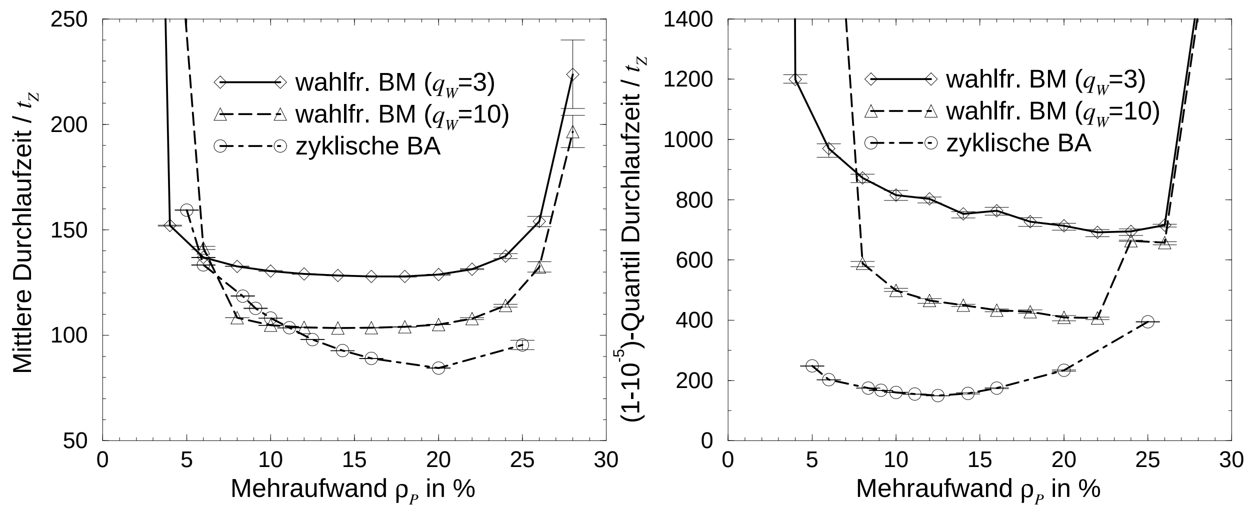


Abb. 5.32: *Vergleich zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (—·—) für das Szenario TS100 anhand der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts).*

Bei Betrachtung der Durchlaufzeiten für das Verkehrsszenario TS10 in Abb. 5.33 fällt auf, daß bei sehr kleinem ρ_P die mittlere Durchlaufzeit mit wahlfreien Bedarfsmeldungen kürzer ist als mit zyklischer Bedarfsabfrage. Dadurch, daß hier nur am Beginn jeder Aktivitätsphase der wahlfreie Zugriff auf Mini-Zeitschlitze zur Bedarfsmeldung durchgeführt wird, sind Kollisionen so selten, daß im Mittel früher eine erfolgreiche Bedarfsmeldung übertragen werden kann als bei der zyklischen Bedarfsabfrage, bei der eine Zugangsstation im Mittel eine halbe Zyklusdauer t_{PE} lang auf die Gelegenheit zur Bedarfsangabe warten muß. Allerdings tritt dieser Vorteil der wahlfreien Bedarfsmeldungen nur im Mittel auf. Das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit zeigt wieder den Einfluß der (selteneren) Folgekollisionen. Die Anzahl der Folgekollisionen läßt sich durch Vergrößerung von ρ_P nicht wesentlich verringern, da für die Verteilung der Anzahl der Folgekollisionen der Aufspreizungsfaktor die wichtigere Größe ist. Dies ist bei einem Vergleich der Kurven für $q_W = 3$ und $q_W = 10$ in Abb. 5.33 rechts deutlich zu sehen.

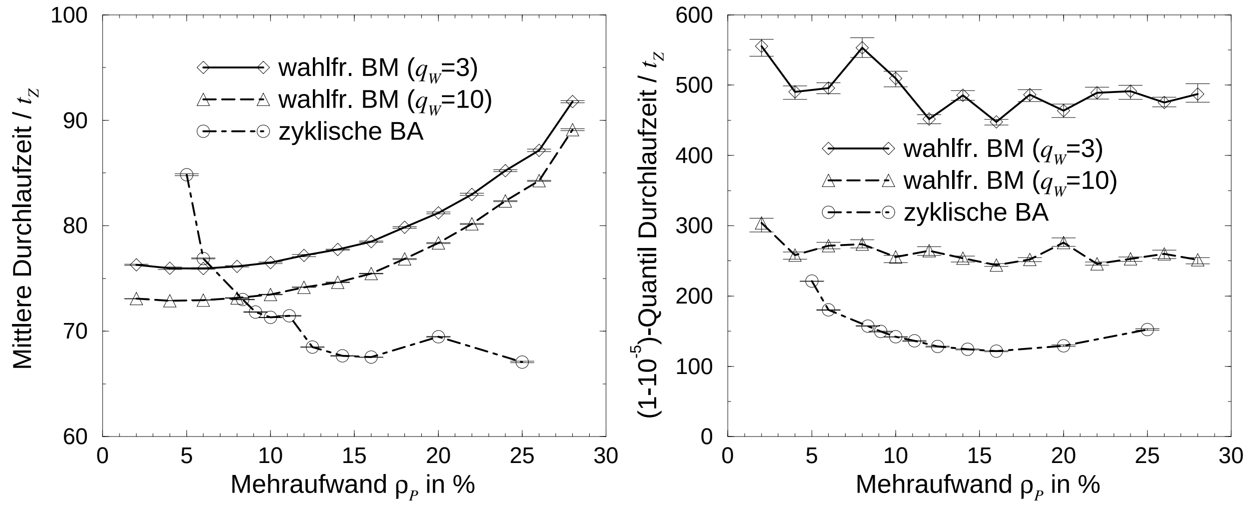


Abb. 5.33: *Vergleich zwischen wahlfreier Bedarfsmeldung bei $q_W = 3$ (——) und $q_W = 10$ (– – –) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (–·–) für das Szenario TS10 anhand der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts).*

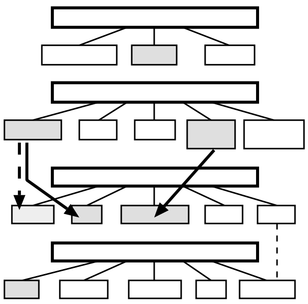
Der Vergleich zwischen wahlfreien Bedarfsmeldungen und zyklischer Bedarfsabfrage zeigt bei den gewählten Parametern, daß durch die zyklische Bedarfsabfrage in allen Szenarien eine deutlich geringere Durchlaufzeit entsteht als durch wahlfreie Bedarfsmeldungen. Für diesen Vergleich wurde angenommen, daß in beiden Mechanismen dieselbe Anzahl m an Minizeitschlitzen je Zeitschlitz eingesetzt werden kann. In der Praxis kann es sein, daß m für wahlfreie Bedarfsmeldungen geringer gewählt werden muß als für zyklische Bedarfsabfrage, wenn die Synchronisation des Empfängers in der Kopfstation auf den unbekannten Sender einer Bedarfsmeldung länger dauert als die Synchronisation auf den bekannten Absender einer Bedarfsangabe.

5.5 Aktivitätsangaben

5.5.1 Hintergrund

Anstelle der in den vorangegangenen Abschnitten untersuchten Bedarfsangaben und -meldungen, bei denen sich der Empfänger der Kopfstation in jedem Mini-Zeitschlitz erneut auf den Sender der jeweiligen Zugangsstation aufsynchronisieren muß, werden hier die in Abschnitt 4.3.1 beschriebenen Aktivitätsangaben (AA) und -meldungen (AM) betrachtet. Dabei wird ohne Synchronisationspräambel eine binäre Zustandsinformation der Zugangsstation zur Kopfstation übertragen (s. Abb. 4.5). Durch die eingesparte Präambel stehen entsprechend mehr Mini-Zeitschlitze je Zeitschlitz zur Verfügung. Den folgenden Ergebnissen liegt die Annahme zugrunde, daß je Zeitschlitz $m = 50$ Mini-Zeitschlitze mit binärer Aktivitätsinformation übertragen werden können.

Die Aktivitätsinformation soll normalerweise die Information „Warteschlangenlänge > 0“ enthalten. In der Kopfstation wird diese Information als „Warteschlangenlänge $= 1$“ gelesen und mit dem in Anhang B.1 beschriebenen Algorithmus verarbeitet. Die dort enthaltenen Maximum- und Minimum-Operationen bewirken, daß eine positive Aktivitätsangabe genau dann in die Information „eine neue Ankunft“ umgesetzt wird, wenn der Zähler M_i für die Zugangsstation i den Wert Null hatte. Das Verfahren ist weiterhin robust gegenüber Verlusten von Aktivitätsangaben. Die eingesetzten Mechanismen bezüglich der Zusammenstellung aus Abb. 4.1 sind in Abb. 5.34 dargestellt.



Datenübertragung:
nach Reservierung
Übertragung von Reservierungen:
periodisch + an ATM-Zellen gekoppelt
Inhalt der Bedarfsangaben:
Aktivität (Warteschlangenlänge>0) + neue Ankünfte (WSL)
Formung des Verkehrsprofiles:
keine

Option: inkrementelle Aktivität

Abb. 5.34: *Eingesetzte Mechanismen für Aktivitätsangaben.*

Als Alternative werden in Abschnitt 5.5.3 auch *inkrementelle Aktivitätsangaben* (IAA) betrachtet. Eine inkrementelle Aktivitätsangabe muß von der Kopfstation gesondert behandelt werden, indem anstelle der Maximum/Minimum-Operationen eine positive IAA behandelt wird wie eine Bedarfsangabe, die eine Warteschlangenlänge angibt, die um Eins größer ist als der für die betreffende Zugangsstation im Zähler M_i (vgl. Anhang B.1) gespeicherte Wert.

So können die inkrementellen Aktivitätsangaben auch innerhalb einer Aktivitätsphase zur Verkürzung der Zugriffszeit beitragen.

Die Robustheit bleibt dabei allerdings nur eingeschränkt erhalten: Wenn eine ATM-Zelle von einer Zugangsstation mit vorher leerer Warteschlange zu übertragen ist und die für sie zur Kopfstation gesendete IAA bei der Übertragung verfälscht wird, dann kann dieser Fehler erst bei der Ankunft der nächsten zu übertragenden ATM-Zelle behoben werden.

Im folgenden wird zunächst in Abschnitt 5.5.2 ein analytisches Modell für ein System mit Aktivitätsangaben vorgestellt, das die Ensemble-Verteilung der Durchlaufzeiten für ein ansonsten leeres System mit einer einzelnen TS-Quelle liefert. Darin können die wesentlichen Effekte erkannt werden, die Beiträge zur Durchlaufzeitverteilung liefern. Anschließend werden in Abschnitt 5.5.3 Bedarfs- und Aktivitätsangaben und IAA anhand von Simulationsergebnissen verglichen. Das Konzept der Aktivitätsangaben wird dann in Abschnitt 5.5.4 auf wahlfreie Bedarfsmeldungen ausgedehnt, und die Ergebnisse werden in Abschnitt 5.5.5 zusammengefaßt.

5.5.2 Analyse

Die in Anhang A.4 beschriebene Analyse erlaubt die Bestimmung der Durchlaufzeit-Verteilungsdichtefunktion für zyklische Aktivitätsangaben, wenn in einem System nur eine einzelne TS-Quelle ATM-Zellen erzeugt. Diese Analyse zeigt damit die Grenzen auf, die mit der Methode der Aktivitätsangaben erreichbar sind, wenn beispielsweise in einem System mit mehreren Prioritätsklassen die Quelle mit der höchsten Priorität betrachtet wird oder wenn die Systemauslastung gering ist. Allerdings bestimmen die in Anhang A.4 gefundenen Effekte in den bisher untersuchten Szenarien auch das Verhalten eines Systemes mit mehr als einer Quelle in derselben Prioritätsklasse, wie in Abschnitt 5.5.3 gezeigt werden wird.

Abb. 5.35 zeigt die Verteilungsdichtefunktion nach Simulation und Analyse unter den im Anhang in Abschnitt A.4.6.1 zu Abb. A.20 angegebenen Parametern (C_B gleichverteilt zwischen 1 und 8). Die Ergebnisse aus Anhang A.4 ermöglichen es, die in Abb. 5.35 eingezeichneten Grenzbereiche und Eigenheiten der Verteilungsdichtefunktion zu quantifizieren.

Die wesentlichen Stellen des Graphen der Verteilungsdichtefunktion in Abb. 5.35 sind mit den Marken 1 bis 7 bezeichnet. Die minimale Durchlaufzeit 1 der ATM-Zellen durch das System ist 3τ, vgl. (5.4). Bei den hier gewählten Parametern ist $3\tau = 54 t_Z$. Die maximale Durchlaufzeit im ansonsten leeren System tritt bei der zweiten Zelle eines Büschels auf, wenn die effektive Aktivitätsabfrageperiode t_{PE} größer ist als die Quellenperiode t_Q im Büschel, vgl. Abb. A.10 und A.12. Diese Zelle wartet zunächst während der Dauer $t_{PE} - t_Q$, bis die erste Zelle des Büschels in einer Aktivitätsangabe an die Kopfstation gemeldet wird. Da die Aktivitätsangabe nur eine binäre Information trägt, kann die Ankunft der zweiten Zelle nicht gleichzeitig gemeldet werden. Dies geschieht erst um die Zeit $T_{II} = 2\tau + \xi_I t_Z$ später (A.45), wenn für die erste Zelle des Büschels eine Sendeberechtigung an der Zugangsstation eintrifft. In der an diese Zelle gekoppelten Bedarfsangabe können der Kopfstation alle weiteren bis zu diesem Zeitpunkt erfolgten Zellankünfte gemeldet werden. Desweiteren ist noch die Wartezeit der für die zweite Zelle erzeugten Sendeberechtigung in der zentralen Warteschlange der Kopfstation zu berücksichtigen, die in dem hier dargestellten Fall einen Zeitschlitz beträgt, weil gleichzeitig mit dem Eintreffen der Bedarfsangabe an der Kopfstation zunächst eine Sendeberechtigung für einen der zyklisch eingeplanten Aktivitätsangaben-Blöcke erzeugt wird ($\xi_{II}(1) = 1$ nach (A.49)). Das Maximum ② der Durchlaufzeit ist dadurch im Fall $t_{PE} > t_Q$:

$$T_{D_{max}} = 5\tau + t_{PE} - t_Q + \xi_I t_Z + \xi_{II}(1) t_Z \tag{5.11}$$

Im dargestellten Beispiel ist $t_{PE} = 24 t_Z$, $t_Q = 10 t_Z$, $\xi_I(1) = 0$ und $\xi_{II}(1) = 1$ und daher $T_{D_{max}} = 105 t_Z$.

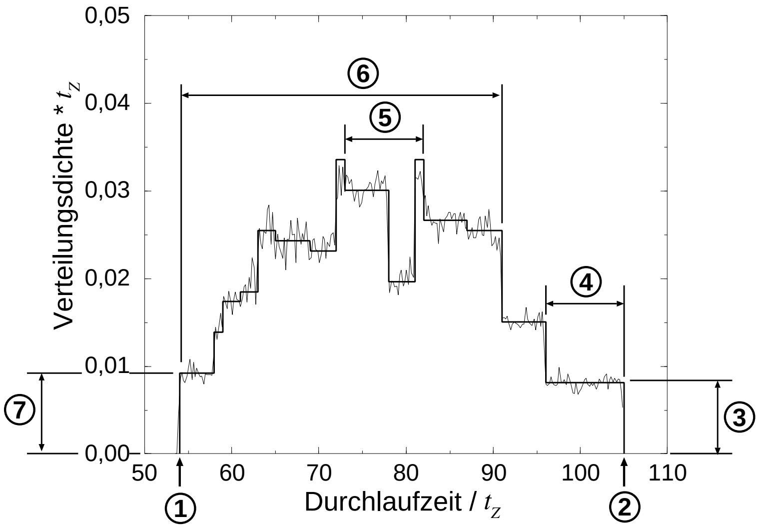


Abb. 5.35: *Grenzbereiche der Verteilungsdichtefunktion im Szenario ITS10 (eine TS-Quelle und C_B zwischen 1 und 8, vgl. Anhang A.4.6.1).*

Die Ensemble-Verteilungsdichte dieses nur durch die zweite Zelle eines Büschels bestimmten Bereiches der Verteilung ③ ist leicht zu berechnen. Dabei ist zu berücksichtigen, daß nur Büschel mit mindestens zwei Zellen zu diesem Bereich der Verteilung beitragen.

$$f_{T_D}(t) = \frac{1}{t_{PE} \mathrm{E}[C_B]} \mathrm{P}\{C_B > 1\} \text{ für } t \lessapprox T_{D_{max}} \tag{5.12}$$

Die dritte Zelle im Büschel hat nochmals eine um t_Q kürzere Wartezeit T_{RW} bis zur nächsten Möglichkeit, ihre Ankunft an die Kopfstation zu melden. Die in der Kopfstation daraufhin erzeugte Sendeberechtigung wartet allerdings einen Zeitschlitz länger in der zentralen Warteschlange, da zunächst die Sendeberechtigung für die zweite Zelle ausgesendet wird. Daher ist der Abstand ④ zwischen den Bereichen der Verteilung für die zweite und die dritte Zelle nur $t_Q - t_Z$. Eine entsprechende Größe ⑤ findet man auch in den Spitzen der Verteilungsdichte. Unter dem Einfluß der zyklischen Pausen durch Sendeberechtigungen für Aktivitätsangabenblöcke kann dieser Abstand nochmals um t_Z geringer ausfallen (in Abb. 5.35 nicht zu sehen). Hier ist $t_Q - t_Z = 9t_Z$.

Die folgenden Zellen erfahren Durchlaufzeiten zwischen 3τ und etwa 5τ (abhängig von den Unterbrechungen durch die Sendeberechtigungen für Aktivitätsabfrageblöcke und dem Warteverhalten der Sendeberechtigungen in der zentralen Warteschlange der Kopfstation) ⑥. Wenn die erste Zelle des Büschels alleine die minimalen Wartezeiten bestimmt (Einschwingvorgang erreicht nicht die Phase IV, vgl. Anhang A.4.4.4), dann ist ihr Beitrag zur Verteilungsdichtefunktion ⑦ bei $t \gtrapprox 3\tau$:

$$f_{T_D}(t) = \frac{1}{t_{PE}\mathrm{E}\left[C_B\right]} \text{ für } t \gtrapprox 3\tau \tag{5.13}$$

Abb. 5.36 zeigt die gleiche Beschriftung wie oben für das in Abb. A.24 in Abschnitt A.4.6.3 dargestellte Szenario (C_B gleichverteilt zwischen 1 und 20). Durch die höhrere Obergrenze von 20 für die Büschelgröße C_B wird der Bereich kurzer Wartezeiten ⑦ nicht mehr durch die erste Zelle im Büschel dominiert, vgl. Abschnitt A.4.4.4. Die anderen charakteristischen Größen der Verteilung sind auch hier deutlich zu erkennen, auch wenn die Modellierung hier nicht mehr exakt ist (vgl. Anhang A.4.4.4).

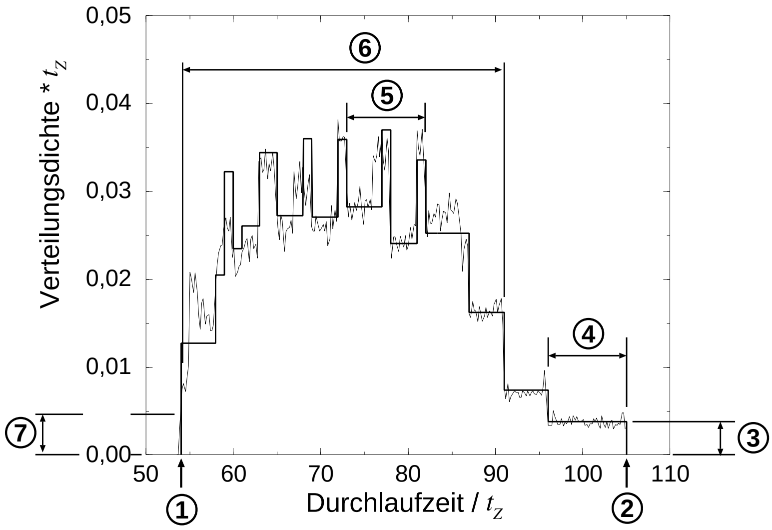


Abb. 5.36: *Grenzbereiche der Verteilungsdichtefunktion im Szenario ITS10 mit C_B zwischen 1 und 20 (vgl. Anhang A.4.6.3).*

Zusammenfassung der Analyseergebnisse

Die Zweipunkt-Zellverzögerungsschwankungen (Länge des Bereiches der Verteilungsdichtefunktion zwischen ① und ②) werden bei dem hier betrachteten Verfahren für $t_Q < t_{PE}$ im Leerlauf durch die folgende Beziehung gegeben:

$$CDV^{(2)}_{AA/L} = T_{D_{max}} - 3\tau = 2\tau + \max\{t_{PE} - t_Q, 0\} + (\xi_I(1) + \xi_{II}(1))t_Z \tag{5.14}$$

Die komplementäre Verteilungsfunktion der Durchlaufzeit ist für große t (Bereich ④, kurz vor ②) nach (5.11) und (5.12) gegeben durch:

$$f^C_{T_D} = \mathbf{1}\{t \leq T_{D_{max}}\}\frac{(T_{D_{max}} - t)}{t_{PE}\mathrm{E}\,[C_B]}\mathrm{P}\{C_B > 1\} \text{ für } t > T_{D_{max}} - t_Q + t_Z \text{ und } t_Q < t_{PE} \tag{5.15}$$

5.5.3 Vergleich zwischen Bedarfs- und Aktivitätsangaben

Die Simulation erlaubt, im Gegensatz zur oben dargestellten verkehrstheoretischen Analyse, auch die Untersuchung von Systemen mit mehreren Quellen und solchen mit Quellenparametern außerhalb des für die Analyse verlangten Bereiches.

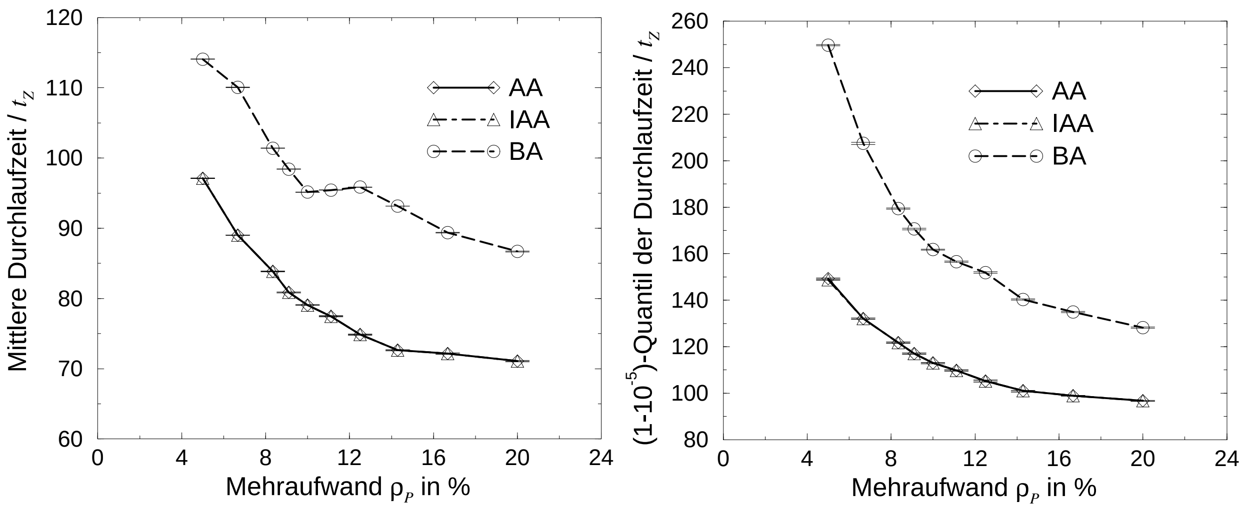


Abb. 5.37: *Vergleich bezüglich der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts) zwischen Aktivitätsangaben (——), inkrementellen Aktivitätsangaben (—·—) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (– – –) für das Szenario ND100.*

Abb. 5.37 zeigt links den Mittelwert und rechts das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario ND100 nach Tab. 5.1 bei Verwendung von Aktivitätsangaben (AA), inkrementellen Aktivitätsangaben (IAA) oder zyklischen Bedarfsangaben (BA), wobei jeweils zusätzlich normale Bedarfsangaben an die in der Rückrichtung übertragenen ATM-Zellen gekoppelt sind. Da hier jede Quelle nur alle 100 Zeitschlitze eine Zelle aussendet, ist kein

Unterschied zwischen AA und IAA zu sehen. Dagegen zeigt sich im Vergleich zu zyklischen Bedarfsangaben, daß bei AA und IAA sowohl die mittlere Durchlaufzeit als auch ihr (1-10^{-5})-Quantil durch die kürzeren effektiven Abfragezyklen der Aktivitätsangaben wesentlich geringer sind. Die effektive Abfrageperiode ist

$$t_{PE} = t_P \left\lceil \frac{n_0}{m} \right\rceil \tag{5.16}$$

mit $t_P = t_Z/\rho_P$. Für die Aktivitätsabfrage ($m=50$) ergibt sich daraus

$$t_{PE}/t_Z = \left\lceil \frac{128}{50} \right\rceil / \rho_P = 3/\rho_P \tag{5.17}$$

und für die Bedarfsabfrage ($m=16$):

$$t_{PE}/t_Z = \left\lceil \frac{128}{16} \right\rceil = 8/\rho_P \tag{5.18}$$

Die Wartezeit bis zum Abschicken einer Bedarfs- oder Aktivitätsangabe ist dabei gleichverteilt zwischen 0 und t_{PE}. Diese Verhältnisse spiegeln sich in Abb. 5.37 wider, wobei zu beachten ist, daß die Summe der Laufzeiten $3\tau = 54t_Z$ ist und daß durch die Gruppenankünfte der Bedarfsangaben für mehrere Stationen an der Kopfstation weitere Warteeffekte (T_{PW} in (5.4)) auftreten, die zum Teil bereits durch den konzentrierten Multiplexer (Abschnitt 5.2) beschrieben werden, zum Teil aber auch auf die Gruppenankünfte der Bedarfsangaben an der Kopfstation zurückzuführen sind.

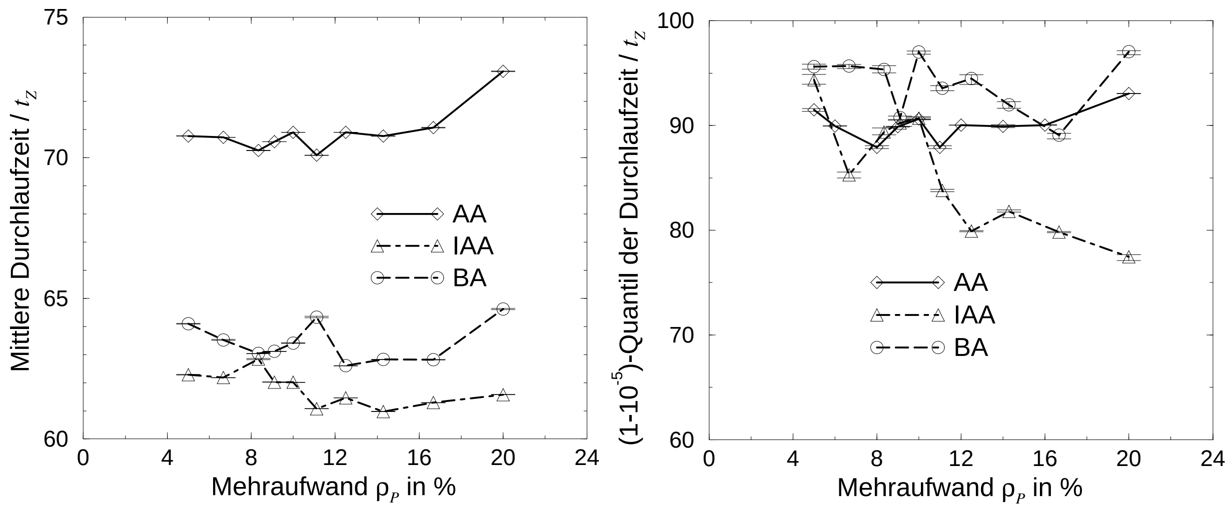


Abb. 5.38: *Vergleich bezüglich der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts) zwischen Aktivitätsangaben (——), inkrementellen Aktivitätsangaben (—·—) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (– – –) für das Szenario ND10.*

Die Wirkung der inkrementellen Aktivitätsangaben wird deutlicher, wenn man das Szenario ND10 betrachtet, in dem die Warteschlangenlängen in den Zugangsstationen größer als Eins werden. Die in Abb. 5.38 dargestellten Maße der Durchlaufzeit zeigen, daß mit IAA im Vergleich zu AA noch geringere Durchlaufzeiten erreicht werden können. Für dieses Szenario ist allerdings die Durchlaufzeit ohnehin wesentlich geringer als für das oben beschriebene ND100, da hier die an die ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben einen wesentlichen Teil der Meldung neu angekommener ATM-Zellen übernehmen; bei AA sind sie sogar der einzige Mechanismus, der im stationären Zustand noch wirksam ist (vgl. Anhang A.4). Insgesamt ist hier kein wesentlicher Unterschied zwischen den Verfahren zu sehen, wenn man die gespreizte Skalierung der Diagramme in Abb. 5.38 berücksichtigt.

Daß die Analyse aus Anhang A.4 die Effekte der Wartevorgänge in der Zugangs- und Kopfstation auch für eine größere Anzahl von Quellen immer noch recht gut beschreibt, ist in Abb. 5.39 zu sehen. Hier werden Simulations- und Analyseergebnisse für unterschiedliche Szenarien mit demselben Quellentyp gegenübergestellt. Für den Vergleich mit ND10 wurde in der Analyse nur die Phase IV (vgl. (A.69) in Abschnitt A.4.4.4) berücksichtigt. Man sieht, daß die Verteilung von den bereits im Leerlauf auftretenden Warteeffekten bestimmt wird und nur durch die auch im konzentrierten Multiplexer zu beobachtenden Wartevorgänge (vgl. Abschnitt 5.2) ergänzt wird. Die gestrichelte Kurve (– – –) in Abb. 5.39 zeigt die Faltung der Verteilungsdichtefunktionen aus (A.69) (dünne durchgezogene Kurve) und (A.10) (gestrichelte Kurve in Abb. 5.8), die sehr gut mit dem Simulationsergebnis (dicke durchgezogene Kurve) übereinstimmt[4].

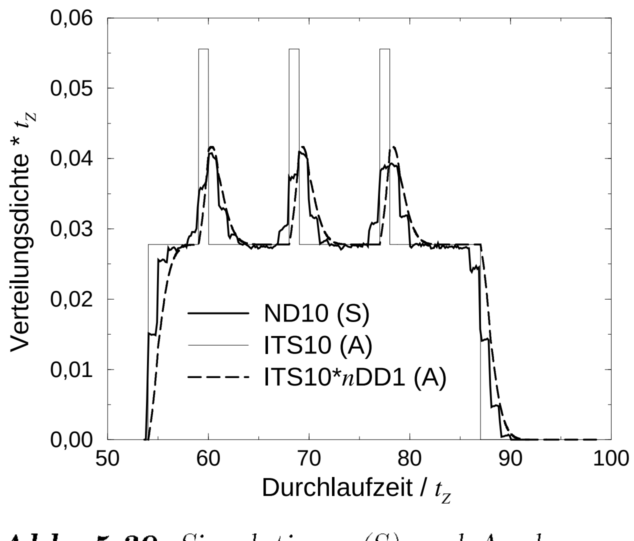


Abb. 5.39: *Simulations- (S) und Analyseergebnisse für die Durchlaufzeit im Szenario ND10 bei Aktivitätsabfrage (AA).*

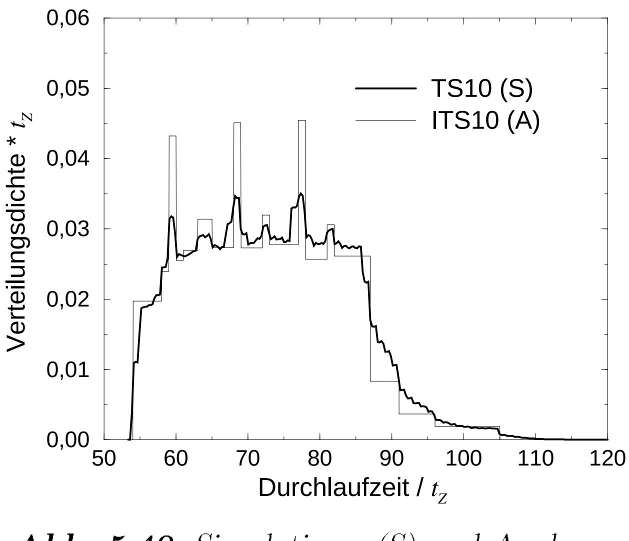


Abb. 5.40: *Simulations- (S) und Analyseergebnisse für die Durchlaufzeit im Szenario TS10/ITS10 bei Aktivitätsabfrage (AA).*

Für das Szenario TS10 ist in Abb. 5.40 die in der Simulation gemessene Durchlaufzeit-Verteilungsdichte dem Ergebnis der Analyse aus dem Szenario ITS10 mit nur einer Quelle

[4]Dies gilt auch für den Bereich größerer Wartezeiten, der in der linearen Darstellung nicht mehr zu erkennen ist. Auf eine gesonderte logarithmische Darstellung wurde aus Platzgründen verzichtet.

gegenübergestellt. Auch hier ist zu sehen, daß in der Verteilung der Durchlaufzeiten Effekte dominieren, die bereits bei der Betrachtung einer einzelnen Quelle sichtbar sind, ohne daß das System hoch ausgelastet sein muß.

Abb. 5.41 zeigt Mittelwert und $(1\text{-}10^{-5})$-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario TS100. Im wesentlichen sind die Verhältnisse mit Szenario ND100 (Abb. 5.37) vergleichbar; eine Ausnahme stellt allerdings das Durchlaufzeitquantil im Bereich $\rho_P > 14\%$ dar. Dort treten bei AA die längsten Durchlaufzeiten auf. Dies ist auf die Annäherung an die Auslastungsgrenze des Systems zurückzuführen, wobei die Aktivitätsangaben bei Warteschlangenlängen von mehr als Eins in den Zugangsstationen keine Ankunftsinformation zur Kopfstation übertragen, während IAA und Bedarsfangaben dies noch tun. Der Bereich einer so großen Auslastung ρ_P durch BA- bzw. AA-Blöcke ist allerdings ohnehin nicht sinnvoll einsetzbar, da das Minimum der erreichbaren Durchlaufzeiten hier bereits deutlich überschritten ist.

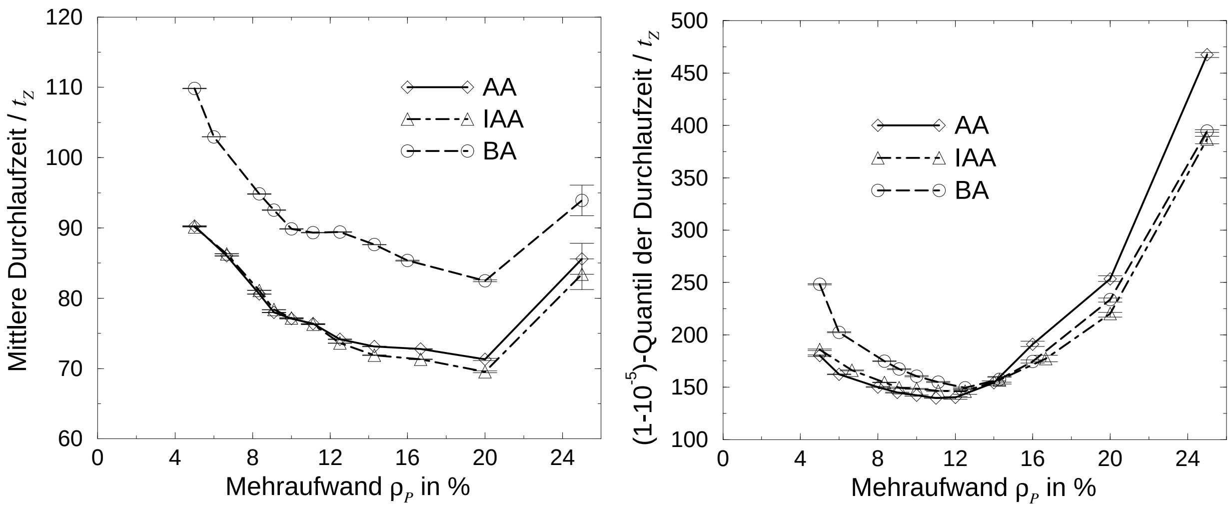


Abb. 5.41: *Vergleich bezüglich der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres $(1\text{-}10^{-5})$-Quantils (rechts) zwischen Aktivitätsangaben (——), inkrementellen Aktivitätsangaben (—·—) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (– – –) für das Szenario TS100.*

Die Betrachtung des Szenarios TS10 in Abb. 5.42 zeigt, daß auch hier das Verfahren der reinen Aktivitätsangaben die größten Durchlaufzeiten erzeugt, die allerdings insgesamt relativ gering bleiben. Zusammenfassend kann aus den Abbildungen 5.37 bis 5.42 gefolgert werden, daß durch den Einsatz von Aktivitätsangaben die großen Durchlaufzeiten, die sonst im Szenario ND100 auftreten, deutlich verringert werden können, ohne daß in den anderen Szenarien die Durchlaufzeiten wesentlich ansteigen würden. Falls es die Anforderungen an die Fehlertoleranz des Medienzugriffs zulassen, kann mit inkrementellen Aktivitätsangaben jeweils das beste Ergebnis erzielt werden.

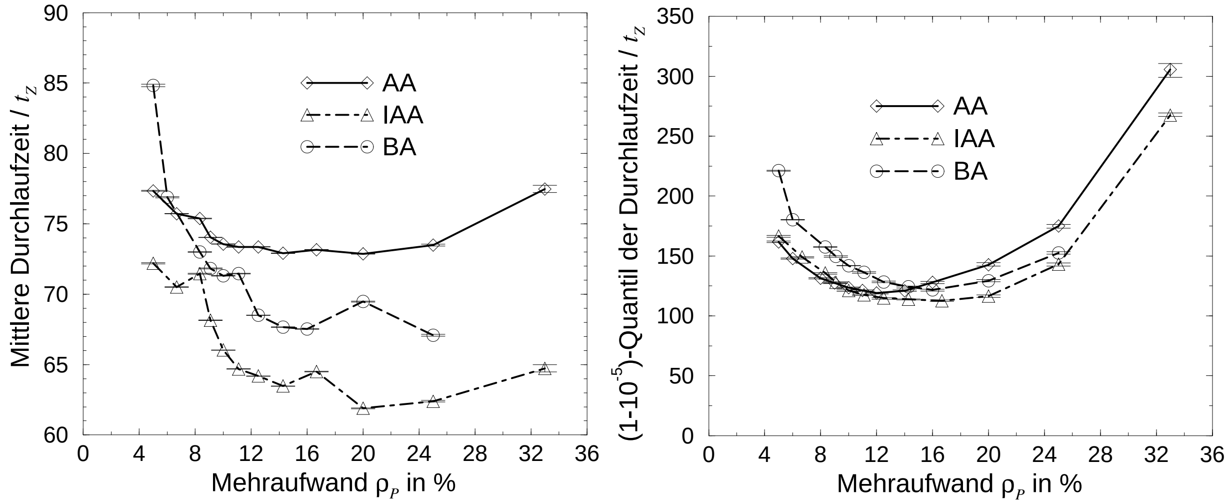
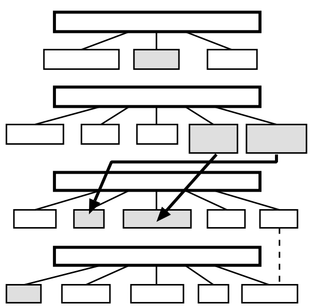


Abb. 5.42: *Vergleich bezüglich der mittleren Durchlaufzeit (links) und ihres (1-10^{-5})-Quantils (rechts) zwischen Aktivitätsangaben (——), inkrementellen Aktivitätsangaben (—·—) und zyklischen Bedarfsangaben mit Kopplung von BA an ATM-Zellen (– – –) für das Szenario TS10.*

5.5.4 Vergleich zwischen wahlfreien Bedarfs- und Aktivitätsmeldungen

Werden die binären Zustandsangaben in Verbindung mit wahlfreiem Zugriff auf Minizeitschlitze eingesetzt, dann soll dies hier durch den Begriff “Aktivitäts**meldung**” (AM) bezeichnet werden. Die eingesetzten Mechanismen sind in Abb. 5.43 bezüglich der Zusammenstellung aus Abb. 4.1 dargestellt. Inkrementelle Aktivitätsmeldungen analog zu den oben beschriebenen inkrementellen Aktivitätsangaben sind hier nicht sinnvoll, da der wahlfreie Zugriff auf Minizeitschlitze nur zu Beginn der Aktivitätsphase einer Zugangsstation erfolgen sollte, um eine Instabilität des Vielfachzugriffs zu vermeiden (vgl. Abschnitt 5.4.1).



Datenübertragung:
nach Reservierung
Übertragung von Reservierungen:
wahlfr. Zugriff auf BA-Blöcke + Koppl. an ATM-Zellen
Inhalt der Bedarfsangaben:
Aktivität (Warteschlangenlänge>0) + neue Ankünfte (WSL)
Formung des Verkehrsprofiles:
keine

Abb. 5.43: *Eingesetzte Mechanismen für Aktivitätsmeldungen.*

Die Diagramme in Abb. 5.44 und 5.45 zeigen, daß durch den Verzicht auf eine vollständige Synchronisation des Empfängers auch bei wahlfreiem Vielfachzugriff auf Mini-Zeitschlitze die Durchlaufzeit der ATM-Zellen durch das Zugangsnetz verringert werden kann. Dies ist

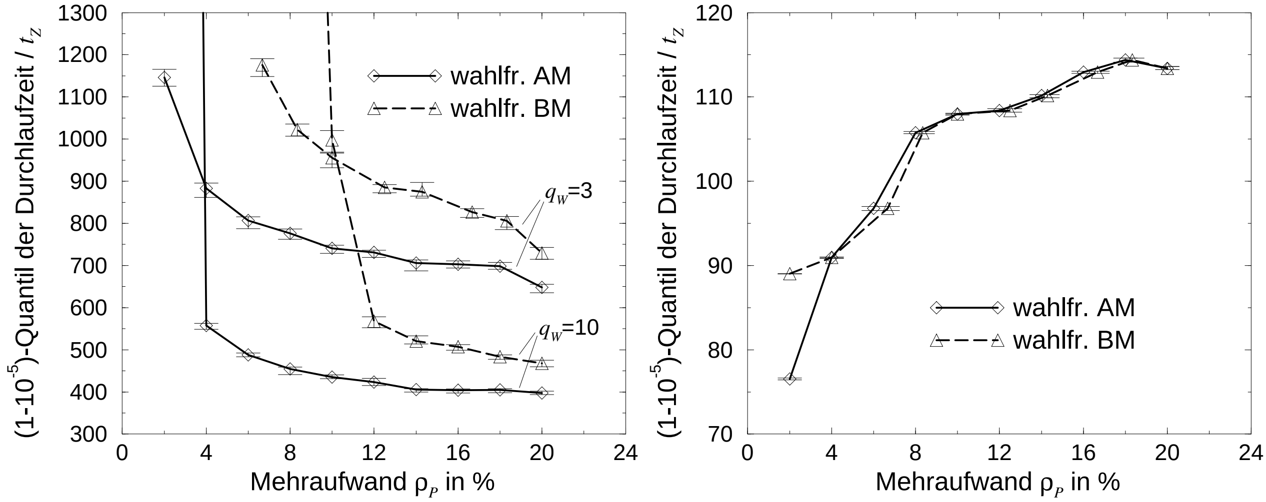


***Abb. 5.44:** (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit bei wahlfreien Aktivitätsmeldungen (AM, ——) und Bedarfsmeldungen (BM, – – –). Links: Szenario ND100, rechts: Szenario ND10.*

besonders deutlich in den Szenarien ND100 und TS100 zu sehen, in denen der Mechanismus der an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben nicht genutzt werden kann. Die Verkürzung der Wartezeit beim Medienzugriff durch Aktivitäts- anstelle von Bedarfsmeldungen ist gleichermaßen bei $q_W = 3$ wie bei $q_W = 10$ zu sehen. Im Szenario ND10 (rechts in Abb. 5.44) wird im stationären Zustand der Mechanismus des Zugriffs auf Mini-Zeitschlitze zur Bedarfsmeldung praktisch nicht mehr eingesetzt, daher gibt es weder einen wesentlichen Unterschied zwischen $q_W = 3$ und $q_W = 10$, noch zwischen Aktivitäts- und Bedarfsmeldungen.

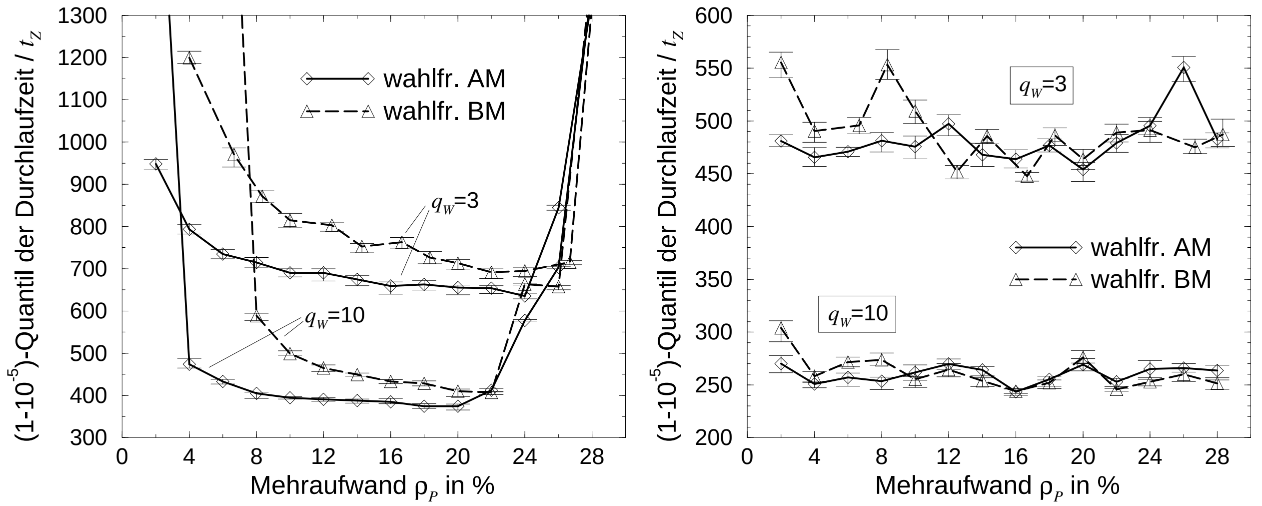


***Abb. 5.45:** (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit bei wahlfreien Aktivitätsmeldungen (AM, ——) und Bedarfsmeldungen (BM, – – –). Links: Szenario TS100, rechts: Szenario TS10.*

Das Szenario TS10 (Abb. 5.45 rechts), in dem nur $n = 10$ von $n_0 = 128$ Zugangsstationen aktiv sind, deren Quellen aber relativ häufig zwischen Ruhe- und Aktivitätsphasen wechseln

(Abb. 5.45 rechts), ist der Unterschied zwischen AM und BM wesentlich kleiner als der zwischen $q_W = 3$ und $q_W = 10$. Da nur wenige Zugangsstationen aktiv sind, ist die Verringerung der Erst-Kollisionswahrscheinlichkeit durch Vergrößerung von m weniger entscheidend als die Beschleunigung der Kollisionsauflösung durch eine Vergrößerung von q_W.

5.5.5 Zusammenfassender Vergleich zwischen zyklischen und wahlfreien Bedarfs- und Aktivitätsangaben bzw. -meldungen

Die Bewertung der Alternativen für den Einsatz von Mini-Zeitschlitzen zur Meldung neuer Ankünfte an die Kopfstation soll mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse aus den vorangegangenen Abschnitten für den festen Wert von $\rho_P = 12,5\%$ abgeschlossen werden. Dieser Wert von ρ_P erscheint bei Betrachtung der Abbildungen 5.19 bis 5.45 als sinnvoller Kompromiß, der für eine Systemauslastung von 80% noch keine Einschränkung darstellt, andererseits aber bereits relativ geringe Durchlaufzeiten ermöglicht. Für die wahlfreie Aktivitäts- oder Bedarfsmeldung wurde der Stack-Parameter $q_W = 10$ gewählt, der in den Abschnitten 5.4 und 5.5.4 bei $\rho_P = 12,5\%$ immer günstigeres Verhalten gezeigt hat als $q_W = 3$.

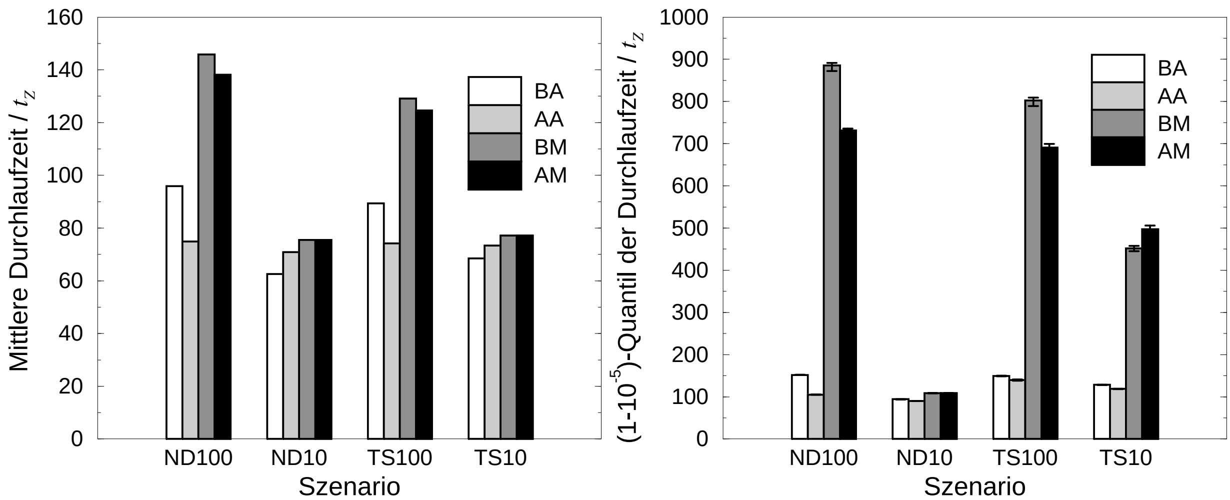


Abb. 5.46: *Mittelwert (links) und (1-10^{-5})-Quantil (rechts) der Durchlaufzeit in den vier Szenarien mit unterschiedlichen Verfahren zur Meldung neuer Ankünfte* (zyklische Bedarfsangaben *(BA)*, zyklische Aktivitätsangaben *(AA)*, *wahlfreie Bedarfsmeldung (BM) und wahlfreie Aktivitätsmeldung (AM)) bei* $\rho_P = 12,5\%$.

Die Diagramme in Abb. 5.46 zeigen, daß bei den gewählten Parametern (insbesondere der relativ großen Rundlaufzeit, vgl. Abschnitt 5.7.3) der wahlfreie Zugriff auf Mini-Zeitschlitze zu größeren Verzögerungen führt als eine feste Zuordnung der Mini-Zeitschlitze zu den einzelnen Zugangsstationen. Dies ist besonders bei der Betrachtung des Durchlaufzeit-Quantils in Abb. 5.46 rechts deutlich zu sehen. In den kritischen Szenarien ND100 und TS100, in denen sehr große Durchlaufzeiten auftreten, können diese sowohl bei wahlfreiem als auch bei festgelegtem Zugriff auf die Mini-Zeitschlitze gesenkt werden, wenn anstelle vollständiger Bedarfsangaben nur binäre Aktivitätsangaben übertragen und dadurch entsprechend mehr Mini-Zeitschlitze pro Zeitschlitz vorgesehen werden können.

Insgesamt erweist sich das Verfahren der zyklischen Aktivitätsabfrage unter den gegebenen Randbedingungen als das günstigste. Weitere Abhängigkeiten der Ergebnisse von den Systemparametern werden in Abschnitt 5.7 diskutiert.

5.6 Formung von Verkehrsprofilen

In dem vorangegangenen Vergleich der verschiedenen Mechanismen für den Medienzugriff wurde die Verteilung beziehungsweise das ($1\text{-}10^{-5}$)-Quantil der Durchlaufzeit als Maß für die Leistungsfähigkeit der Verfahren verwendet. Da in allen bisher betrachteten Fällen das Minimum der Durchlaufzeit bei 3τ liegt, ist die Differenz aus dem Durchlaufzeitquantil und 3τ gleichzeitig das Quantil der Zweipunkt-CDV (vgl. Abschnitt 3.1.2). Diese ist zum Beispiel ausschlaggebend dafür, wieviel zusätzliche Verzögerung und damit Pufferspeicher in einem Element zur Verkehrsformung (*traffic shaper*) vorgesehen werden muß, um einer Zellenfolge wieder ihr ursprüngliches Verkehrsprofil zu geben.

In diesem Abschnitt soll nun die Leistung der unterschiedlichen Verfahren zur in den Medienzugriff integrierten Formung von Verkehrsprofilen verglichen werden. Zur Bewertung der Verfahren wird hier die Einpunkt-CDV eingesetzt, die nicht nur die Verteilung der Durchlaufzeiten, sondern auch mit einem GCRA-ähnlichen Algorithmus die Korrelation aufeinanderfolgender Zellabstände einbezieht. Dadurch ist die Einpunkt-CDV ein Maß für die in der ATM-Quellflußkontrolle (*Usage Parameter Control, UPC*) vorzusehende Toleranz, wenn die betrachtete Zellenfolge bereits ein ATM-Zugangsnetz durchlaufen hat. Das hier verwendete Modul zur Messung der Einpunkt-CDV ist in [93] beschrieben.

5.6.1 Formung im Bündel

Die Vorschläge für das BAF-System [31, 95] beschreiben eine Vorrichtung zur Verkehrsformung im Bündel, vgl. Abschnitt 4.4.2. Nach der Erkenntnis, daß bei der Formung der Abstand zwischen den Sendeberechtigungen größer gewählt werden muß, als es der Summe der Spitzenzellraten der Quellen an einer Zugangsstation entspricht [33], wurde von García et al. zur Dimensionierung des Formungsparameters die „bounded period rule“ angegeben [55]. Danach ist für Zugangsstationen mit einer geringen Summenzellrate der minimale

Abstand zwischen Sendeberechtigungen fest einzustellen (T_{max} in [55]), während bei einer hohen Summenzellrate der Zugangsstation der Mindestabstand auf 80% des Kehrwertes der Summenzellrate einzustellen ist.

Um den Einfluß einer an den Sendeberechtigungen vorgenommenen Verkehrsformung auf das Verkehrsprofil der in der Rückrichtung des Zugangsnetzes geleiteten Verbindungen zu untersuchen, ist in Abb. 5.47 und 5.48 das (1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV als Funktion des Formungsparameters ε dargestellt. Der Formungsparameter ist hier das Verhältnis der Summe der Spitzenzellraten der Quellen an einer Zugangsstation zu der durch die Formung zugelassenen maximalen Rate von Sendeberechtigungen.

$$\varepsilon = \frac{\text{Summe der Spitzenzellraten}}{\text{Formungsrate}} \tag{5.19}$$

In [55] ist somit ε für eine hohe Summenzellrate maximal 0,8 und für geringere Summenzellraten entsprechend geringer.

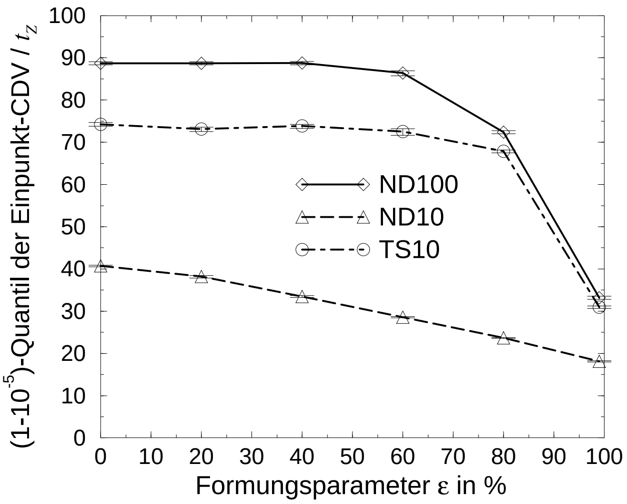


Abb. 5.47: *(1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV in den Szenarien ND100, ND10 und TS10 mit einer Quelle je Zugangsstation als Funktion des Formungsparameters ε.*

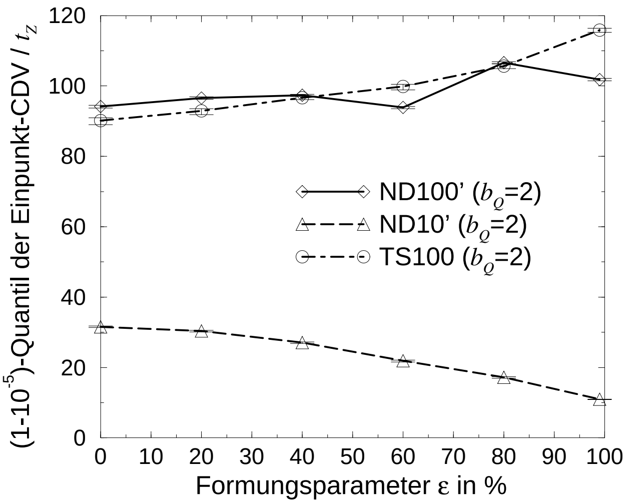


Abb. 5.48: *(1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV in den Szenarien ND100′, ND10′ und TS100 mit $b_Q = 2$ Quellen je Zugangsstation als Funktion des Formungsparameters ε.*

In Abb. 5.47 sind die drei Szenarien dargestellt, in denen sich die Formung jeweils direkt auf die Zellenfolge einer einzelnen Quelle auswirkt, da das Bündel der Quellen an einer Zugangsstation die Größe $b = 1$ hat. Dabei ist zu sehen, daß die Zellverzögerungsschwankungen durch das Durchsetzen eines Mindestabstandes der Sendeberechtigungen für eine Zugangsstation in der Kopfstation reduziert werden können. Im Szenario ND100 ist sogar eine Reduktion des (1-10^{-5})-Quantils der CDV von 89 auf 33 Zeitschlitzdauern möglich.

Die Situation stellt sich völlig verändert dar, wenn größere Bündel betrachtet werden. In Abb. 5.48 ist die Einpunkt-CDV für drei Szenarien mit jeweils zwei Quellen je Zugangsstation dargestellt. Dazu zählt das Szenario TS100 aus Tab. 5.1 sowie die Szenarien ND100′ und ND10′, die in Tab. 5.2 definiert sind.

Szenario		ND100′	ND10′
Quellenperiode	t_Q/t_Z	100	10
Büschelfaktor	b	1	1
Stationen insgesamt	n_0	128	128
aktive Stationen	n	40	4
Quellen pro Station	b_Q	2	2
Angebot in %	A_R	80	80

Tabelle 5.2: *Definition der abgewandelten Szenarien ND100′ und ND10′.*

Die Verkehrsformung des Bündels von zwei Quellen verringert die CDV nur noch im Szenario ND10′, in dem jede der vier Zugangsstationen 20% der Übertragungskapazität beansprucht. In den anderen Szenarien werden die Zellverzögerungsschwankungen sogar verstärkt, so daß der völlige Verzicht auf Vorkehrungen zur integrierten Verkehrsformung im Medienzugriff ($\varepsilon = 0$) besser ist als eine Formung im Bündel. Diese Eigenschaft der *bundle spacer*, die im Widerspruch zu den Ansprüchen von [55] steht, wurde von Panken [115, 116] mit analytischen Modellen bestätigt.

Als Erweiterung der einfachen Verkehrsformung schlägt Panken [116] vor, eine Abwandlung des bei ITU-T und im ATM-Forum [82, 18] standardisierten GCRA (*Generic Cell Rate Algorithm*)-Verfahrens zur impliziten Verkehrsformung in der Kopfstation einzusetzen. Für die Zellen einer ATM-Verbindung sind entsprechende Verfahren zur Verkehrsformung der Spitzenzellrate ohne Toleranz [149, 28] oder mit Toleranz nach dem GCRA bekannt [27]. Ein neuer Aspekt bei der Formung des Flusses von Sendeberechtigungen *vor* dem Eintritt in die zentrale Warteschlange der Kopfstation besteht in den Gruppenankünften, die durch die gleichzeitige Meldung von A_i Zellankünften in einer Bedarfsangabe auftreten. Deshalb wird hier anstelle des in [116] angegebenen Verfahrens, das nur Gruppengrößen $A_i \in \{0; 1\}$ vorsieht, eine flexiblere Alternative betrachtet. Diese basiert auf dem *virtual scheduling algorithm* [27, 82, 18] und ermöglicht eine GCRA-Verkehrsformung auch für Gruppenankünfte mit $A_i > 1$. Die Spezifikation des verwendeten Algorithmus findet sich in Anhang B.2. Für $\varepsilon = 99\%$ ist in Abb. 5.49 die Abhängigkeit der Zellverzögerungsschwankungen von der *burst tolerance* L_i in den Szenarien mit $b_Q = 2$ dargestellt.

Ein Vergleich der Kurven für die Szenarien ND100′ und TS100 in Abb. 5.49 mit Abb. 5.48 zeigt, daß die maximal erreichbare Verringerung der Einpunkt-CDV bei $L \approx 0,4t_Q$ nicht wesentlich besser ist als der völlige Verzicht auf Verkehrsformung ($\varepsilon = 0$ in Abb. 5.48).

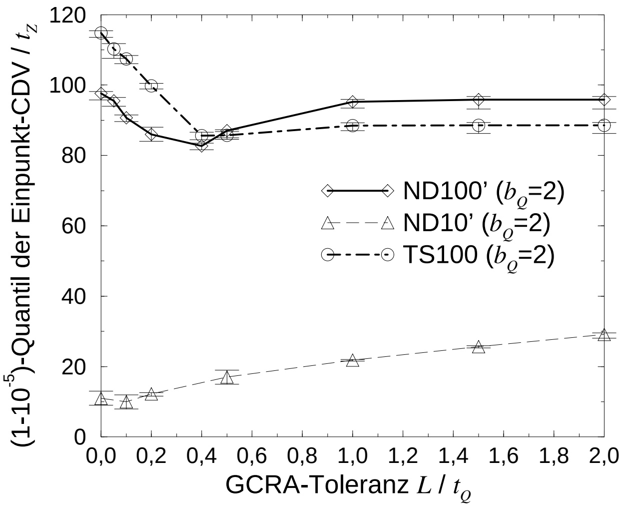


Abb. 5.49: *(1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV in den Szenarien ND100′, ND10′ und TS100 bei $\varepsilon = 99\%$ als Funktion der* burst tolerance L.

Im Szenario ND10′ führt die Einführung einer zusätzlichen *burst tolerance* sogar praktisch immer zu einer Vergrößerung der Zellverzögerungsschwankungen.

5.6.2 Implizite Formung im Zeitrahmen

Die implizite Verkehrsformung im Zeitrahmen, die in Abschnitt 4.4.3 und in [8] als CPP (*Circular Permit Programmer*) beschrieben ist, wird hier hinsichtlich der Einpunkt-CDV mit zyklischen Bedarfsangaben ohne Verkehrsformung verglichen, die ohne Kopplung von Bedarfsangaben an die ATM-Zellen der Rückrichtung eingesetzt werden.

Das (1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV ist in Abb. 5.50 für die Szenarien ND100, ND10 und TS10 mit einer Quelle an jeder aktiven Zugangsstation und in Abb. 5.51 für die Szenarien ND100′, ND10′ und TS100 mit $b_Q = 2$ Quellen an jeder aktiven Zugangsstation als Funktion des Anteiles ρ_P der Übertragungskapazität dargestellt, der für die Übertragung von zyklischen Bedarfsangaben in der Rückrichtung eingesetzt wird.

Abb. 5.50 zeigt, daß bei einer Quelle je Zugangsstation die implizite Verkehrsformung durch CPP die Einpunkt-CDV gegenüber zyklischen Bedarfsangaben ohne Verkehrsformung verringern kann. In den Szenarien ND100 und ND10 ist lediglich eine leichte Verringerung der CDV bei kleinen ρ_P, also langen Abfrageintervallen t_{PE}, zu beobachten. Im Szenario TS10 dagegen wird die CDV auf extrem kleine Werte reduziert. Die Betrachtung des (1-10^{-5})-Quantils der Durchlaufzeit in Abb. 5.52 zeigt allerdings, daß dies auf Kosten einer verlängerten Durchlaufzeit geschieht: Der an sich stark büschelförmige Verkehr der Quelle wird hier durch die Verkehrsformung geglättet.

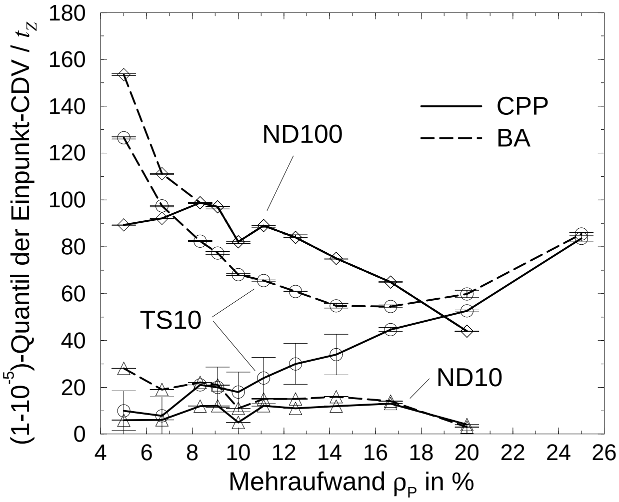


Abb. 5.50: *(1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV in den Szenarien ND100, ND10 und TS10 mit einer Quelle je Zugangsstation als Funktion von ρ_P.*

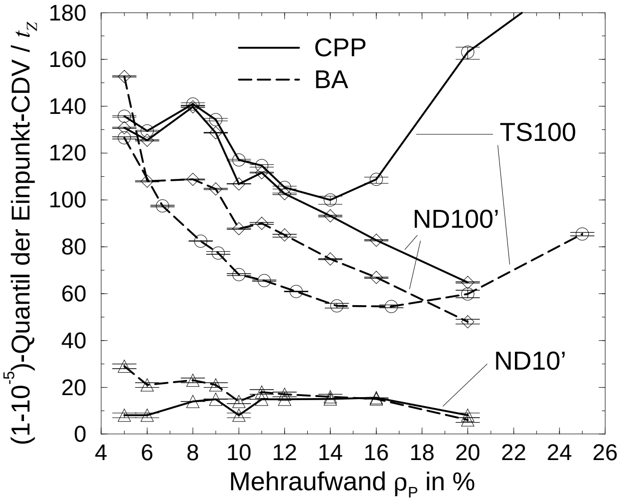


Abb. 5.51: *(1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV in den Szenarien ND100′, ND10′ und TS100 mit $b_Q = 2$ Quellen je Zugangsstation als Funktion von ρ_P.*

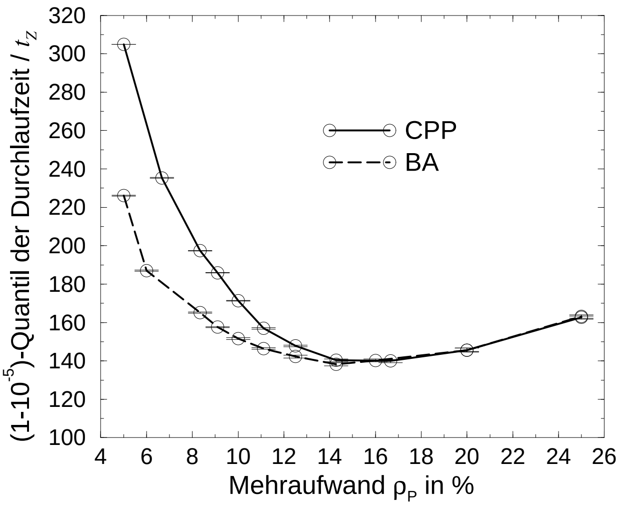


Abb. 5.52: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit im Szenario TS10 als Funktion von ρ_P.*

In den Szenarien mit mehr als einer Quelle je Zugangsstation zeigt sich, daß die implizite Verkehrsformung durch CPP ebensowenig wie die Formung im Bündel geeignet ist, die Zellverzögerungsschwankungen bei Quellen mit geringer Zellrate zu verringern. Die Darstellung des Einpunkt-CDV-Quantils in Abb. 5.51 zeigt eine leichte Erhöhung der CDV durch CPP im Szenario ND100′ und eine sehr große Erhöhung im Szenario TS100. Lediglich im Szenario ND10′ kann bei kleinem ρ_P die CDV durch CPP etwas verringert werden, allerdings nicht so effektiv wie mit der Formung im Bündel (s. Abb. 5.48 und 5.49).

Betrachtet man die Diagramme in Abb. 5.50 bis 5.52 bei einem beliebigen, aber festen ρ_P, dann erkennt man, daß die implizite Verkehrsformung im Bündel insgesamt nicht geeignet ist, die Einpunkt-CDV einzelner Verbindungen zu verringern. Die einzige Verbesserung der CDV findet in den Szenarien mit sehr großer Quellenrate statt, in denen die Einpunkt-CDV ohnehin auch ohne zusätzliche Verkehrsformung einen sehr geringen Wert hat. Vom Einsatz eines Verfahrens, das ansonsten nur in günstigen Fällen ($b_Q = 1$, Quellen mit konstanter Zellrate) eine Verbesserung bewirkt, das aber in anderen, ebenso möglichen Fällen ($b_Q > 1$ oder Quellen mit variabler Zellrate) das Systemverhalten deutlich verschlechtert, sollte daher abgesehen werden. Diese Bewertung gilt ebenso für die in Abschnitt 5.6.1 untersuchte explizite Formung im Bündel.

5.6.3 Explizite Wiederherstellung

Das BPP-Verfahren zur expliziten Wiederherstellung des Verkehrsprofiles wurde bereits in Abschnitt 4.4.4 eingeführt und in [29] simulativ untersucht. Die Ergebnisse [29, 95] zeigen, daß BPP in der in [9] vorgeschlagenen Form die Leistung eines konzentrierten Multiplexers erreicht. Dabei war die zeitliche Auflösung des Verfahrens so gewählt worden, daß die maximal mögliche Präzision erreicht wird, bei der jeder Zeitschlitz der Eingangsleitung einer Zugangsstation auf ein BA-Feld in der Bedarfsangabe abgebildet wird.

Hier wird nun untersucht, welchen Einfluß die zeitliche Auflösung des in den Bedarfsangaben übertragenen Ankunftsmusters auf die Zellverzögerungsschwankungen hat und durch welche physikalischen Randbedingungen der Parameterwahl Grenzen gesetzt werden.

5.6.3.1 Randbedingungen

Jede Zugangsstation muß eine Ankunft pro Rückkanal-Zeitschlitz an die Kopfstation melden können. Die beste zeitliche Auflösung wird erreicht, wenn für jeden Zeitschlitz ein Bit in einer Bedarfsangabe vorgesehen wird. Wenn man $2^\eta - 1$ Zeitschlitze zusammenfaßt, dann kann man die Anzahl der angekommenen ATM-Zellen in diesem Block von Zeitschlitzen mit η Bits kodieren. Da für die Synchronisierung b_{PHY} Oktetts vor jedem Datenblock gesendet werden müssen, kann der Mehraufwand reduziert werden, wenn mehrere Bedarfsangaben direkt nacheinander zur Kopfstation übertragen werden.

In Abb. 5.53 ist der Zusammenhang zwischen η, r und der Rahmendauer t_R dargestellt. Die Rahmendauer ist durch die Anzahl $2^\eta - 1$ der für eine Bedarfsangabe zusammengefaßten Zeitschlitze und die Anzahl r der Bedarfsangaben im Rahmen festgelegt:

$$t_R = r \cdot (2^\eta - 1)\, t_Z \tag{5.20}$$

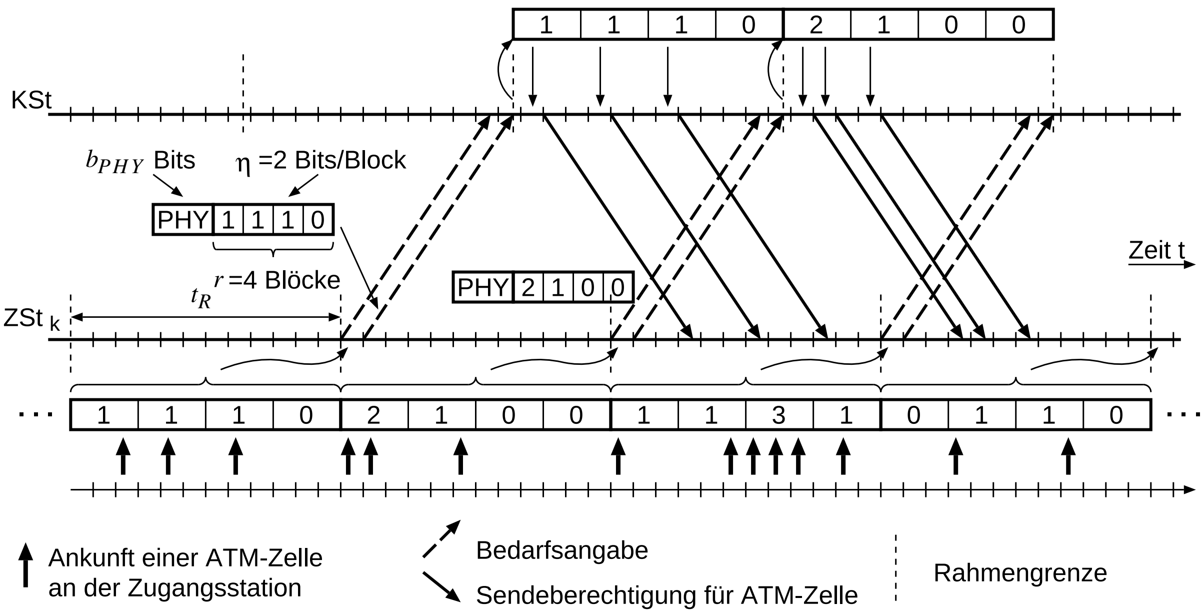


Abb. 5.53: *Bezug zwischen t_R, r und η bei expliziter Wiederherstellung des Verkehrsprofiles.*

Wenn n_0 Stationen einmal pro Rahmen ihre Ankünfte melden müssen, dann erhält man für den Anteil der für Bedarfsangaben eingesetzten Übertragungskapazität:

$$\rho_P = n_0 \cdot \frac{b_{PHY} + r\eta}{r \cdot (2^\eta - 1) \cdot (b_{PHY} + b_{ATM})} \tag{5.21}$$

Die Durchlaufzeit im leeren System ist durch $3\tau + t_R$ bestimmt, wobei Verarbeitungs- und Übertragungszeiten in der Größenordnung der Dauer eines Zeitschlitzes vernachlässigt werden sollen. Die Durchlaufzeitschwankung dagegen hängt nur von η und der Durchlaufzeitschwankung in einem entsprechenden konzentrierten Multiplexer mit der Übertragungsgeschwindigkeit $v_K(1 - \rho_P)$ ab.

Der BA-Anteil ρ_P und die Rahmendauer t_R sind in Abb. 5.54 als Funktionen von η dargestellt, wobei als Parameter die Anzahl r der im Rahmen zusammengefaßten Bedarfsangaben gewählt wurde. Nur die markierten ganzzahligen Werte von η sind möglich; die Punkte wurden lediglich zur besseren Übersicht durch Kurven verbunden. Für die physikalischen Verhältnisse wurde $b_{PHY} = 16$ Bit gewählt; eine ATM-Zelle enthält $b_{ATM} = 424$ Bits.

Es ist deutlich zu sehen, daß eine große Effizienz, also ein kleines ρ_P, nur erreichbar ist, wenn η oder r groß ist. Im ersten Fall bedeutet dies, viele Zeitschlitze zu einer Bedarfsangabe zusammenzufassen und damit eine größere *Durchlaufzeitschwankung* in Kauf zu nehmen, während im zweiten Fall eine große Rahmendauer und damit eine große *Mindestverzögerung* auftritt.

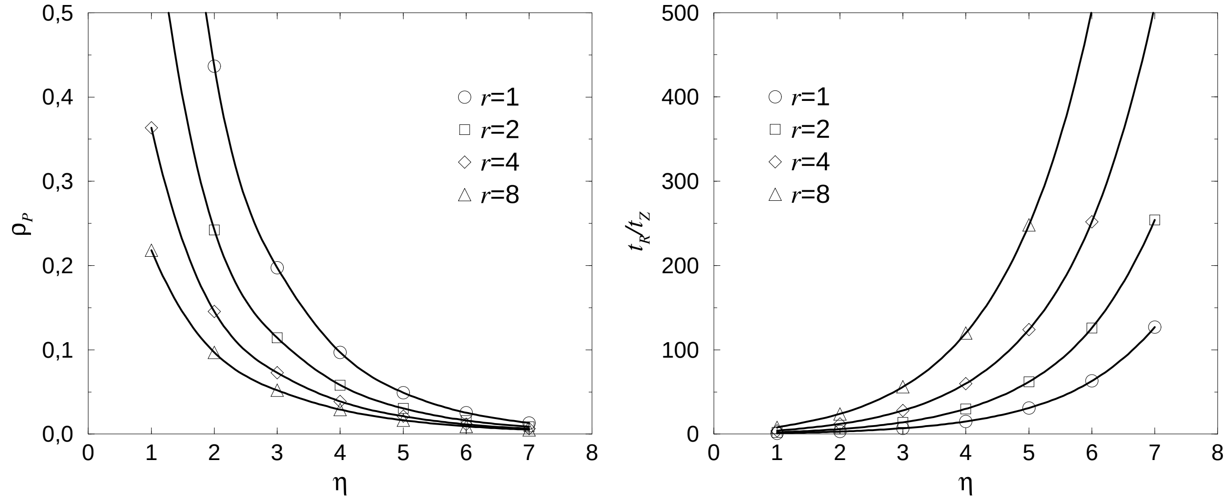


Abb. 5.54: *Mehraufwand ρ_P (links) und Rahmendauer t_R (rechts) bei BPP als Funktionen der Anzahl überdeckter Zeitschlitze η pro Bedarfsangabe. Parameter: Anzahl der im Rahmen zusammengefaßten Bedarfsangaben $r = 1/2/4/8$; $n = 32$ Zugangsstationen.*

Abb. 5.55 zeigt die Grenzen für r und η, mit denen $\rho_P < 15\,\%$ ist. Die dick eingezeichnete Linie verbindet die Punkte, an denen für ein gegebenes r das kleinstmögliche η eingesetzt wird, so daß $\rho_P < 15\,\%$ ist. Der betreffende Wert für η ist jeweils an der entsprechenden Ursprungsgeraden (dünn gepunktet) abzulesen, während die zugeordnete Rahmenlänge durch die Ordinate des Punktes gegeben ist.

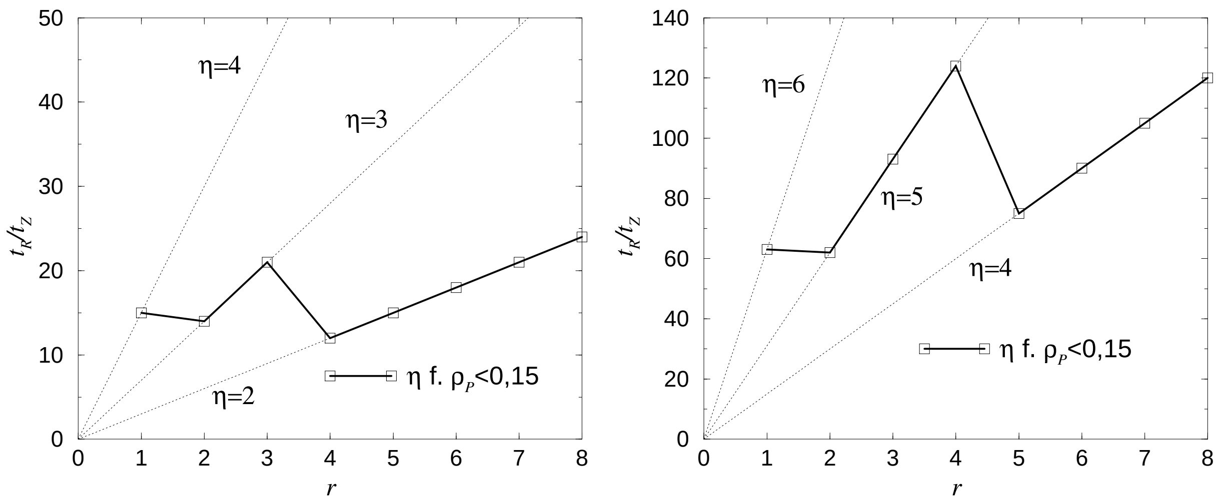


Abb. 5.55: *Grenzen für $\rho_P < 0,15$ bei $n_0 = 32$ (links) oder $n_0 = 128$ Zugangsstationen (rechts).*

Im Fall $n_0 = 32$ (Abb. 5.55 links) müssen mindestens drei Zeitschlitze zusammengefaßt werden ($\eta = 2$), wobei die kleinstmögliche Rahmenlänge $t_R = 12 t_Z$ bei $r = 4$ erreicht wird. Im Fall $n_0 = 128$ (Abb. 5.55 rechts) muß $\eta \geq 4$ sein. Bei $\eta = 4$ entsteht der kürzestmögliche Rahmen für $r = 5$ mit $t_R/t_Z = 75$ Zeitschlitzen.

Diese Betrachtungen zeigen die grundsätzlichen physikalischen Randbedingungen bei der Wahl der Parameter η und r. Zusätzliche Randbedingungen können entstehen, wenn die Blöcke der Bedarfsangaben im Rahmen eine ganze Anzahl von Zeitschlitzen ausfüllen sollen, so daß zusammen mit den zu übertragenden ATM-Zellen ein durchgängiger Zeitschlitztakt möglich wird. Diese Einschränkungen werden hier nicht näher betrachtet.

Im Originalvorschlag für BPP wurde davon ausgegangen, daß eine Teilnehmeranschlußleitung nur ein Viertel der Übertragungskapazität des Zugangsnetz-Kanales hat. Dadurch konnten je drei Teilnehmeranschlüsse in einer Zugangsstation zusammengefaßt werden, so daß eine Reduktion von ρ_P mit $\eta = 2$ ohne Verringerung der zeitlichen Auflösung des Verfahrens möglich wurde. Dabei wird die Anzahl der Zugangsstationen reduziert, was nicht den sonst hier vorausgesetzten Randbedingungen entspricht. Da BPP mit dieser verkleinerten Anzahl an Zugangsstationen besonders geringe CDV-Werte zeigt, soll diese Abweichung von den Randbedingungen hier ausnahmsweise betrachtet werden. Es sei jedoch darauf hingewiesen, daß das Zusammenfassen von Zugangsstationen auch bei den anderen untersuchten Verfahren große Vorteile hat, da bei gleichem ρ_P eine kürzere Abfrageperiode t_{PE} erreicht wird.

Betrachtet man nur das Zusammenfassen von NTs zu Zugangsstationen, dann muß bei BPP je Zeitschlitz und angeschlossener NT eine ankommende ATM-Zelle gemeldet werden können. Werden die Ankünfte von u NTs zusammen in einer Zugangsstation zwischengespeichert, dann können in einem BA-Feld die Ankünfte aus $\lfloor (2^\eta - 1)/u \rfloor$ Zeitschlitzen an diesen NTs gemeldet werden. Damit erhält man die Rahmendauer

$$t_R = r \cdot \left\lfloor \frac{2^\eta - 1}{u} \right\rfloor t_Z \quad , \quad u \geq 1 \tag{5.22}$$

In die Beziehung für ρ_P muß nun die Anzahl n_{NT} der NTs anstelle der Anzahl n_0 der Zugangsstationen eingesetzt werden, und zwar aufgerundet auf das nächste ganze Vielfache von n_0:

$$\begin{aligned} n_0 &= \left\lceil \frac{n_{NT}}{u} \right\rceil \\ n'_{NT} &= u \cdot n_0 \\ \rho_P &= n'_{NT} \cdot \frac{b_{PHY} + r\eta}{r \cdot (2^\eta - 1) \cdot (b_{PHY} + b_{ATM})} \end{aligned} \tag{5.23}$$

Die Vergrößerung von u bringt damit entweder bei konstantem η eine kürzere Rahmendauer, oder sie ermöglicht es, η zu vergrößern und damit ρ_P zu verringern, ohne daß dies zu einer geringeren Präzision der Ankunftsinformation führte. Die Anzahl überdeckter Zeitschlitze und damit die Präzision der Ankunftsinformation ist $\lfloor (2^\eta - 1)/u \rfloor$. Um die Bedarfsangaben optimal auszunützen, muß daher der Quotient $(2^\eta - 1)/u$ eine ganze Zahl sein, was zu den in Tab. 5.3 zusammengestellten optimalen Kombinationen von η und u führt.

η	1	2	3	4	5	6	7
$2^\eta - 1$	1	3	7	15	31	63	127
u	1	1;3	1;7	1;3;5;15	1;31	1;3;7;9;21;63	1;127

Tabelle 5.3: *Mögliche Kombinationen von η und u.*

5.6.3.2 Simulationsergebnisse

Bei der Frage, welcher Wert von η noch akzeptabel ist, kann eine einfache Simulation eines getakteten Multiplexers mit einer Zusammenfassung der Ankünfte von jeweils $(2^\eta - 1)$ Zeitschlitzen zu einer Gruppenankunft dienen. Das entsprechende Simulationsmodell ist in Abb. 5.56 dargestellt. Ähnliche Untersuchungen können auch mit dem in [37] vorgestellten analytischen Modell durchgeführt werden, das allerdings bei dem hier betrachteten D-Verkehr zu große Näherungen einführt (vgl. Abschnitt 5.3.1).

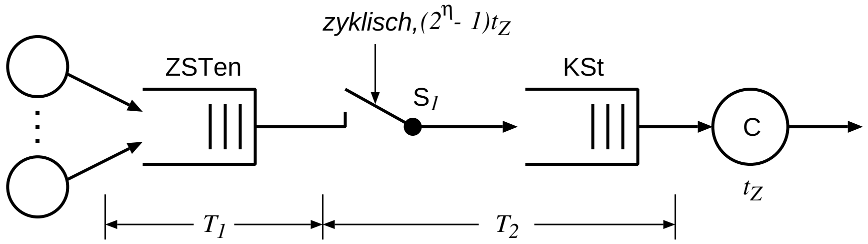


Abb. 5.56: *Einfaches Simulationsmodell zur Untersuchung des Einflusses von η auf die Einpunkt-Zellverzögerungsschwankungen.*

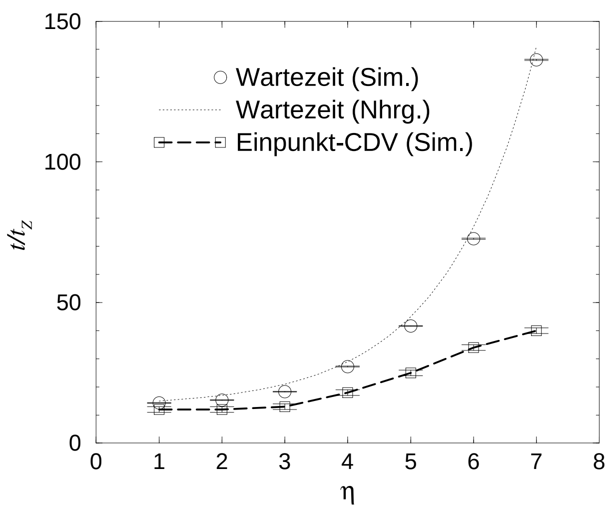


Abb. 5.57: *Einfluß von η auf das (1-10^{-5})-Quantil von Wartezeit und Einpunkt-CDV mit den Quellen des Szenarios ND100.*

In Abb. 5.57 wird zunächst ohne Rücksicht auf die oben beschriebenen physikalischen Randbedingungen der Einfluß von η alleine auf die Einpunkt-CDV und die Durchlaufzeit dargestellt. Dabei ist zu erkennen, daß das (1-10^{-5})-Quantil der Einpunkt-CDV weniger stark von $(2^\eta - 1)$ beeinflußt wird als das entsprechende Quantil der Durchlaufzeit. Für letzteres ist als Näherung die Kurve

$$t/t_Z = 15 + (2^\eta - 2) \qquad (5.24)$$

als dünne gepunktete Linie mit in Abb. 5.57 eingetragen. Diese Kurve beschreibt die Summe aus dem (1-10^{-5})-Quantil des variablen Anteils T_1+T_2 der Durchlaufzeit eines konzentrierten Multiplexers im Szenario ND100 ($15t_Z$, vgl. Abb. 5.8) und der maximalen zusätzlichen Verzögerung durch die Rahmendauer bei $r=1$ ($t_R - t_Z$, vgl. (5.20)). Die gute Übereinstimmung zwischen der Näherungslösung und den Simulationsergebnissen zeigt, daß im dargestellten Parameterbereich die Korrelation zwischen den Wartezeit-Anteilen T_1 und T_2 in Abb. 5.56 nicht wesentlich ist und daß die Bündelung mehrerer Ankünfte zu einer Gruppenankunft keinen Einfluß auf die maximale Wartezeit hat.

Um einen realistischen Vergleich zu erhalten, der den erhöhten Aufwand ρ_P und die dadurch erhöhten Wartezeiten in der Warteschlange der Kopfstation einbezieht, wird zusätzlich der Aufwand zur Übertragung von Bedarfsangaben in die Bediendauer des Multiplexers für eine ATM-Zelle eingerechnet. Dabei erhält man als Ersatz-Bediendauer

$$t'_Z = \frac{t_Z}{(1-\rho_P)} \quad . \qquad (5.25)$$

Analog zur Definition der Szenarien in Tab. 5.1 werden die Randbedingungen hier so gewählt, daß $n_{NT}=128$ NTs abgefragt werden können. In Abb. 5.55 bzw. aus Gleichung (5.23) erhält man als kleinsten möglichen Wert von η für $\rho_P < 0,15$ damit $\eta=4$ und $r \geq 5$. Mit $\eta=4$ und $r=5$ erhält man die in Tab. 5.4 zusammengestellten Parameterwerte. Die letzte Kombination ($u = 15$) muß mit einem größeren r kombiniert werden, da sonst in jedem fünften Zeitschlitz ein BA-Block übertragen werden müßte, so daß $\rho_P = 20\%$ würde.

u	1	3	5	15
n_0	128	43	26	9
n'_{NT}	128	129	130	135
ρ_P in %	13,96	14,07	14,18	14,73
t_R/t_Z	75	25	15	5

Tabelle 5.4: *Optionen für die Kombination von u, ρ_P und t_R bei $\eta=4$, $r=5$ und $n_{NT}=128$.*

Welche der Optionen in einem wirklichen System gewählt werden kann, hängt von topologischen Randbedingungen ab, die darüber entscheiden, wieviele NTs an einer gemeinsamen Zugangsstation angeschlossen werden können.

Für die Fälle $u \in \{1;3;5\}$ und die Szenarien ND100, ND10, TS100 und TS10 sind die Simulationsergebnisse für das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit (inklusive der Laufzeiten und der Rahmendauer) und der Einpunkt-CDV in Abb. 5.58 zusammengestellt. Außerdem sind die entsprechenden Werte für den konzentrierten Multiplexer (vgl. Abschnitt 5.2) mit eingetragen. Das aufgetragene Durchlaufzeit-Quantil $T_D^{(Q)}$ wurde aus dem mit dem Modell aus Abb. 5.56 erhaltenen Wert $T_W^{(Q)}$ nach (5.26) mit (5.22) berechnet. Dabei ist $T_W^{(Q)}$ das entsprechende Quantil der Summe $T_W = T_1 + T_2$ im Modell aus Abb. 5.56.

$$T_D^{(Q)} = 3\tau + t_R + T_W^{(Q)} \tag{5.26}$$

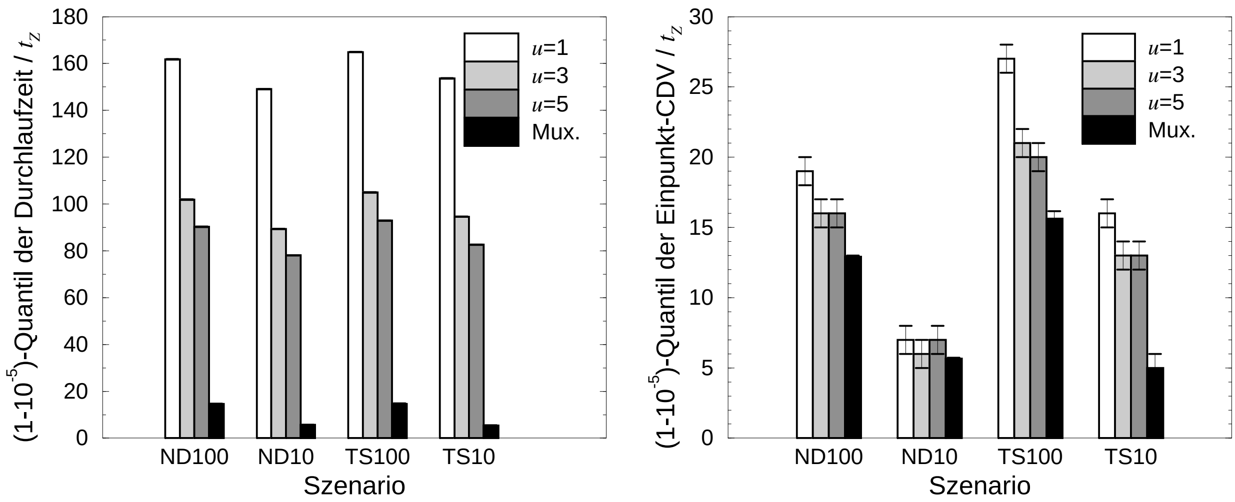


Abb. 5.58: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit (links) und der Einpunkt-CDV (rechts) in den Szenarien ND100, ND10, TS100 und TS10. BPP mit Parametern nach Tab. 5.4 und konzentrierter Multiplexer („Mux.“).*

Eine Vergrößerung von u verringert in allen Szenarien sowohl die Durchlaufzeit als auch die Einpunkt-CDV. Das Quantil der Durchlaufzeit läßt sich durch (5.26) und die zu Abb. 5.57 angegebene Näherung gut darstellen. Die CDV bleibt in der Größenordnung des auch im konzentrierten Multiplexer auftretenden Wertes. Unterschiede zwischen den Szenarien ND100 und ND100′ treten nicht auf, da jede Zugangsstation hier effektiv mehrfach pro Quellenperiode abgefragt wird, so daß die CDV im wesentlichen durch die Warteeffekte in der zentralen Warteschlange für Sendeberechtigungen erzeugt wird und weniger durch Wartevorgänge in den Zugangsstationen.

In Abb. 5.59 ist schließlich das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit und der Einpunkt-CDV für BPP und für die in Abschnitt 5.3 untersuchte zyklische Bedarfsabfrage ohne Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen gegenübergestellt. Dabei ist zu sehen, daß trotz der zusätzlich benötigten Rahmendauer t_R in BPP durch die gegenüber der normalen zyklischen Bedarfsabfrage stark verringerten Zellverzögerungsschwankungen das Quantil der

Durchlaufzeit nicht wesentlich ansteigt. Das Quantil der Einpunkt-CDV (Abb. 5.59 rechts) ist bei BPP in allen Szenarien deutlich geringer als bei der zyklischen Bedarfsabfrage.

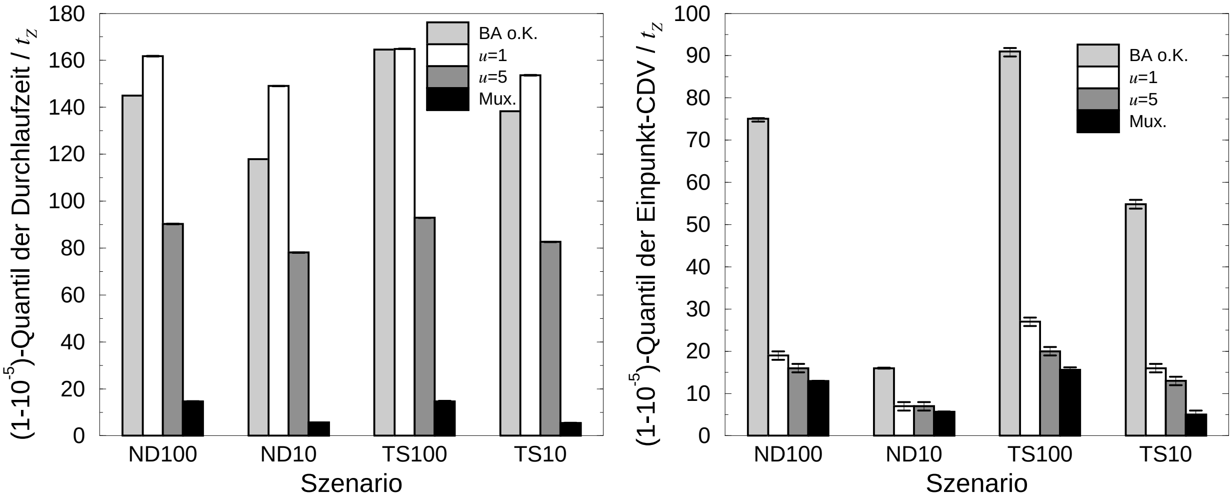


Abb. 5.59: *$(1\text{-}10^{-5})$-Quantil der Durchlaufzeit (links) und der Einpunkt-CDV (rechts) in den Szenarien ND100, ND10, TS100 und TS10. Zyklische Bedarfsabfrage ohne BA-Kopplung an ATM-Zellen bei $\rho_P = 1/7$; BPP mit $u = 3$ oder $u = 5$ bei $\rho_P \approx 1/7$ und konzentrierter Multiplexer.*

5.7 Einflüsse weiterer Parameter

Nachdem in den Abschnitten 5.2 bis 5.6 im wesentlichen die in Tab. 5.1 definierten Verkehrsszenarien mit den in Abschnitt 2.7.3.4 festgelegten Systemparametern untersucht wurden, sollen hier diese Systemparameter und die Szenarien selbst variiert werden, um deren Einfluß auf die Ergebnisse zu untersuchen.

Dazu wird in Abschnitt 5.7.1 die Quellrate t_Q und in Abschnitt 5.7.2 die Anzahl n der aktiven Stationen und damit das Verkehrsangebot A_R variiert. In Abschnitt 5.7.3 wird der Einfluß der Rundlaufzeit 2τ auf das $(1\text{-}10^{-5})$-Quantil der Durchlaufzeit untersucht. Schließlich wird in Abschnitt 5.7.4 die zyklische Aktivitätsabfrage mit der wahlfreien Aktivitätsmeldung verglichen, wobei als Parameter der Anteil aktiver Zugangsstationen und die Rundlaufzeit verwendet werden.

5.7.1 Quellrate

Die Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der Quellrate wird in einem System mit nur einer aktiven Zugangsstation ($n = 1$) untersucht. Dies entspricht den Randbedingungen der Analyse des „Einschwingverhaltens“ bei Aktivitätsabfrage in den Abschnitten 5.5.2 und A.4. Im

Gegensatz zu einem konzentrierten Multiplexer sinkt die Durchlaufzeit bei den hier untersuchten Verfahren für $A_R \to 0$ nicht auf Null ab, da die Medienzugriffssteuerung eine von der Rundlaufzeit 2τ, der effektiven Abfrageperiode t_{PE} und der Quellrate $1/t_Q$ abhängige Zeit braucht, um die Ankunft einer ATM-Zelle an einer Zugangsstation an die Kopfstation zu melden. Diese Zeit ist zusätzlich davon abhängig, ob der Medienzugriff im stationären Zustand oder im Übergang zwischen Pausen- und Aktivitätsphasen der Quellen betrachtet wird.

Zyklische Bedarfsabfrage

Die Anwendung der in Anhang A.4 gewonnenen Erkenntnisse auf die zyklische Bedarfsabfrage ergibt die folgende Abschätzung für die maximale Durchlaufzeit: Im Fall $t_{PE} \leq 2\tau$ kann jede Ankunft spätestens nach der Zeit t_{PE} an die Kopfstation weitergemeldet werden. Eine schnellere Meldung kann zwar stattfinden, sie verringert aber nicht die maximale Durchlaufzeit. Daher ist die maximale Durchlaufzeit sowohl für eine D- als auch für eine TS-Quelle (vgl. Abschnitt 5.2.2) durch

$$T_{D_{max}} = 3\tau + t_{PE} \tag{5.27}$$

gegeben.

Im stationären Zustand des Medienzugriffes können neu angekommene ATM-Zellen der Kopfstation gemeldet werden, wenn eine Sendeberechtigung für eine bereits früher gemeldete ATM-Zelle an der Zugangsstation eintrifft. Wenn die Zellrate der betrachteten Quelle genügend hoch ist ($t_Q < 2\tau$), dann führt diese Art der Meldung auf eine maximale Durchlaufzeit von

$$T_{D_{max}} = 5\tau - \left\lfloor \frac{t_{PE}}{t_Q} \right\rfloor t_Z \tag{5.28}$$

(vgl. Anhang A.4.4.4). Im Fall $t_{PE} < 2\tau$ begrenzt dieser Vorgang für eine D-Quelle mit $t_Q < 2\tau$ die Durchlaufzeit. Ansonsten ist das Durchlaufzeit-Maximum im leeren System für eine TS-Quelle oder für eine D-Quelle mit $t_Q \geq 2\tau$ durch (5.27) gegeben. Die Abschätzung der maximalen Durchlaufzeit für die verschiedenen MAC-Mechanismen und Verhältnisse von t_Q, t_{PE} und 2τ ist in Tab. 5.5 zusammengestellt.

Abb. 5.60 zeigt das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit bei zyklischer Bedarfsabfrage ($\rho_P = 1/8$) mit Kopplung von Bedarfsangaben an ATM-Zellen der Rückrichtung. Die Markierungen zeigen Simulationsergebnisse mit 95%-Vertrauensintervallen. Durch die gestrichelten Linien sind die Abschätzungen aus (5.27) und (5.28) eingetragen. In dem hier dargestellten Szenario sind die Parameter $t_P = 5t_Z$, $t_{PE} = 64t_Z$ und $2\tau = 36t_Z$, so daß die Fallunterscheidung zwischen (5.27) und (5.28) für die D-Quelle bei $t_Q = 2\tau$ auftritt. Für $t_Q \in (2\tau, t_{PE})$

<table>
<tr><th colspan="2">$T_{D_{max}}$ für</th><th colspan="2">zyklische BA</th><th colspan="2">zyklische AA</th><th colspan="2">wahlfreie AM</th></tr>
<tr><th>t_{PE}</th><th>t_Q</th><th>D</th><th>TS</th><th>D</th><th>TS</th><th>D</th><th>TS</th></tr>
<tr><td rowspan="3">$\leq 2\tau$</td><td>$t_Q < t_{PE}$</td><td rowspan="3">$3\tau + t_{PE}$</td><td rowspan="3">$3\tau + t_{PE}$</td><td rowspan="2">$5\tau - \left\lfloor \frac{2\tau}{t_Q} \right\rfloor t_Z$</td><td>$5\tau + t_{PE} - t_Q$</td><td rowspan="3">—</td><td rowspan="3">—</td></tr>
<tr><td>$t_Q \in (t_{PE}, 2\tau)$</td><td>5τ</td></tr>
<tr><td>$t_Q > 2\tau$</td><td>$3\tau + t_{PE}$</td><td>$3\tau + t_{PE}$</td></tr>
<tr><td rowspan="3">$> 2\tau$</td><td>$t_Q < 2\tau$</td><td>$5\tau - \left\lfloor \frac{t_{PE}}{t_Q} \right\rfloor t_Z$</td><td rowspan="3">$3\tau + t_{PE}$</td><td>$5\tau - \left\lfloor \frac{2\tau}{t_Q} \right\rfloor t_Z$</td><td>$5\tau + t_{PE} - t_Q$</td><td>$5\tau + (r_B - \left\lfloor \frac{2\tau}{t_Q} \right\rfloor) t_Z$</td><td>$5\tau + t_{PE} - t_Q$</td></tr>
<tr><td>$t_Q \in (2\tau, t_{PE})$</td><td rowspan="2">$3\tau + t_{PE}$ (*)</td><td rowspan="2">$3\tau + t_{PE}$ (*)</td><td rowspan="2">$3\tau + t_{PE}$</td><td rowspan="2">$3\tau + t_P$ (*)</td><td rowspan="2">$3\tau + t_P$</td></tr>
<tr><td>$t_Q > t_{PE}$</td></tr>
</table>

* Durch das schwer berechenbare Verhalten der Medienzugriffsverfahren bei $t_Q > 2\tau$ wird der Maximalwert von $3\tau + t_{PE}$ bei einer D-Quelle nicht für jede Parameterkombination erreicht. Er wird jedoch in keinem Fall überschritten.

Tabelle 5.5: *Zusammenstellung der Abschätzungen für $T_{D_{max}}$.*

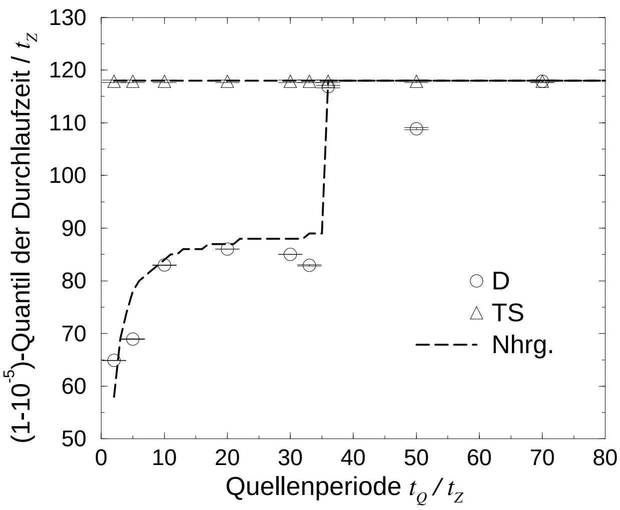


Abb. 5.60: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion der Quellenperiode t_Q. Eine einzelne Quelle (D oder TS) bei zyklischer Bedarfsabfrage mit BA-Kopplung an ATM-Zellen. Markierungen mit 95%-Konfidenzintervallen: Simulationsergebnisse; gestrichelte Linien: analytische Abschätzungen (obere Grenzen) nach Tab. 5.5.*

ist die genaue Verteilung der Durchlaufzeit bereits für eine einzelne Quelle sehr schwer zu bestimmen, da hier – ähnlich wie in chaotischen Prozessen – kleine Änderungen der Quellenperiode große Unterschiede in der Durchlaufzeitverteilung bewirken. Dies ist in Abb. 5.60 an dem deutlich unter $3\tau + t_{PE}$ liegenden Durchlaufzeitquantil für eine D-Quelle mit $t_Q = 50 t_Z$ zu sehen.

Zyklische Aktivitätsabfrage

Die Untersuchung der Leerlauf-Durchlaufzeitverteilung für eine TS-Quelle bei zyklischer Aktivitätsabfrage in Anhang A.4 führt zu den in Tab. 5.5 eingetragenen Ergebnisse für TS- und D-Quellen.

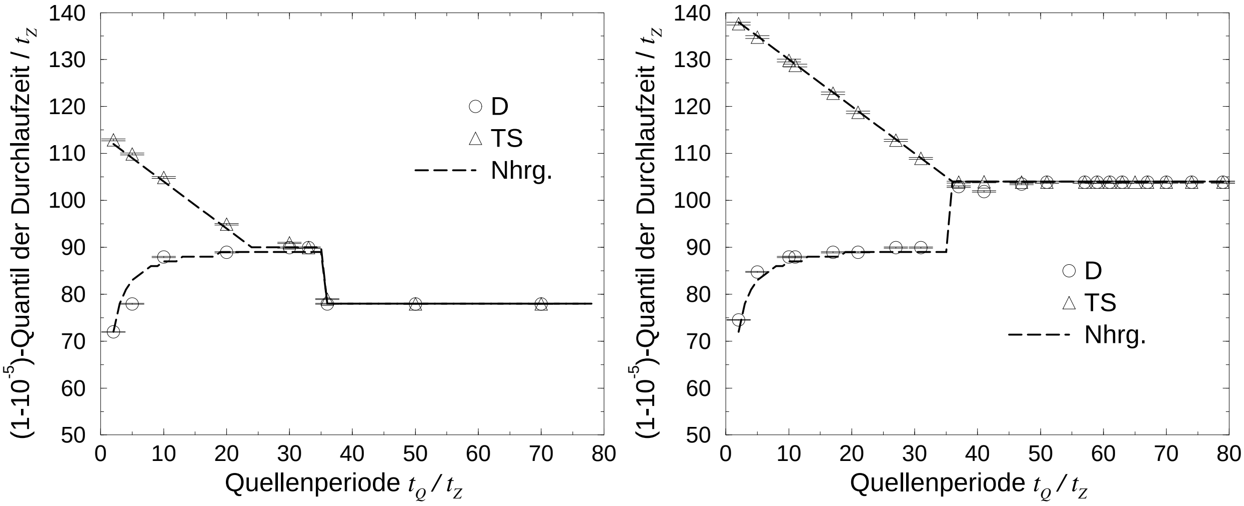


Abb. 5.61: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion der Quellenperiode t_Q. Einzelne Quelle (D oder TS) bei zyklischer Aktivitätsabfrage. Gestrichelt eingezeichnet: analytische Abschätzung (Näherung). Links: $t_{PE} = 24t_Z$, rechts: $t_{PE} = 50t_Z$ bei einer D- oder TS-Quelle.*

Das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit ist in Abb. 5.61 für die zyklische Aktivitätsabfrage dargestellt. Das linke Diagramm zeigt die Verhältnisse für die auch bisher verwendeten Parameter ($\rho_P = 1/8$ und damit $t_{PE} = 24t_Z < 2\tau$), während rechts $t_{PE} = 50t_Z > 2\tau$ gewählt wurde. In beiden Fällen ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem berechneten Maximalwert (**– – –**) nach Tab. 5.5 und den in der Simulation gemessenen Quantilen der Durchlaufzeit (einzelne Punkte) zu sehen.

Wahlfreie Aktivitätsmeldung

Bei wahlfreier Aktivitätsmeldung sind keine Kollisionen zu berücksichtigen, solange nur eine einzelne Quelle aktiv ist. Daher sind die in Abb. 5.62 dargestellten Werte der Durchlaufzeit nicht so aussagekräftig wie für die oben besprochenen Mechanismen. Im wesentlichen entspricht die Abschätzung der maximalen Durchlaufzeit der Rechnung für zyklische Aktivitätsangaben, jedoch mit zwei Unterschieden: Erstens können keine Parameterkombinationen mit $t_{PE} \leq 2\tau$ auftreten, da die Voraussetzungen in Gleichung (5.9), S. 106, sonst nicht erfüllt wären. Zweitens muß für den Fall $t_Q < 2\tau$ noch berücksichtigt werden, daß in jedem Zyklus r_B Zeitschlitze *in Folge* für die wahlfreie Übertragung von Aktivitätsmeldungen vorgesehen sind und daher nicht zur Übertragung von ATM-Zellen zur Verfügung stehen (vgl. Abb. 5.25 auf S. 106). Dadurch vergrößert sich die maximale Durchlaufzeit entsprechend[5] um $r_B t_Z$.

Abb. 5.62 zeigt wiederum eine gute Übereinstimmung zwischen der berechneten Obergrenze

[5] Dies entspricht dem Unterschied $\xi_I t_Z$ zwischen 2τ und T_H in Anhang A.4.4.2, der hier ansonsten nicht berücksichtigt ist.

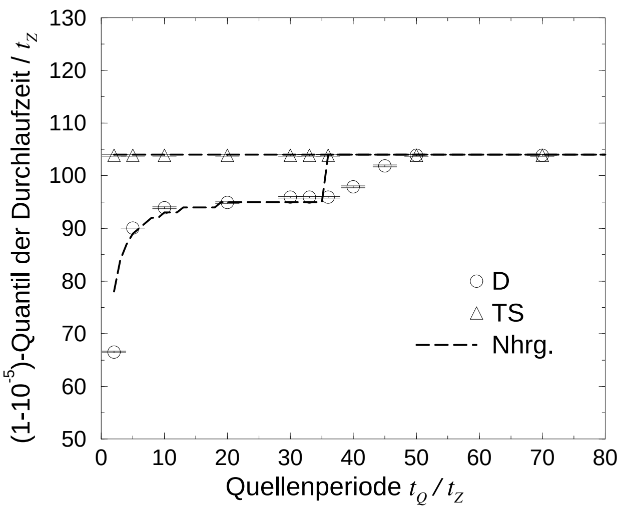


Abb. 5.62: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion der Quellenperiode t_Q. Einzelne Quelle (D oder TS) bei wahlfreier Aktivitätsmeldung.*

der Durchlaufzeit aus Tab. 5.5 und den in der Simulation mit den Parametern $t_P = 50t_Z$, $2\tau = 36t_Z$ und $r_B = 6$ ($\rho_P = 12\%$) gemessenen Werten. Lediglich im Bereich $t_Q \in (2\tau, t_P)$ tritt ein Abweichung auf, die wiederum auf das sehr schwer zu erfassende Verhalten des Medienzugriffsverfahrens in diesem Bereich zurückzuführen ist.

Vergleich zwischen statischem Multiplexen und zyklischer Aktivitätsangabe

Als Alternative zu zyklischen Aktivitätsangaben kann ein statisches Multiplexverfahren eingesetzt werden, wenn kein statistisches Multiplexen unterstützt werden soll. In Abschnitt 5.1 wurde bereits erwähnt, daß für Zugangsstationen mit geringen Zellraten beim statischen Multiplexen entweder viel Übertragungskapazität verschenkt werden muß oder große Durchlaufzeitschwankungen unvermeidbar sind (vgl. Abb. 5.5).

Unter Verwendung der in Tab. 5.5 zusammengestellten Grenzen ist in Abb. 5.63 die Zweipunkt-CDV

$$CDV^{(2)} = T_{D_{max}} - 3\tau \tag{5.29}$$

aufgetragen, der eine einzelne Quelle im Zugangsnetz ausgesetzt ist. Die Parameter bei zyklischer Aktivitätsabfrage sind $2\tau = 36t_Z$ und $t_{PE} = 24t_Z$, bei zyklischer Bedarfsabfrage wurde $t_{PE} = 64t_Z$ angenommen. Die dynamische Zuweisung der Übertragungskapazität durch Bedarfs- oder Aktivitätsabfrage ermöglicht demnach nicht nur das statistische Multiplexen, sondern sie verringert auch die CDV für Quellen mit geringer Zellrate. Andererseits ist die CDV beim statischen Multiplexen unabhängig vom Verkehrsangebot anderer Zugangsstationen, während sie bei bei Bedarfs- oder Aktivitätsabfrage mit dem Verkehrsangebot A_R wächst (s.u.).

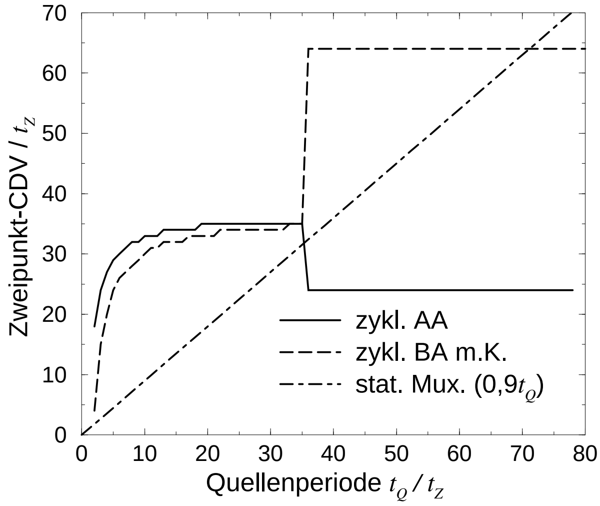


Abb. 5.63: *Zweipunkt-CDV als Funktion der Quellenperiode t_Q. Einzelne D-Quelle bei zyklischer Aktivitätsabfrage, zyklischer Bedarfsabfrage mit BA-Kopplung an ATM-Zellen und bei statischem Multiplexen mit der Periode $h_D = 0,9t_Q$.*

5.7.2 Verkehrsangebot

In einem konzentrierten Multiplexer hat das Verkehrsangebot den entscheidenden Einfluß auf die Wartezeit der Anforderungen. Die hier betrachteten MAC-Mechanismen verursachen dagegen bereits bei einem sehr geringen Verkehrsangebot relativ große Durchlaufzeiten und Durchlaufzeitschwankungen (vgl. Abschnitt 5.7.1). Um den zusätzlichen Einfluß des Verkehrsangebotes A_R auf die Durchlaufzeit zu untersuchen, wird in den in Tab. 5.1 definierten Szenarien die Anzahl n der aktiven Stationen so verändert, daß sich Angebote A_R von etwa 0 bis 87% ergeben. Die theoretische Auslastungsgrenze der zentralen SB-Warteschlange der Kopfstation liegt bei 87,5%, da ein Anteil von $\rho_P = 12,5\%$ der Übertragungskapazität für Bedarfsangabenblöcke eingesetzt wird.

Abb. 5.64 zeigt die Abhängigkeit des (1-10^{-5})-Quantils der Durchlaufzeit bei zyklischer Bedarfsangabe mit BA-Kopplung an ATM-Zellen für die in Bezug auf n modifizierten Szenarien ND100, TS100, ND10 und TS10. Die kleinsten Werte des Durchlaufzeit-Quantils treten bei $n = 1$ auf. Sie können Abb. 5.60 beziehungsweise Tab. 5.5 entnommen werden. Bei zunehmendem Angebot vergrößert sich das Durchlaufzeit-Quantil für jede zusätzliche aktive Station um weniger als t_Z. Bei ND100 und $A_R = 87\%$ treten bereits Verluste auf. Die temporäre Überlast auf der Büschelebene äußert sich in den TS-Szenarien dagegen in erhöhten Wartezeiten, da die große Anzahl der Zugangsstationen insgesamt über eine sehr große verteilte Warteschlange verfügt. Die Stellen, an denen in den TS-Szenarien die Wartezeit stark anzusteigen beginnt, sind identisch mit den Grenzen, auf die die Szenarien in Tab. 5.1 ursprünglich dimensioniert wurden.

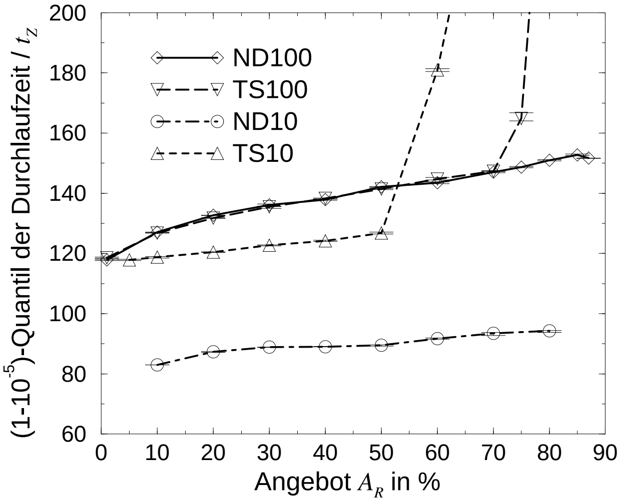


Abb. 5.64: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion des Verkehrsangebots A_R bei zyklischer Bedarfsangabe mit BA-Kopplung an ATM-Zellen ($\rho_P = 1/8$).*

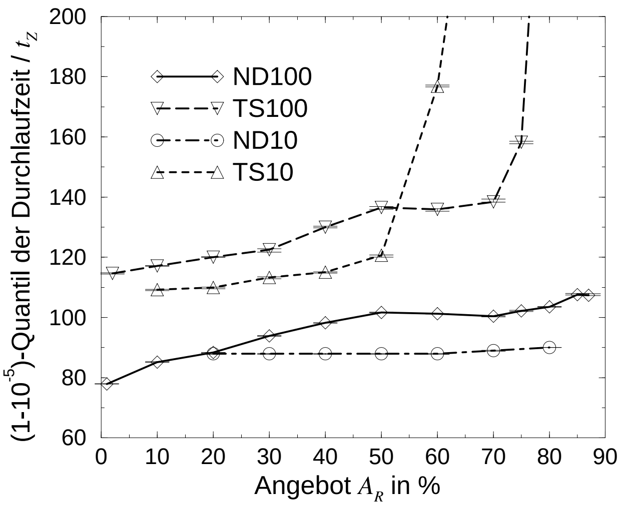


Abb. 5.65: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion des Verkehrsangebots A_R bei zyklischer Aktivitätsabfrage ($\rho_P = 1/8$).*

Dieselbe Untersuchung ist in Abb. 5.65 für die zyklische Aktivitätsabfrage dargestellt. Auch hier zeigen sich für kleine A_R wieder die bereits in Abb. 5.61 beziehungsweise Tab. 5.5 vorgestellten Randwerte. Auch das Verhalten bei zunehmendem A_R ist im wesentlichen dasselbe wie bei der oben diskutierten zyklischen Bedarfsabfrage. Der Einfluß der kürzeren effektiven Abfrageperiode t_{PE} zeigt sich besonders beim Vergleich der Durchlaufzeiten für D-Quellen mit $t_Q = 100 t_Z$ (Szenario ND100) zwischen Abb. 5.65 und 5.64: Das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit ist im Szenario ND100 bei zyklischer Aktivitätsabfrage um etwa $40 t_Z$ geringer als bei zyklischer Bedarfsabfrage. Dies entspricht dem Unterschied zwischen $t_{PE} = 64 t_Z$ bei zyklischer Bedarfsabfrage und $t_{PE} = 24 t_Z$ bei zyklischer Aktivitätsabfrage bei den hier gewählten Parametern.

Für die wahlfreie Aktivitätsmeldung in Abb. 5.66 (vgl. Abschnitt 5.5.4 und Abb. 5.62) zeigt sich eine stärkere Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der Anzahl der aktiven Stationen als für die zyklischen Abfrageverfahren. Um denselben Bereich von A_R darstellen zu können wie in Abb. 5.64 und 5.65, mußte die Skalierung der Durchlaufzeit-Achse geändert werden. Abgesehen vom Szenario ND10, in dem die aktiven Zugangsstationen im stationären Zustand neue Ankünfte ausschließlich über Bedarfsangaben melden, die an ATM-Zellen gekoppelt sind, zeigt sich bereits eine wesentlich größere Durchlaufzeit, wenn nur wenige Zugangsstationen aktiv sind. Dies ist eine Folge der Kollisionen der in Mini-Zeitschlitzen wahlfrei ausgesendeten Aktivitätsangaben und der entsprechenden Wiederholungen. Jede Station, die eine Aktivitätsangabe aussendet, greift nach dem in Abschnitt 5.4.1 beschriebenen Verfahren wahlfrei auf einen von $m \cdot r_B = 300$ Mini-Zeitschlitzen zu. Wenn nur eine Zugangsstation aktiv ist ($A_R = 1\%$ bei ND100 oder TS100 und $A_R = 5\%$ bei TS10), können keine Kollisionen auftreten, so daß das Durchlaufzeitquantil bei $3\tau + t_P = 104 t_Z$ liegt.

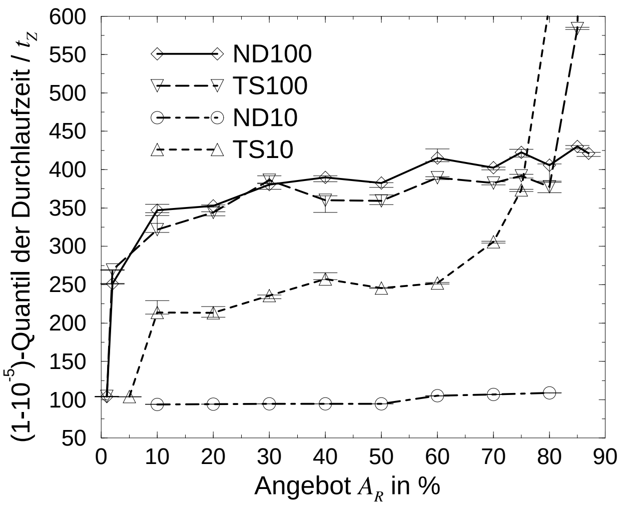


Abb. 5.66: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion des Verkehrsangebots A_R bei wahlfreier Aktivitätsmeldung ($\rho_P = 12\%$, $q_W = 10$).*

Abschätzung der Durchlaufzeit

Bereits bei $n = 2$ aktiven Zugangsstationen besteht eine Erst-Kollisionswahrscheinlichkeit von $\frac{1}{600}$ bei $t_Q = 100$, da jede Zugangsstation in jedem zweiten Zyklus der Dauer $t_P = 50 t_Z$ eine ATM-Zelle zu übertragen hat. Im Falle einer Kollision werden die beteiligten Zugangsstationen jeweils auf $q_W = 10$ Mini-Zeitschlitze aufgespreizt, so daß die Wahrscheinlichkeit einer Folgekollision bei zwei beteiligten Zugangsstationen $1/q_W = 1/10$ beträgt. Das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit bei $n = 2$ wird daher durch den Fall

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{1}{300} \left(\frac{1}{10}\right)^{\nu} \cdot \left(\frac{9}{10}\right) < 10^{-5} \tag{5.30}$$

mit ν Kollisionen bestimmt. Es ergibt sich $\nu_5 = 3$, und die entsprechende Durchlaufzeit

$$T_D = 3\tau + t_P + \nu_5 \cdot t_P \tag{5.31}$$

ist in diesem Fall $T_D = 254 t_Z$. Dieser Wert wird durch die Kurve für ND100 in Abb. 5.66 bei $A_R = 2\%$ bestätigt.

Für den Fall, daß eine größere Anzahl von Zugangsstationen aktiv ist, wird die Näherung aus (5.30) durch die folgenden Überlegungen ergänzt:

Die Wahrscheinlichkeit, mit der eine Zugangsstation in einem Zyklus der Dauer t_P auf einen Mini-Zeitschlitz für wahlfreie Aktivitätsmeldung zugreift, sei p_S. Diese ist gegeben durch

$$p_S = \begin{cases} \frac{t_P}{b \cdot t_Q} & \text{für } t_Q \geq 2\tau \\ \frac{t_P}{b \cdot c_B \cdot t_Q} & \text{für } t_Q < 2\tau \end{cases} \tag{5.32}$$

Für $c_B \to \infty$ geht $p_S \to 0$, was dem Fall eine kleinen Quellenperiode $t_Q < 2\tau$ bei einer periodischen Quelle entspricht. Die Vergrößerung der effektiven Sendewahrscheinlichkeit durch Kollisionen ist relativ gering, solange nur sehr kleine Kollisionswahrscheinlichkeiten betrachtet werden. Daher wird diese in (5.32) nicht berücksichtigt.

Die Wahrscheinlichkeit p_{FK} für eine Folgekollision wird nun nicht nur durch den Aufspreizungsfaktor q_W, sondern auch durch die Wahrscheinlichkeit bestimmt, mit der weitere Stationen in späteren Zyklen auf denselben Mini-Zeitschlitz zugreifen wie eine betrachtete Station. Die Folgekollisionswahrscheinlichkeit ist damit näherungsweise

$$p_{FK} = \frac{1}{q_W} + \frac{(n-1)p_S}{m_B} \tag{5.33}$$

mit p_S nach (5.32) und

$$m_B = m \cdot r_B \tag{5.34}$$

Die Näherung

$$1 - (1 - \frac{p_S}{m_B})^{n-1} \approx \frac{(n-1)p_S}{m_B} \quad , \tag{5.35}$$

die auf (5.33) führt, ist gültig, so lange $n p_S \ll m_B$ ist. Dies ist gleichzeitig eine Bedingung für die Stabilität des wahlfreien Vielfachzugriffsverfahrens und darf daher vorausgesetzt werden. Die Wahrscheinlichkeit für ν Wiederholungen ist damit in grober Näherung

$$p_K(\nu) = (1 - p_{FK}) p_{FK}^{\nu} \frac{(n-1)p_S}{m_B} \tag{5.36}$$

mit p_{FK} nach (5.33), m_B nach (5.34) und p_S nach (5.32). Die Anzahl der aktiven Zugangsstationen ist n.

Durch einfache Umformungen erhält man aus der Bedingung

$$p_K(\nu_5) < 10^{-5} \tag{5.37}$$

die entsprechende Mindestanzahl von Wiederholungen:

$$\nu_5 = \left\lceil \frac{-5\ln(10) + \ln(m_B) - \ln[(n-1)p_S(1-p_{FK})]}{\ln(p_K)} \right\rceil \tag{5.38}$$

Diese Näherung läßt sowohl die Rückwirkung der durch Folgekollisionen verlängerten Zugriffszeit auf die Sendewahrscheinlichkeit p_S, als auch die genaue Verteilung der Anzahl der an einer Kollision beteiligten Zugangsstationen und die daraus resultierende Folgekollisionswahrscheinlichkeit außer Betracht. Dennoch kann mit ihr eine Näherung für das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit gewonnen werden, die allerdings die Wartezeit T_{PW} der Sendeberechtigungen (vgl. (5.4)) nicht enthält:

$$T_D^{Q5} \approx \begin{cases} 3\tau + t_P + \nu_5 t_P & \text{für } t_Q > 2\tau \\ 5\tau - t_Q + t_P + \nu_5 t_P & \text{für } t_Q \leq 2\tau \end{cases} \tag{5.39}$$

Die Näherung ist in Abb. 5.67 für die Szenarien ND100 und TS10 den in der Simulation gemessenen Werten für das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit gegenübergestellt.

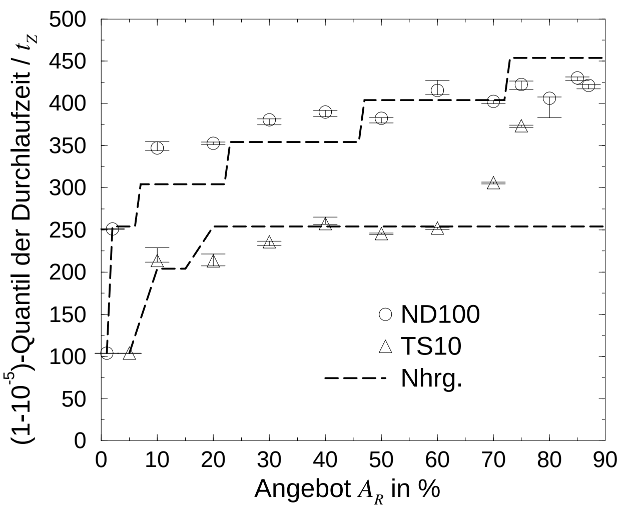


Abb. 5.67: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion des Verkehrsangebots A_R bei wahlfreier Aktivitätsmeldung ($\rho_P = 12\%$, $q_W = 10$): Simulationsergebnisse (Punkte) und analytische Näherung (Linien, nach (5.39)).*

Da (5.39) nur den konstanten Laufzeitanteil und den Anteil T_{RW} in der Durchlaufzeit T_D beschreibt, weichen die Simulationsergebnisse für das Szenario TS10 in Abb. 5.67 bei $A_R >$ 60% stark von der Näherung ab. Für ein kleineres Verkehrsangebot A_R und für das Szenario ND100 ist die Übereinstimmung besser.

5.7.3 Laufzeit

Die bisher angestellten Vergleiche zwischen fester Zuordnung und wahlfreiem Zugriff auf die Mini-Zeitschlitze beruhten auf der Annahme einer relativ langen Signallaufzeit. Da sich die Durchlaufzeit einer ATM-Zelle durch das betrachtete System mit jeder Folgekollision bei wahlfreiem Zugriff auf die Mini-Zeitschlitze um eine Rundlaufzeit verlängert, gilt es noch zu klären, unter welchen Verhältnissen der wahlfreie Zugriff auch im Durchlaufzeit-Quantil kürzere Zugriffszeiten erlaubt als der zyklische Zugriff mit fester Zuordnung zwischen Stationen und Mini-Zeitschlitzen. Dazu werden die Szenarien ND100 und TS10 herangezogen, bei denen bisher die deutlichsten Unterschiede zwischen zyklischer Bedarfs- oder Aktivitätsabfrage und wahlfreien Bedarfs- oder Aktivitätsmeldungen zu sehen waren.

In der folgenden Untersuchung wird der Einfluß einer verringerten Rundlaufzeit auf die Durchlaufzeit betrachtet. Bei zyklischer Bedarfs- oder Aktivitätsabfrage wird jeweils die Periode $t_P = 8t_Z$ der Zeitschlitze für BA- oder AA-Blöcke festgehalten und die Größe 2τ verringert. Bei der wahlfreien Aktivitätsmeldung müssen dagegen die Randbedingungen aus Abb. 5.25 beachtet werden. Daher werden die in Tab. 5.6 angegebenen Verhältnisse zwischen 2τ, r_B und t_P gewählt.

$2\tau/t_Z$	42	35	28	21	14	7
r_B	6	5	4	3	2	1
t_P/t_Z	48	40	32	24	16	8

Tabelle 5.6: *Optimale Kombinationen für Rundlaufzeit, Anzahl und Periode der Zeitschlitze für wahlfreie Aktivitätsmeldung.*

Abb. 5.68 zeigt das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario ND100. Die Durchlaufzeit bei BA oder AA zeigt den in Tab. 5.5 angegebenen Anteil $3\tau + t_{PE}$. Da die effektive Abfrageperiode t_{PE} bei BA und AA jeweils konstant gehalten ist, geht die Rundlaufzeit demnach mit dem Faktor $1,5$ in die Durchlaufzeit ein, was durch Abb. 5.68 bestätigt wird. Bei wahlfreier Aktivitätsmeldung ist dieser Faktor im Szenario ND100 dagegen etwa 11, wobei auch die Periode der Minizeitschlitz-Blöcke t_P nach Tab. 5.6 von τ abhängt. Daher ergibt sich eine Überschneidung der Kurven, und bei $2\tau < 10t_Z$ ist das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit unter ansonsten vergleichbaren Voraussetzungen mit wahlfreier Aktivitätsmeldung geringer als mit zyklischer Bedarfsabfrage.

Im Szenario TS10, dargestellt in Abb. 5.69, zeigt sich ein größerer Bereich, in dem die wahlfreie Aktivitätsmeldung ein geringeres Durchlaufzeitquantil bewirkt als die zyklische Bedarfsabfrage. In diesem Szenario sind wesentlich weniger Zugangsstationen aktiv als bei

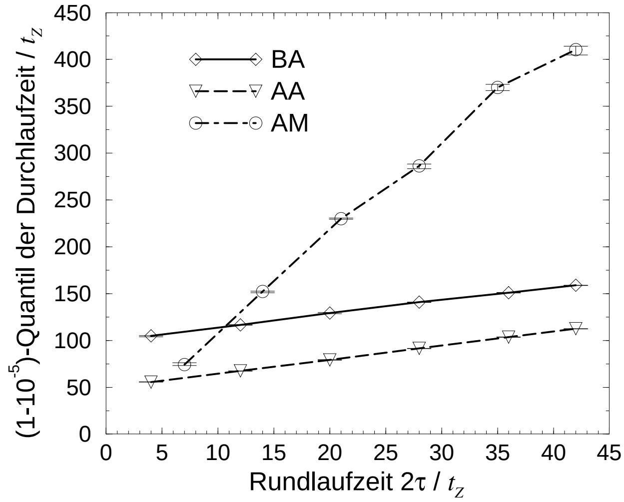


Abb. 5.68: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario ND100 als Funktion der Rundlaufzeit $2\tau/t_Z$ bei $\rho_P = 1/8$ mit zyklischer Bedarfsabfrage (BA), zyklischer Aktivitätsabfrage (AA) und wahlfreier Aktivitätsmeldung (AM).*

ND100, die außerdem nur bei ihrem jeweiligen Aktivitätsbeginn auf die Aktivitätsmeldungen zurückgreifen. Daher ist zu erwarten, daß wahlfreie Aktivitätsmeldungen hier in einem größeren Rundlaufzeitbereich zu kürzeren Durchlaufzeiten führen. Allerdings tritt bei sehr kurzen Rundlaufzeiten ein zusätzlicher Effekt auf, der besonders bei BA ein Ansteigen der Durchlaufzeit bewirkt: Wenn die Rundlaufzeit sehr gering wird, können die an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben nicht mehr jede neue Ankunft melden, so daß die zyklischen Bedarfsangaben in Mini-Zeitschlitzen nicht nur in der Büschel-, sondern auch in der Zellenebene eingesetzt werden müssen.

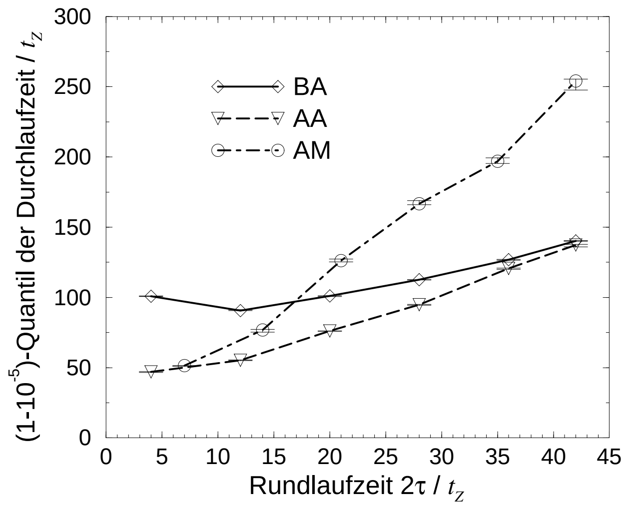


Abb. 5.69: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit für das Szenario TS10 als Funktion der Rundlaufzeit $2\tau/t_Z$ bei $\rho_P = 1/8$ mit zyklischer Bedarfsabfrage (BA), zyklischer Aktivitätsabfrage (AA) und wahlfreier Aktivitätsmeldung (AM).*

Abb. 5.70 zeigt nochmals den geringen Unterschied zwischen der analytischen Näherung nach (5.39) und den Simulationsergebnissen für das (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit bei wahlfreier Aktivitätsmeldung (AM). Da die Wartezeit der Sendeberechtigungen in der Kopfstation in (5.39) nicht berücksichtigt ist, liegt die Näherung meist unter den in der Simulation gemessenen Werten und auch außerhalb der 95%-Konfidenzintervalle. Der Sprung des Durchlaufzeitquantils im Szenario TS10 bei $2\tau \approx 10 t_Z$ wird durch den Wechsel der Sendewahrscheinlichkeit p_S in (5.32) bei $2\tau \approx t_Q$ verursacht.

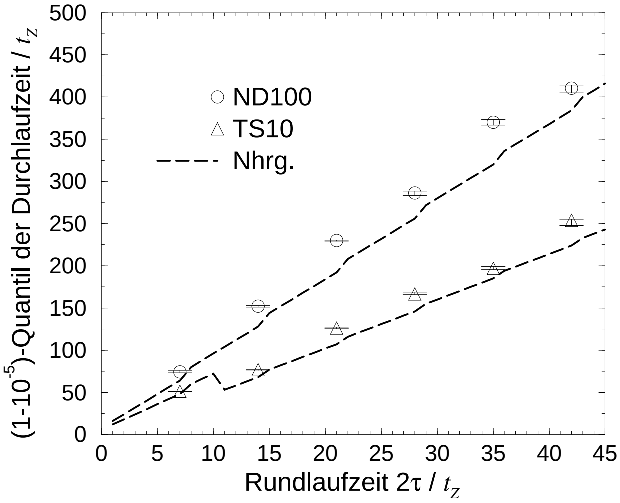


Abb. 5.70: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit als Funktion der Rundlaufzeit 2τ bei wahlfreier Aktivitätsmeldung ($\rho_P = 12\%$, $q_W = 10$): Simulationsergebnisse (Marken) und analytische Näherung (Linien, nach (5.39)).*

Zusammengefaßt können mit wahlfreien Bedarfsmeldungen unter vergleichbaren Randbedingungen bei sehr kurzen Rundlaufzeiten kürzere Durchlaufzeiten erreicht werden als bei zyklischer Bedarfsangabe. Bei der Verwendung dieser Ergebnisse ist allerdings zu beachten, daß sich bei zyklischer Bedarfs- oder Aktivitätsangabe die Durchlaufzeitquantile zu verschiedenen Quantil-Wahrscheinlichkeiten nicht wesentlich unterscheiden, während sich bei wahlfreier Bedarfs- oder Aktivitätsmeldung bereits mit nur zwei aktiven Zugangsstationen bei $q_W = 10$ jede Größenordnung des Quantiles in etwa einer zusätzlichen Rundlaufzeit äußert.

5.7.4 Anteil der aktiven Stationen

In den Szenarien aus Tab. 5.1 wurde die Gesamtzahl von Zugangsstationen im Zugangsnetz zu $n_0 = 128$ angesetzt. Diese Größe hat nur bei den zyklischen Abfrageverfahren (AA und BA) über die effektive Abfrageperiode t_{PE} einen Einfluß auf die Durchlaufzeit, nicht aber bei den wahlfreien Zugriffsverfahren (AM und BM), bei denen nur die Anzahl n der *aktiven*

Zugangsstationen wesentlich ist. Neben der in Abschnitt 5.7.3 gezeigten unterschliedlichen Abhängigkeit der Durchlaufzeit von der Rundlaufzeit stellt damit der Anteil aktiver Stationen den zweiten wesentlichen Parameter beim Vergleich zwischen zyklischem und wahlfreiem Zugriff auf Mini-Zeitschlitze dar.

Dieser Vergleich soll hier auf der Basis der Szenarien ND100 und TS10 zwischen zyklischer Aktivitätsabfrage (AA) und wahlfreier Aktivitätsmeldung (AM) durchgeführt werden. Wenn man nur den Anteil T_{RW} der Durchlaufzeit nach (5.4) betrachtet, dann hängt dieser bei zyklischer Aktivitätsabfrage nur von n_0 und bei wahlfreier Aktivitätsmeldung nur von τ ab. Die Abhängigkeit der Wartezeit T_{PW} der Sendeberechtigungen in der Kopfstation von n/n_0 und τ ist bei beiden Verfahren etwa gleich, ebenso wie der konstante Anteil 3τ in T_D, der durch die Laufzeiten der Aktivitäts- oder Bedarfsangabe, der Sendeberechtigung und der ATM-Zelle entsteht (vgl. Abb. 5.11).

Für $t_Q > 2\tau$ ist das Maximum von T_{RW} bei zyklischer Aktivitätsabfrage nach Tab. 5.5 durch t_{PE} gegeben. Diese Größe wird nach (5.7) aus n_0 und ρ_P berechnet. Bei wahlfreier Aktivitätsmeldung ist das (1-10^{-5})-Quantil von T_{RW} nach (5.39) durch

$$T_{RW}^{Q5} = (\nu_5 + 1)t_P \tag{5.40}$$

gegeben. Bei gegebenem ρ_P liegt für wahlfreie Aktivitätsmeldung die optimale Wahl von t_P durch die folgenden Beziehungen nach (5.9) und (5.10) fest:

$$\begin{aligned} r_B t_Z &= \rho_P t_P && (5.41) \\ t_P &\geq 2\tau + r_B t_Z && \\ \Rightarrow t_P &= \left\lceil \frac{2\tau}{(1-\rho_P)t_Z} \right\rceil \cdot t_Z && (5.42) \end{aligned}$$

Mit (5.42) läßt sich somit t_P als Funktion von τ darstellen, und über (5.41) ergibt sich daraus m_B nach (5.34), so daß mit (5.40), (5.32), (5.33) und (5.38) das (1-10^{-5})-Quantil von T_{RW} als Funktion von τ darstellbar ist.

Andererseits ergibt sich aus der Bedingung

$$\begin{aligned} \left\lceil \frac{n_0}{m} \right\rceil \frac{t_Z}{\rho_P} &\leq T_{RW}^{Q5} && \\ \Rightarrow n_0^{Q5} &= \left\lfloor \frac{\rho_P}{t_Z} T_{RW}^{Q5} \right\rfloor \cdot m && (5.43) \end{aligned}$$

die maximale Anzahl n_0^{Q5}, bis zu der bei zylischer Aktivitätsabfrage die effektive Abfrageperiode t_{PE} kleiner ist als ein vorgegebener Wert T_{RW}^{Q5}. Im Fall $2\tau > t_Q$ sind nach Tab. 5.5 die

Durchlaufzeiten sowohl bei zyklischer Aktivitätsangabe als auch bei wahlfreier Bedarfsmeldung um $2\tau - t_Q$ länger, so daß sich an (5.43) nichts ändert, wenn T_{RW}^{Q5} aus (5.40) eingesetzt wird.

Für $2\tau < t_Q$ und das Szenario ND100 ist in Abb. 5.71 links aus (5.40) und (5.43) die Grenzkurve n/n_0 als Funktion von 2τ dargestellt, oberhalb derer das (1-10^{-5})-Quantil der Zugriffszeit T_{RW} bei zyklischer Aktivitätsabfrage kleiner ist als bei wahlfreier Aktivitätsmeldung. Für $2\tau > t_Q = 100t_Z$ werden in beiden Mechanismen im wesentlichen nur noch die an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben eingesetzt, so daß bei periodischem Verkehr kein wesentlicher Unterschied in der Durchlaufzeit festzustellen ist (vgl. Tab. 5.5).

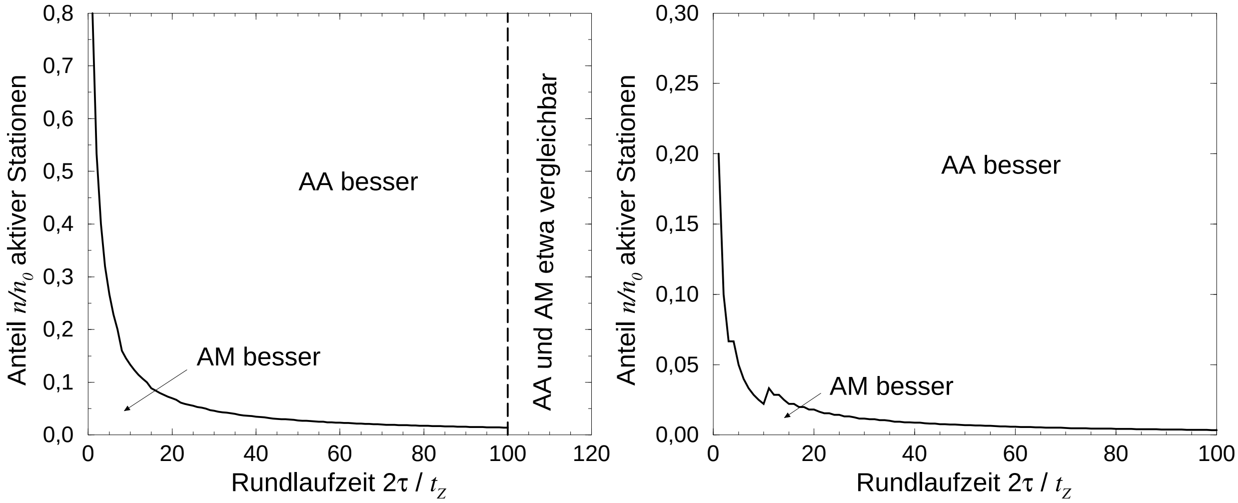


Abb. 5.71: *Vergleich von zyklischer Aktivitätsabfrage und wahlfreier Aktivitätsmeldung anhand des (1-10^{-5})-Quantils der Zugriffszeit T_{RW}. Links: Szenario ND100, rechts: Szenario TS10.*

Bei TS-Verkehr ist das Quantil der Durchlaufzeit auch für $2\tau > t_Q$ durch die effektive Abfrageperiode t_{PE} (AA) beziehungsweise t_P (AM) bestimmt. Daher tritt der Bereich „AA und AM etwa vergleichbar“ in Abb. 5.71 rechts für das Szenario TS10 nicht mehr auf, obwohl die Rundlaufzeit 2τ meist größer als $t_Q = 10t_Z$ ist.

Die Grenzkurven in Abb. 5.71 zeigen, daß sowohl bei periodischem, als auch bei hochratigem sporadischem Verkehr eine wahlfreie Aktivitätsmeldung nur dann günstiger als eine zyklische Aktivitätsabfrage ist, wenn entweder die Rundlaufzeit (einschließlich aller Kanal-Codier- und Decodierzeiten) sehr gering ist, oder wenn nur ein sehr geringer Anteil aller Zugangsstationen aktive Verbindungen haben darf. Bei diesem Vergleich wurden für beide Mechanismen dieselben Randbedingungen $m = 50$ und $\rho_P = 10\%$ eingesetzt. Für die wahlfreie Aktivitätsmeldung wurde $q_W = 10$ angenommen.

Wenn anstelle des (1-10^{-5})-Quantils beispielsweise das (1-10^{-8})-Quantil der Zugriffszeit T_{RW} verglichen wird, verkleinert sich der Bereich, in dem durch wahlfreie Aktivitätsmeldung kürzere Zugriffszeiten erreichbar sind, noch weiter. Daher ist für die betrachteten Randbedingungen wegen der relativ langen Rundlaufzeit und des potentiell großen Anteils aktiver Zugangsstationen der Einsatz der zyklischen Aktivitätsabfrage gegenüber der wahlfreien Aktivitätsmeldung eindeutig vorzuziehen.

In Umgebungen mit wechselnder physikalischer Konfiguration können die beiden Verfahren kombiniert werden, so daß eine Zugangsstation, die eine erste Verbindung aufbaut, zunächst über wahlfreie Aktivitätsmeldung in relativ selten dafür vorgesehenen Mini-Zeitschlitzen die Verbindung anmeldet. Anschließend erhält jede so angemeldete Zugangsstation in eigenen Mini-Zeitschlitzen zyklisch die Gelegenheit zur Aktivitätsangabe. Nach dem Abbau der letzten ATM-Verbindung muß die Zugangsstation den reservierten Mini-Zeitschlitz wieder freigeben. Dadurch entfällt die Beschränkung der zyklischen Aktivitätsabfrage, bei der bei einem kleinen Anteil aktiver Zugangsstationen an allen abgefragten Stationen unnötig lange Zugriffszeiten auftreten. Andererseits kann der Nachteil der wahlfreien Bedarfsmeldung auf der Büschelebene vermieden werden, wenn an vielen Zugangsstationen mit angemeldeten Verbindungen die Verkehrsquellen nach einer Pausenphase beginnen, ATM-Zellen zu senden.

Kapitel 6

Unterstützung mehrerer ATM-Dienstklassen

Nachdem in den Abschnitten 5.1 bis 5.7 die einzelnen Mechanismen der TDMA-Medienzugriffsprotokolle für passive Baumnetze bewertet wurden, soll hier untersucht werden, wie in diesen Netzen mehrere ATM-Dienstklassen unterstützt werden können. Dazu wird zunächst in Abschnitt 6.1 ein Satz von heterogenen Verkehrsszenarien mit mehreren Verkehrsarten definiert. Diese Szenarien dienen anschließend zur Bewertung der Leistungsfähigkeit verschiedener Prioritätsmechanismen. In Abschnitt 6.2 wird zunächst die Auswirkung von lokalen Prioritäten in der Zugangsstation ohne Änderung der Medienzugriffs-Schnittstelle betrachtet. Die damit erreichbare Wirkung wird mit der der Integration von Prioritäten in den Medienzugriff und die Sendeberechtigungsvergabe in der Kopfstation verglichen. Schließlich werden in Abschnitt 6.3 zwei Vorschläge zur Integration der ATM-Dienstklassen beschrieben und verglichen.

6.1 Heterogene Verkehrsszenarien

Zur Untersuchung von Systemen mit Prioritäten zur Unterstützung mehrerer Verkehrsklassen reichen die in Abschnitt 5.2.2 eingeführten homogenen Verkehrsszenarien nicht aus. Daher werden hier auf der Basis der dort definierten Quellen zunächst zwei inhomogene Szenarien definiert, in denen der Verkehr aus Referenzquellen mit konstanter Zellrate eine möglichst geringe Zellverzögerungsschwankung erfahren soll, während das System mit Hintergrundverkehr von variabler Zellrate so hoch ausgelastet wird, wie es eine Verbindungsannahmefunktion in einem Vermittlungsknoten zulassen würde, um eine vorgegebene Verlustwahrscheinlichkeit von 10^{-9} nicht zu überschreiten.

6.1.1 Szenarien mit zwei Verkehrsklassen

Die Szenarien P100 und P10 basieren auf den in Abschnitt 5.2.2 eingeführten Quellen der Szenarien ND100, ND10 und TS10. Die Referenzquellen sind Quellen konstanter Zellrate vom Typ D100 ($t_Q = 100 t_Z$) im Szenario P100 und D10 ($t_Q = 10 t_Z$) im Szenario P10. Der Hintergrundverkehr wird von den aus dem Szenario TS10 bekannten Quellen erzeugt.

Zur Dimensionierung werden wie in Abschnitt 5.2.2 zwei Randbedingungen eingesetzt:

- Das *mittlere Angebot* A_R soll 80% nicht überschreiten. Die Reduktion der effektiven Übertragungskapazität durch ρ_P wird hier nicht berücksichtigt, da in Kapitel 5 gezeigt wurde, daß sich die Durchlaufzeit der Zellen bei $A_R = 80\%$ durch entsprechendes Einstellen von ρ_P verringern läßt.

- Die Summe der Spitzenzellraten soll 90% nicht überschreiten. Diese Grenze ergibt sich aus der Betrachtung zur Bündelung von TS10-Quellen in Abschnitt 5.2.2 zusammen mit der Randbedingung, daß hier ein Anteil $\rho_P \approx 1/10$ der Übertragungskapazität für Aktivitätsangaben-Blöcke reserviert werden soll[1].

Die beiden Randbedingungen führen auf die in Tab. 6.1 und 6.2 zusammengestellten möglichen Kombinationen der Anzahlen n_X von Quellen des Typs $X \in \{D100, D10, TS10\}$. In den Tabellen sind die jeweils erreichten Grenzen der Randbedingungen fett gedruckt. Die unterstrichenen Einträge bezeichnen die gewählten Parameter für die Szenarien P100 (Tab. 6.1) und P10 (Tab. 6.2). Die Parameter wurden so gewählt, sowohl der Hintergrund- als auch der Referenzverkehr jeweils mindestens ein mittleres Verkehrsangebot von 20% generieren.

n_{TS10}	0	1	2	3	<u>4</u>	5	6	7	8	9
n_{D100}	80	75	70	60	<u>50</u>	40	30	20	10	0
$A_R/\%$	**80**	**80**	**80**	75	<u>70</u>	65	60	55	50	45
$A_{max}/\%$	80	85	**90**	**90**	<u>**90**</u>	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**

Tabelle 6.1: *Zugelassene Kombinationen für die Anzahl von D100- und TS10-Quellen.*

Die Zuordnung der Quellen zu den $n_0 = 128$ Zugangsstationen ist in Tab. 6.3 festgelegt. Die Bezeichnungen a) – c) werden in Abb. 6.2 zur Kennzeichnung der Simulationsergebnisse verwendet.

[1]Der Wert von ρ_P wurde bei der Festlegung des Szenarios TS10 in Abschnitt 5.2.2 nicht berücksichtigt, da die in den Untersuchungen in Kapitel 5 eingesetzten Szenarien unabhängig von ρ_P sein sollten.

n_{TS10}	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
n_{D10}	8	7	7	6	5	4	3	2	1	0
$A_R/\%$	**80**	75	**80**	75	70	65	60	55	50	45
$A_{max}/\%$	80	85	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**	**90**

Tabelle 6.2: *Zugelassene Kombinationen für die Anzahl von D10- und TS10-Quellen.*

Szenario	P100			P10		
Quellen an d. ZSt	D100+TS10	D100	keine	D10+TS10	D10	keine
Anzahl d. ZSt	4	46	78	4	1	123
Bezeichnung d. Kurve	ohne Prio.: a) mit Prio.: c)	b) b)	— —	ohne Prio.: a) mit Prio.: c)	b) b)	— —

Tabelle 6.3: *Zuordnung der Quellen zu Zugangsstationen (ZSt) in den Szenarien P100 und P10.*

6.1.2 Szenarien mit drei Verkehrsklassen

Zur Bewertung von Systemen, die mehr als zwei Dienstklassen bereitstellen, werden zwei Szenarien definiert. Das Szenario S1 ergänzt das in Tab. 6.3 definierte P100 durch zusätzlichen Verkehr mit 30 Quellen des Typs TS100. Die Zuordnung der Quellen zu Zugangsstationen ist in Tab. 6.4 angegeben. Durch die zusätzlichen TS100-Quellen wird ein mittleres Angebot von insgesamt $A_R = 85\%$ eingestellt. Die Summe der Spitzenzellraten entspricht 124% der Übertragungskapazität des Rückkanales.

Quellen an d. ZSt	D100+TS10+TS100	D100	TS100
Anzahl d. ZSt	4	46	30
Beitrag zu $A_R/\%$	4+20+2	46	15
Beitrag zu $A_{max}/\%$	4+40+4	46	30

Tabelle 6.4: *Zuordnung der Quellen zu Zugangsstationen (ZSt) im Szenario S1.*

Die gleichzeitige Verwendung eines ATM-Zugangsnetzes für hochratige Dienste mit Dienstgütegarantien und die Verwendung der Restbandbreite für Dienste ohne Dienstgütegarantien (beispielsweise für einen kostengünstigen Internet-Zugang) soll durch das Szenario S2 dargestellt werden. Die Zusammenstellung der Quellen D10 (Echtzeitanforderungen), TS10 (Verlustpriorität) und TS100 (ohne Garantien) des Szenarios S2 an den Zugangsstationen zeigt Tab. 6.5. Das mittlere Gesamtangebot ist hier $A_R = 83\%$, die Summe der Spitzenzellraten entspricht 140% der Übertragungskapazität des Rückkanales.

Quellen an d. ZSt	D10+TS100	TS10+TS100	TS100
Anzahl d. ZSt	2	4	74
Beitrag zu $A_R/\%$	20+2	20+4	37
Beitrag zu $A_{max}/\%$	30	92	45

Tabelle 6.5: *Zuordnung der Quellen zu Zugangsstationen (ZSt) im Szenario S2.*

6.2 Prioritäten beim Medienzugriff

Die Auswirkung von Prioritäten beim Medienzugriff wird hier anhand zweier Abwandlungen des in Abschnitt 5.5 beschriebenen Systems mit zyklischer Aktivitätsabfrage untersucht.

6.2.1 Lokale Prioritäten in den Zugangsstationen

Die in Abschnitt 4.5 beschriebene lokale Priorisierung in den Zugangsstationen erfordert keine Änderung anderer Zugangsstationen oder der Kopfstation zur Einführung mehrerer Dienstklassen. In Abb. 6.1 ist die Architektur der zur Unterstützung zweier Prioritätsklassen modifizierten Zugangsstation skizziert. Die D-Quellen aus den Szenarien P100 und P10 werden jeweils in der Dienstklasse „A“ bedient, während die TS-Quellen in die Warteschlange der Klasse „B“ eingereiht und mit zweiter Priorität bedient werden. Die Aktivitäts- und Bedarfsangaben zeigen der Kopfstation die Summenaktivität beider Dienstklassen an.

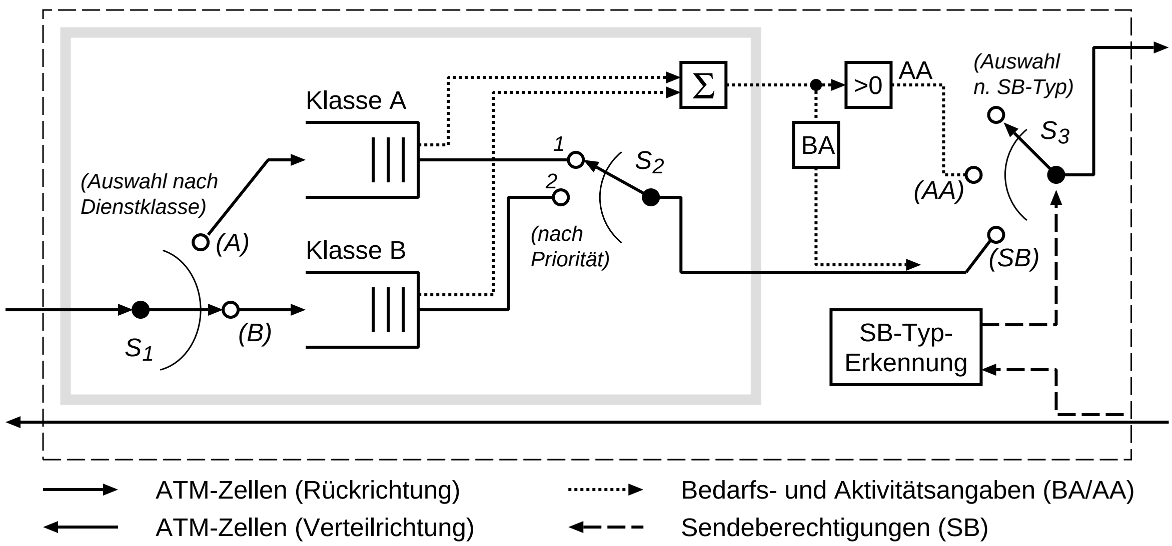


Abb. 6.1: *Simulationsmodell der Zugangsstation mit lokaler Prioritätsunterstützung. Der im Vergleich zu Abschnitt 5.5 modifizierte Bereich ist grau umrahmt.*

Die mit lokalen Prioritäten erzielbaren Ergebnisse sind in Abb. 6.2 anhand der komplementären Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV dargestellt. Der von AA-Blöcken belegte

Anteil der Übertragungskapazität des Rückkanals beträgt $\rho_P = 10\%$. Die Zweipunkt-CDV ist jeweils für drei Fälle dargestellt: Die D-Quellen, die in einem System ohne lokale Prioritäten gemeinsam mit TS-Quellen an einer Zugangsstation bedient werden (a), die D-Quellen, an deren Zugangsstationen sich keine weiteren Quellen befinden (b) – hier gibt es keinen Unterschied durch den Einsatz lokaler Prioritäten – und die D-Quellen, die in einem System mit lokalen Prioritäten gemeinsam mit TS-Quellen an einer Zugangsstation bedient werden (c).

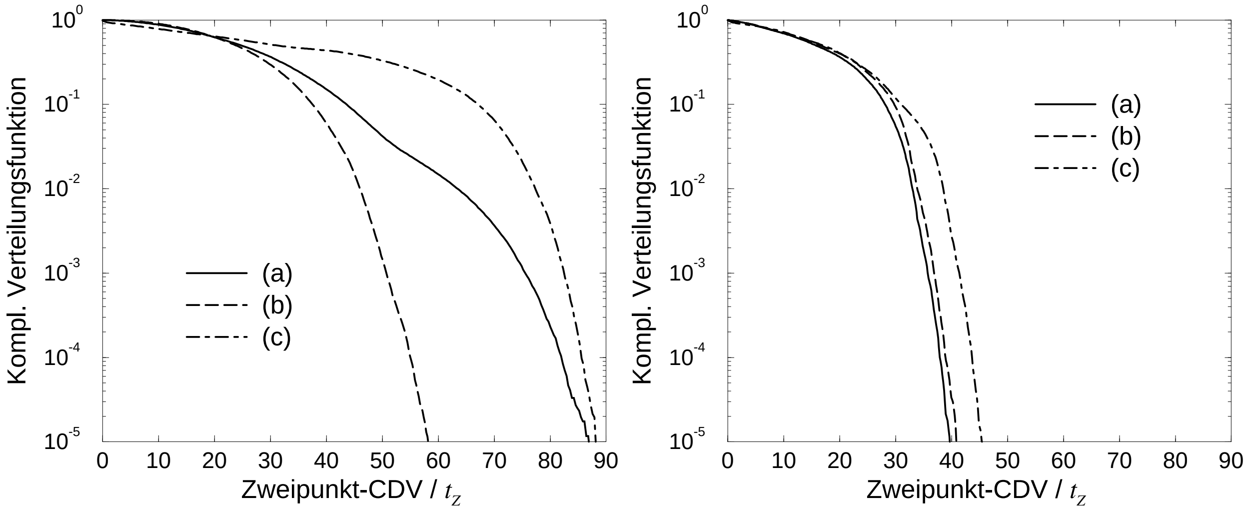


Abb. 6.2: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV in den Szenarien P100 (links) und P10 (rechts). D-Quelle gemeinsam mit TS-Quelle ohne lokale Priorität (a); D-Quelle an Zugangsstation ohne TS-Verkehr (b); D-Quelle gemeinsam mit TS-Quelle mit lokaler Priorität (c).*

Im Szenario P100 (Abb. 6.2 links) zeigt sich im Vergleich der Kurven (a) und (c), daß durch lokale Priorisierung des D100-Verkehrs dessen Durchlaufzeitschwankungen nicht verringert werden können. Dies liegt daran, daß sich bei der lokalen Priorisierung die *minimale* Durchlaufzeit für den Verkehr mit hoher Priorität verringert: Eine Sendeberechtigung, die nach der Meldung der Ankunft einer ATM-Zelle aus der TS-Quelle an der Zugangsstation eintrifft, wird direkt zur Bedienung der Warteschlange A eingesetzt, wenn in dieser eine ATM-Zelle wartet. Dadurch entfällt für manche Zellen in Klasse A der Vorgang der Aktivitäts- bzw. Bedarfsangabe, und die minimale Durchlaufzeit wird von 3τ auf τ reduziert. Dieser Reduktion wurde dadurch Rechnung getragen, daß die Zweipunkt-CDV in (c) durch Subtraktion von τ aus der Durchlaufzeit berechnet wurde, während in (a) und (b) die Differenz aus der Durchlaufzeit und 3τ eingesetzt wurde. Andererseits bleibt die *maximale* Durchlaufzeit in den Pausen der TS-Quelle weiterhin von der Bedienung einer einzelnen D100-Quelle an der Zugangsstation bestimmt. Daher ergeben sich durch die lokale Priorisierung (c) insgesamt etwas größere Zellverzögerungsschwankungen als ohne lokale Priorisierung (a).

Im Szenario P10 (Abb. 6.2 rechts) werden die Aktivitätsangaben im stationären Zustand nicht mehr benötigt. Jede der fünf aktiven Zugangsstationen empfängt mindestens von einer D10-Quelle ATM-Zellen. Zusätzliche ATM-Zellen von einer TS10-Quelle werden der Kopfstation daher ausschließlich über die an die ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben gemeldet. Ohne lokale Prioritäten tritt dabei kein wesentlicher Unterschied zwischen der Durchlaufzeit der D10-Quelle an einer gemischten (a) und einer nicht gemischten Zugangsstation (b) auf. Mit lokalen Prioritäten (c) ist die Durchlaufzeit wieder um 2τ geringer, und die Durchlaufzeitschwankung ist nur etwas größer als ohne Prioritäten. Diese durchgehende Verkürzung der Durchlaufzeiten selbst in Pausenphasen der TS-Quelle tritt nur auf, wenn die D-Quelle eine so hohe Zellrate besitzt, daß die Warteschlange der Klasse A im stationären Zustand nicht leer wird. Mit dem Beginn der ersten Aktivitätsphase der TS-Quelle verkürzt sich die Mindestdurchlaufzeit der Zellen der D-Quelle um 2τ. Von diesem Zeitpunkt an werden die Zellen der D-Quelle entsprechend früher bedient und die der TS-Quelle entsprechend später. Dies führt dazu, daß am Ende jedes Zellbüschels der TS-Quelle etwa $\left\lfloor \frac{2\tau}{t_Q} \right\rfloor$ Zellen in der Warteschlange der Klasse B verbleiben und erst mit dem Beginn der nächsten Aktivitätsphase der TS-Quelle übertragen werden.

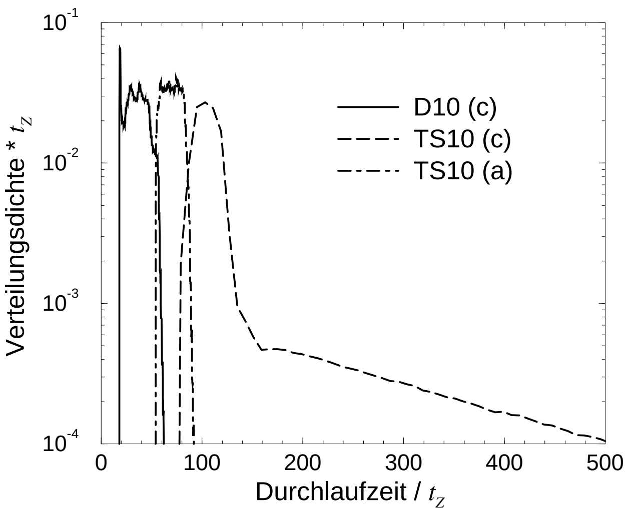


Abb. 6.3: *Verteilungsdichte der Durchlaufzeit im Szenario P10 für die D10-Quellen (——) und die TS10-Quellen (– – –) an gemischten Zugangsstationen mit lokalen Prioritäten und für die TS10-Quellen, wenn keine lokalen Prioritäten eingesetzt werden (–·–).*

Abb. 6.3 zeigt die Verteilungsdichte der Durchlaufzeit für die betrachteten Quellen. Die Verringerung der Durchlaufzeit der D-Quellen an den Zugangsstationen mit gemischtem Verkehr und lokalen Prioritäten (——) entsteht durch den Einsatz der für die Zellen der TS-Quellen empfangenen Sendeberechtigungen. Dadurch vergrößert sich die Durchlaufzeit für die Zellen der TS-Quellen (– – –). Die letzten Zellen aus der Aktivitätsphase einer TS-Quelle warten bis zum Beginn der nächsten Aktivitätsphase in der Warteschlange der Zugangsstation für Klasse B. Daher spiegelt sich die negativ-exponentiell verteilte Dauer der Pausenphase (vgl. Abschnitt 5.2.2) in dem langen geraden Abschnitt in der logarithmischen Darstellung der Verteilungsdichte der Durchlaufzeit der TS-Quellen (– – –) bei $t > 180 t_Z$ wider.

Aufgrund der minimalen Verringerung der Durchlaufzeitschwankungen für Klasse A und der teils extremen Vergrößerung der Durchlaufzeitschwankungen für Klasse B sollten lokale Prioritäten in Systemen mit Bedarfsangaben nicht eingesetzt werden.

6.2.2 Prioritäten in der Kopfstation

Der Einsatz von Prioritäten im Medienzugriff und in der Kopfstation soll wieder ausgehend von der zyklischen Aktivitätsabfrage aus Abschnitt 5.5 untersucht werden. Um eine fast vollständige Trennung der Dienstklassen zu erreichen, werden sowohl in den Zugangsstationen als auch in der Kopfstation alle Warteschlangen doppelt ausgeführt. Außerdem werden getrennte Aktivitätsabfrageblöcke für die Klassen A und B eingeführt. Die Abfrageperioden sollen durch $\rho_{P_A} = 10\%$ für Klasse A und $\rho_{P_B} = 2\%$ für Klasse B bestimmt sein. In der Kopfstation werden Sendeberechtigungen in jedem Zeitschlitz nach der folgenden Prioritätsliste vergeben:

1. Aktivitätsangabenblock für Klasse A periodisch mit $t_{P_A} = t_Z/\rho_{P_A}$.
2. Sendeberechtigung für ATM-Zelle der Klasse A, falls die SB-Warteschlange für Klasse A nicht leer ist.
3. Aktivitätsangabenblock für Klasse B, falls Periode $t_{P_B} = t_Z/\rho_{P_B}$ erreicht ist.
4. Sendeberechtigung für ATM-Zelle der Klasse B, falls SB-Warteschlange für Klasse B nicht leer ist.

In den Zugangsstationen wird jeweils eine ATM-Zelle aus der Warteschlange für die in der Sendeberechtigung eingetragene Prioritätsklasse entnommen.

Abb. 6.4 zeigt anhand der Szenarien P100 (links) und P10 (rechts), daß die durchgängige Unterstützung von Prioritäten in Zugangsstationen, Medienzugriff und Kopfstation im Gegensatz zu lokalen Prioritäten eine Reduktion der Zweipunkt-CDV bewirken kann. Im Szenario P100 (Abb. 6.4 links) kann die Zweipunkt-CDV des D100-Verkehrs auf die Größe reduziert werden, die auch im Szenario ND100 auftritt (vgl. Abb. 5.65; die Zweipunkt-CDV ist um $3\tau = 54 t_Z$ geringer als die Durchlaufzeit). Im Szenario P10 (Abb. 6.4 rechts) ist die Zweipunkt-CDV nur unwesentlich größer als im homogenen Szenario ND10 (vgl. Abb. 5.65). Das in Abschnitt 6.2.1 beschriebene Problem der sehr langen Wartezeiten in Klasse B tritt bei durchgängiger Prioritätsunterstützung nicht mehr auf, wie der Vergleich der Verteilungsdichte der Durchlaufzeit der Zellen aus TS-Quellen in Abb. 6.5 zeigt.

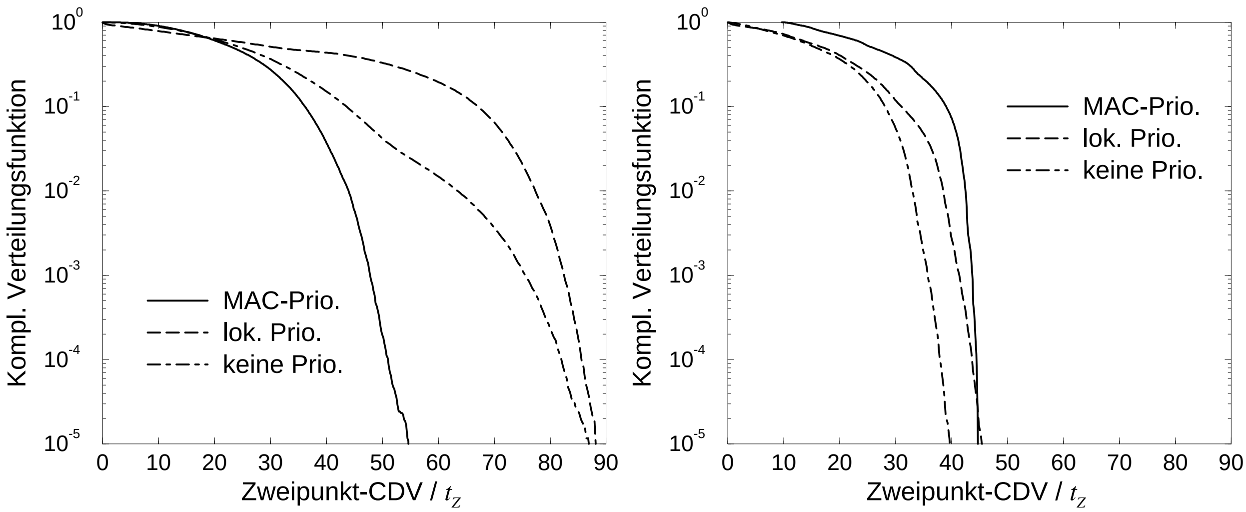


Abb. 6.4: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV in den Szenarien P100 (links) und P10 (rechts); Betrachtete D-Quelle an gemeinsamer Zugangsstation mit TS-Quelle; Vergleich zwischen Prioritäten in Medienzugriff (MAC), lokalen Prioritäten in der Zugangsstation (lok. Prio.) und zyklischer Aktivitätsabfrage ohne Prioritäten (keine Prio.).*

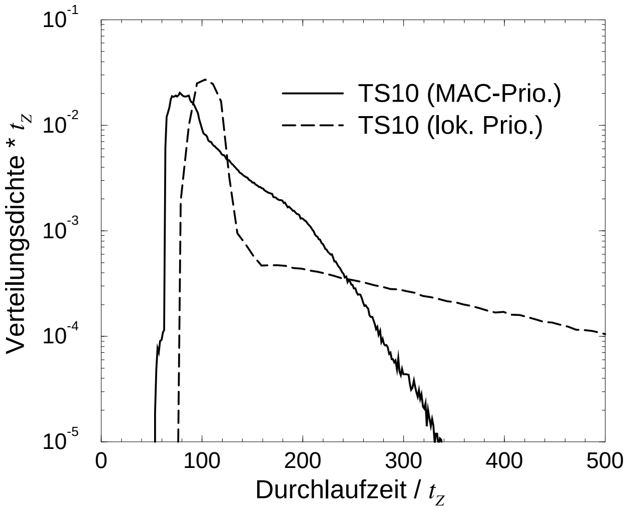


Abb. 6.5: *Verteilungsdichte der Durchlaufzeit im Szenario P10 für die TS10-Quellen mit durchgängigen Prioritäten (——) und mit lokalen Prioritäten in der Zugangsstation (– – –).*

6.3 Systemvorschläge

6.3.1 Dienstklassen

Es gibt verschiedene Ansätze, um die im ATM-Forum [18] definierten ATM-Dienstklassen – CBR, rt-VBR, nrt-VBR, ABR und UBR – in einem konzentrierenden Zugangsnetz zu unterstützen. Wenn im Zugangsnetz alle fünf Dienstklassen (einschließlich einer Unterscheidung der Zellverlustpriorität (*Cell Loss Priority, CLP*)) getrennt verwaltet werden können, dann kann die Verbindungsannahme im Zugangsnetz analog zu der des Weitverkehrsnetzes erfolgen. Andererseits erfordert eine getrennte Verwaltung einen sehr großen Aufwand im Medienzugriff, da – wie oben in Abschnitt 6.2.2 gezeigt – für jede Dienstklasse von jeder Zugangsstation eigene Bedarfsangaben gesendet werden müssen. Für diese Bedarfsangaben muß daher ein relativ großer Anteil der zur Verfügung stehenden Übertragungskapazität des Rückkanals aufgewendet werden.

Wenn man im Zugangsnetz weniger Multiplexgewinn zuläßt als im Weitverkehrsnetz, dann kann man auf eine strikte Trennung aller Dienstklassen verzichten. Reserviert man beispielsweise für jede Zugangsstation die Summe der Spitzenzellraten ihrer Verbindungen, dann muß man im Zugangsnetz selbst keine Prioritäten vorsehen, es kann dabei allerdings auch kein statistischer Multiplexgewinn erzielt werden. Als Kompromiß zwischen dieser sehr einfach zu realisierenden Lösung und der komplizierteren vollständigen Trennung aller ATM-Dienstklassen werden hier zwei Systemvorschläge ausgearbeitet und bewertet, die die fünf ATM-Dienstklassen des ATM-Forums auf drei Zugangsnetz-Dienstklassen abbilden. Diese Abbildung und die drei Zugangsnetz-Dienstklassen werden im folgenden kurz umrissen.

Klasse A: Verkehr mit Echtzeitanforderungen
Klasse A soll mit der höchsten Priorität bedient werden. Die ATM-Dienstklassen mit Echtzeitanforderungen (CBR, rt-VBR) können in Klasse A zusammengefaßt werden. Um trotz der relativ kleinen Bündelgröße eines Zugangsnetzes in dieser Klasse die Echtzeitanforderungen des Verkehrs erfüllen zu können, sollte hier kein Multiplexgewinn angestrebt werden, sondern die Verbindungsannahme mit Spitzenzellratenzuteilung erfolgen.

Klasse B: Verkehr ohne Echtzeitanforderungen, aber mit Verlustgrenze
In Klasse B werden die ATM-Dienstklassen nrt-VBR und ABR zusammengefaßt, deren Dienstgütekriterien nur eine sehr geringe Verlustrate fordern, aber keine so strengen Anforderungen an die Begrenzung der Durchlaufzeitschwankungen stellen. Um ABR vollständig zu unterstützen, muß zumindest in der Kopfstation zusätzlich eine Auswertung und Aktualisierung der ABR-RM-Zellen (*Resource Management*) erfolgen. Die Details der ABR-Unterstützung sollen jedoch nicht Thema dieser Arbeit sein. Die Verbindungsannahme für Klasse B kann die von Klasse A statistisch nicht benötigte Bandbreite mit einbeziehen, so daß ein statistischer Multiplexgewinn erzielt werden kann.

Klasse C: Verkehr ohne Echtzeit- oder Verlustanforderungen
UBR-Verkehr muß getrennt von den Klassen A und B behandelt werden, weil hier keine Zugangskontrolle vorgesehen ist, mit der die Verlustwahrscheinlichkeit begrenzt werden

könnte. Durch die separate Behandlung können die Verluste bei Überlast in Klasse C auf diese Dienstklasse beschränkt bleiben.

6.3.2 Systemvorschlag 1: Zyklische Bedienung des zeitkritischen Verkehrs

6.3.2.1 Auswahl der Mechanismen

Ziel des Systemvorschlages ist es, die Mechanismen einzusetzen, die sich bei der Untersuchung in Kapitel 5 als besonders leistungsfähig erwiesen haben. Daher wird für die dynamische Zuweisung von Übertragungskapazität an die einzelnen Zugangsstationen und Dienstklassen eine zyklische Aktivitätsabfrage vorgesehen. In Abb. 5.63 wurde dargestellt, daß die statische Zuweisung von Bandbreite bei Quellen mit großer Zellrate geringere Durchlaufzeitschwankungen erzeugt als die dynamische Zuweisung nach Aktivitätsabfrage. Daher wird hier ein System konzipiert, in dem dem Verkehr in Klasse A zyklisch Sendeberechtigungen zugewiesen werden. Die Klassen B und C werden jeweils nach zyklischer Aktivitätsabfrage bedient. Wenn an einer Zugangsstation eine Sendeberechtigung für Klasse A eintrifft und die entsprechende Warteschlange momentan leer ist, kann stattdessen – falls vorhanden – eine ATM-Zelle aus Klasse C zur Kopfstation übertragen werden. Die Sendeberechtigungen von Klasse A werden an Klasse C anstelle von Klasse B weitergegeben, weil sie durch die Verringerung der Mindest-Durchlaufzeit von 3τ auf τ die Durchlaufzeitschwankungen vergrößern. Dies ist bei Dienstklasse C weniger kritisch als bei Dienstklasse B. Der hier beschriebene Einsatz lokaler Prioritäten ist, im Gegensatz zu den Ausführungen in Abschnitt 6.2, sinnvoll, da die Klasse mit der höheren Priorität nicht über gemeinsame Bedarfs- oder Aktivitätsangaben bedient wird, sondern durch die grundsätzlich in der Bedienrate überdimensionierten zyklischen Sendeberechtigungen.

An jede in der Rückrichtung übertragene ATM-Zelle wird analog zu Abb. 2.28 ein Feld mit Angaben über die Warteschlangenlängen für die Klassen B und C in der entsprechenden Zugangsstation gekoppelt. Die Länge der Warteschlange für Klasse A wird nicht übertragen, da die Erzeugung von Sendeberechtigungen hier zyklisch erfolgt. Wegen der lokalen Priorisierung zwischen den Klassen A und C in der Zugangsstation bei Empfang einer Sendeberechtigung für Klasse A muß an ATM-Zellen in der Rückrichtung zusätzlich eine Angabe über die Verkehrsklasse der übertragenen ATM-Zelle gekoppelt sein, so daß mit dem Algorithmus aus Abschnitt B.1 die Anzahl neuer Ankünfte in Klasse C richtig berechnet werden kann.

Die an die ATM-Zellen der Verteilrichtung gekoppelten Sendeberechtigungen enthalten hier außer der Nummer der betroffenen Zugangsstation und der Kennung, ob die Sendeberechtigung für eine ATM-Zelle oder einen Aktivitätsangaben-Block gilt, noch eine Angabe zur Dienstklasse, für die die Sendeberechtigung gilt.

Die hier beschriebenen Felder sind in Abb. 6.6 zusammengestellt. Weitere Details des Medienzugriffsverfahrens werden in den folgenden beiden Abschnitten zur Architektur von Zugangs- und Kopfstation erläutert. Die Abkürzungen entsprechen der Verwendung in Abb. 2.28. Die Struktur der Mini-Zeitschlitze für Aktivitätsabfrage ist in Abb. 4.5 b dargestellt.

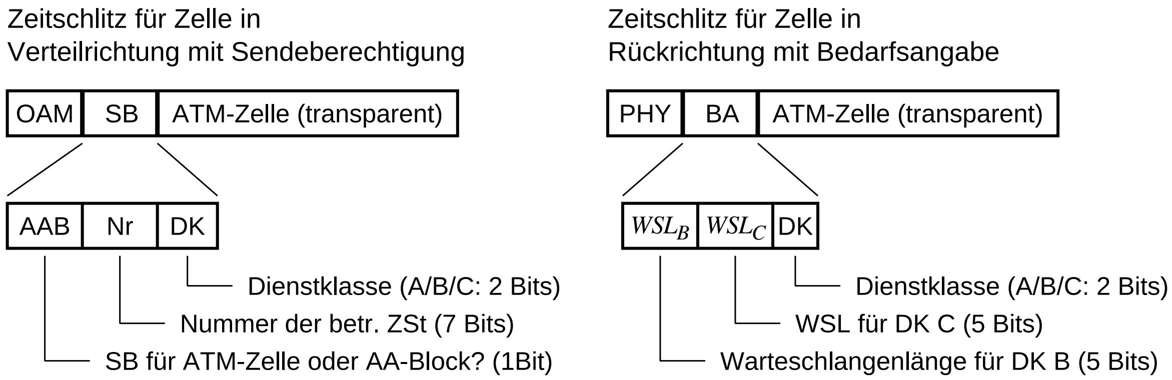


Abb. 6.6: *Zeitschlitze in Verteil- und Rückrichtung für Systemvorschlag 1. Abkürzungen vgl. Abb. 2.28 auf S. 43.*

6.3.2.2 Architektur der Zugangsstation

Die Architektur der Zugangsstation ist in Abb. 6.7 dargestellt. ATM-Zellen, die die Zugangsstation von einer Quelle erhält, werden zunächst entsprechend der Dienstklasse der Verbindung, zu der sie gehören, in eine der Warteschlangen A, B oder C eingereiht (S_1). Beim Eintreffen einer Sendeberechtigung wird zunächst festgestellt, ob es sich um eine Sendeberechtigung für eine ATM-Zelle oder für einen Aktivitätsangaben-Block handelt (SB-Typ) und für welche Zugangsstation und Dienstklasse die Sendeberechtigung gilt (SB-Adr.). Entsprechend wird mit S_4 ausgewählt, ob die betrachtete Zugangsstation als Reaktion auf die Sendeberechtigung eine ATM-Zelle, eine Aktivitätsangabe in einem entsprechenden Mini-Zeitschlitz oder gar nichts sendet. Falls eine ATM-Zelle gesendet werden darf, wird mit S_3 ausgewählt, aus welcher Warteschlange die ATM-Zelle entnommen werden soll. Bei Sendeberechtigungen für Dienstklasse A wird mit einer zusätzlichen lokalen Prioritätsauswahl (S_2) das Senden einer ATM-Zelle aus der Warteschlange C genehmigt, falls Warteschlange A leer ist. Da in der Kopfstation die Anzahl neuer Ankünfte mit dem in Abschnitt B.1 beschriebenen Algorithmus erfolgt, entspricht das Senden einer Zelle aus Klasse C als Reaktion auf eine Sendeberechtigung für Klasse A dem unter 2 auf Seite 214 beschriebenen

Fall, auf den der Algorithmus robust reagiert. Daher führt diese Verwendung zusätzlicher Sendeberechtigungen zu einer entsprechenden Ersparnis von Sendeberechtigungen, die in der Kopfstation gezielt für Klasse C erzeugt werden.

An die ATM-Zellen der Rückrichtung wird nach Abb. 6.6 jeweils ein Bedarfsangabenfeld (BA) angehängt, in dem die Längen der Warteschlangen der Klassen B und C und die Kennung der Dienstklasse, zu der die tatsächlich übertragene ATM-Zelle gehört, übertragen werden.

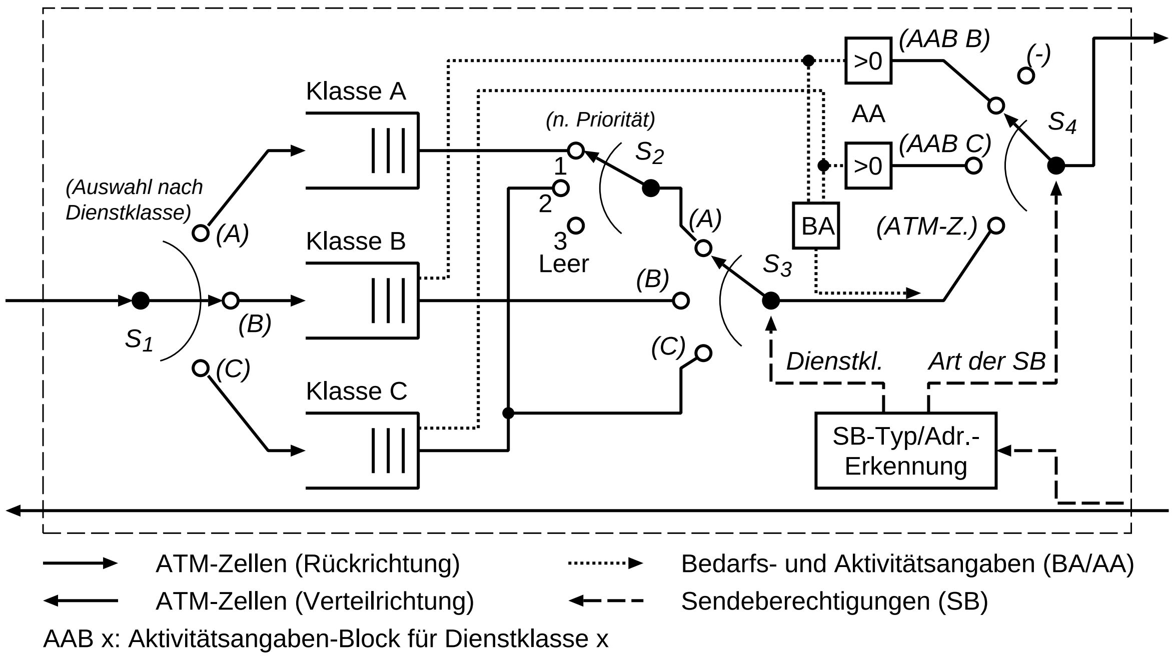


Abb. 6.7: *Architektur der Zugangsstation für Systemvorschlag 1.*

6.3.2.3 Architektur der Kopfstation

Die Architektur der Kopfstation ist in Abb. 6.8 skizziert. Zur Erzeugung der Sendeberechtigungen für Klasse A werden n_0 Taktgeneratoren eingesetzt, während die Sendeberechtigungen für die Klassen B und C durch Auswertung der Aktivitätsangabenblöcke und der an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben mit dem in Abschnitt B.1 beschriebenen Algorithmus erzeugt werden. Eine erzeugte Sendeberechtigung wird, mit der Adresse ihrer Zielstation versehen, in die entsprechende Warteschlange eingereiht.

Für die Sendeberechtigungen für Klasse C sind aus Fairneß-Gründen zwei Warteschlangen vorgesehen: eine für die aus zyklischen Aktivitätsangaben erzeugten und eine für die Sendeberechtigungen, die aus an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben erzeugt werden. Eine positive Aktivitätsangabe führt nur dann zur Erzeugung einer Sendeberechtigung, wenn der Zähler M_i für diese Zugangsstation und Dienstklasse C den Wert Null hatte. Daher führt die Priorisierung der aus Aktivitätsangaben erzeugten Sendeberechtigungen zu einer Bevorzugung von Zugangsstationen, die nur selten Verkehr zu senden haben, und sie hilft, die automatische Folgereservierung (*capture effect*) von Zugangsstationen, die durchgehend mit hohen Zellraten in Klasse C aktiv sind, zu verringern, so daß die Fairneß verbessert wird.

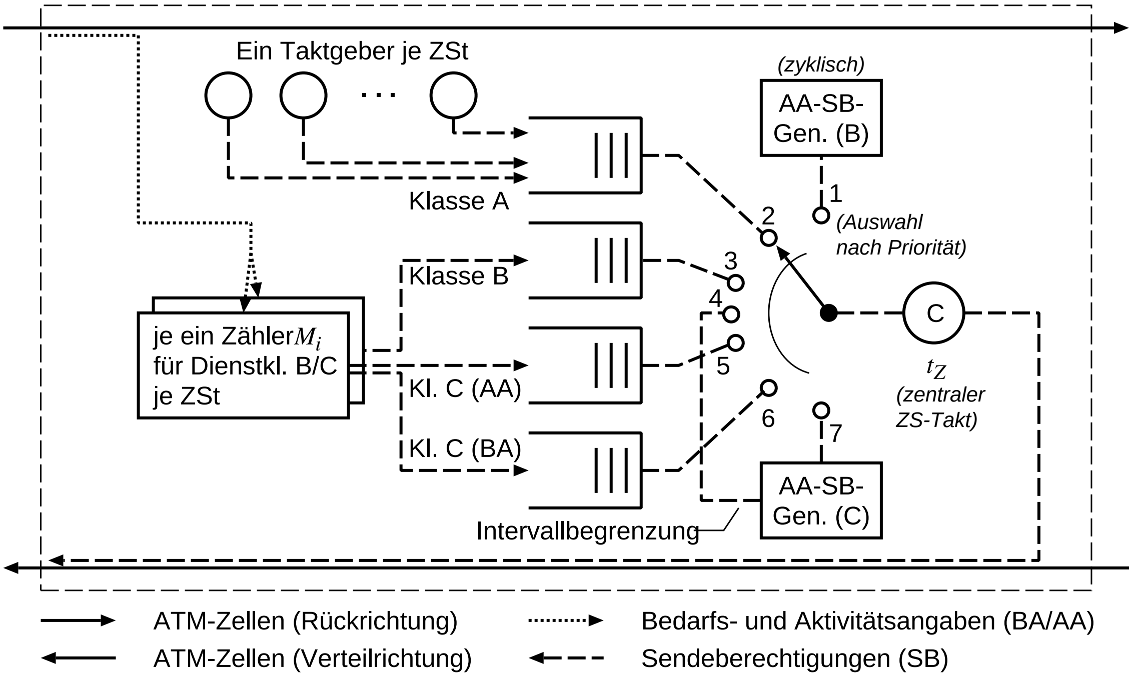


Abb. 6.8: *Architektur der Kopfstation für Systemvorschlag 1.*

In jedem Zeitschlitz wird eine Sendeberechtigung vergeben. Dazu werden die Warteschlangen für Sendeberechtigungen nach der in Abb. 6.8 dargestellten Prioritätsauswahl bedient. Die höchste Priorität ist den zyklischen Sendeberechtigungen für Aktivitätsangaben-Blöcke für Dienstklasse B zugewiesen, die in jedem $1/\rho_{P_B}$-ten Zeitschlitz gesendet werden. Spätestens in jedem $1/\rho_{P_C}$-ten Zeitschlitz soll eine Sendeberechtigung für Aktivitätsangaben-Blöcke für Dienstklasse C gesendet werden, wenn keine Sendeberechtigungen für ATM-Zellen der Klassen A oder B zu vergeben sind. Wenn weder Sendeberechtigungen für die zyklischen Aktivitätsangabenblöcke der Klassen B oder C zu vergeben sind, noch Sendeberechtigungen in den Warteschlangen der Klassen A, B oder C der Kopfstation warten, dann werden für die sonst unbelegten Zeitschlitze zusätzliche Sendeberechtigungen für Aktivitätsangaben-Blöcke der Klasse C vergeben. Dies entspricht für Klasse C der in Abschnitt 5.3.3 für Bedarfsangabenblöcke betrachteten Abfrage mit begrenzter Periode. Da diese hier nur für die Dienstklasse mit der geringsten Priorität eingesetzt wird, entfällt der in Abschnitt 5.3.4 diskutierte Nachteil, daß für weitere Prioritätsklassen keine Übertragungskapazität mehr zur Verfügung steht.

6.3.3 Systemvorschlag 2: Drei Prioritätsklassen

6.3.3.1 Auswahl der Mechanismen

Anstelle der zyklischen, bedarfsunabhängigen Zuweisung von Sendeberechtigungen in Klasse A (Systemvorschlag 1) sollen hier alle drei Dienstklassen nach einem durchgängigen Prioritätskonzept abgefragt und bedient werden. Daher wird in allen Klassen das Verfahren der zyklischen Aktivitätsabfrage eingesetzt (in Klasse C als Aktivitätsabfrage mit begrenztem Zyklus wie in Abschnitt 6.3.2 beschrieben).

Der Vorteil der binären Aktivitätsabfrage gegenüber der Bedarfsabfrage kann ausgenützt werden, wenn nur der Klasse mit den höchsten Echtzeitanforderungen eine kurze Abfrageperiode $t_{P_A} = t_Z/\rho_{P_A}$ zugewiesen wird, so daß in dieser Klasse eine wesentlich kürzere effektive Abfrageperiode erreicht werden kann als mit einer integrierten Bedarfsabfrage für alle Dienstklassen wie in [36], bei der die Anzahl m der Mini-Zeitschlitze je Zeitschlitz sehr klein würde.

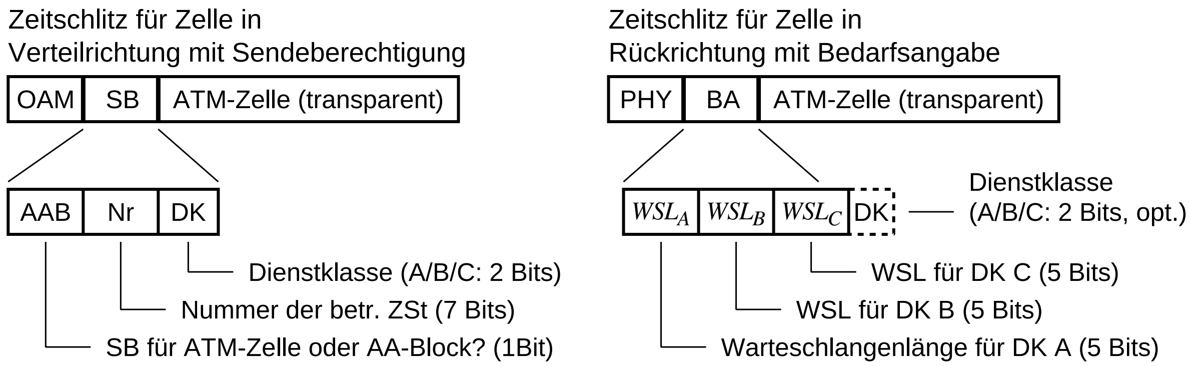


Abb. 6.9: *Zeitschlitze in Verteil- und Rückrichtung für Systemvorschlag 2.*

In Abb. 6.9 ist die Struktur der Zeitschlitze für diesen Systemvorschlag zusammengestellt. Die Mini-Zeitschlitze für zyklische Aktivitätsabfrage sind hier nicht dargestellt, da sie der Struktur in Abb. 4.5 b entsprechen. Das Bedarfsangaben-Feld, das an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelt wird, enthält hier drei Bedarfsangaben, je eine für die Klassen A, B und C. Ein zusätzliches Feld, in dem die Dienstklasse der übertragenen ATM-Zelle kodiert ist, kann vorgesehen werden; seine Funktion kann aber auch durch eine Speichertabelle in der Kopfstation wahrgenommen werden, die nach einer Rundlaufzeit nach dem Aussenden einer Sendeberechtigung dem Algorithmus zur Berechnung der Anzahl neuer Ankünfte nicht nur die Quelle der empfangenen ATM-Zelle, sondern auch deren Dienstklasse übermittelt. Daher ist dieses Feld in Abb. 6.9 nur als optional (gestrichelt) eingezeichnet.

6.3.3.2 Architektur der Zugangsstation

In Systemvorschlag 2 wird auch in Klasse A jede Ankunft einer ATM-Zelle einzeln an die Kopfstation gemeldet. Daher tritt bei ungestörter Funktion des Medienzugriffs der Fall nicht auf, daß eine Zugangsstation eine Sendeberechtigung für Klasse A erhält, ohne daß in der entsprechenden Warteschlange eine ATM-Zelle vorhanden ist. Daher hätte ein Mechanismus zur lokalen Weiterverwendung dieser Sendeberechtigungen für Klasse C (S_2 in Abb. 6.7) hier keine Wirkung. Daraus ergibt sich eine einfachere Struktur der Zugangsstation, die in Abb. 6.10 dargestellt ist.

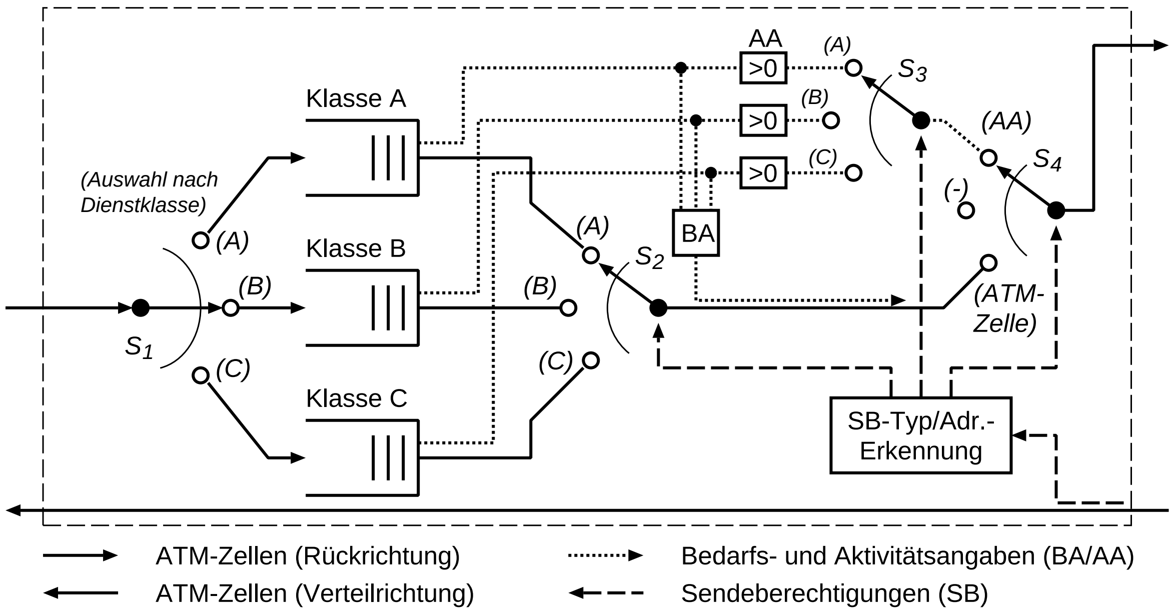


Abb. 6.10: *Architektur der Zugangsstation für Systemvorschlag 2.*

Die Zugangsstation stellt im wesentlichen für jede der drei Dienstklassen eine Warteschlange zur Verfügung. Die Bedienung der Warteschlangen durch Sendeberechtigungen für ATM-Zellen und die Übertragung von Ankunftsinformationen in Aktivitätsangaben erfolgt getrennt nach Dienstklassen. In die an die ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben werden nach Abb. 6.9 die Warteschlangenlängen aller Dienstklassen eingetragen. Insgesamt ergibt sich eine in Bezug auf die drei Dienstklassen vollständig symmetrische Struktur.

6.3.3.3 Architektur der Kopfstation

In der Architektur der Kopfstation sind die Taktgeber für Klasse A durch eine weitere Instanz der Aktivitäts- und Bedarfsangabenauswertung zur Erzeugung von Sendeberechtigungen ersetzt, wie Abb. 6.11 zeigt. Da für alle drei Dienstklassen Sendeberechtigungen für

Aktivitätsangaben-Blöcke erzeugt werden müssen, erhöht sich die Anzahl der Prioritätsstufen in der Auswahl der in jedem Zeitschlitz übertragenen Sendeberechtigungen um Eins. Ansonsten entspricht die Struktur der in Abb. 6.8 für Systemvorschlag 1 dargestellten.

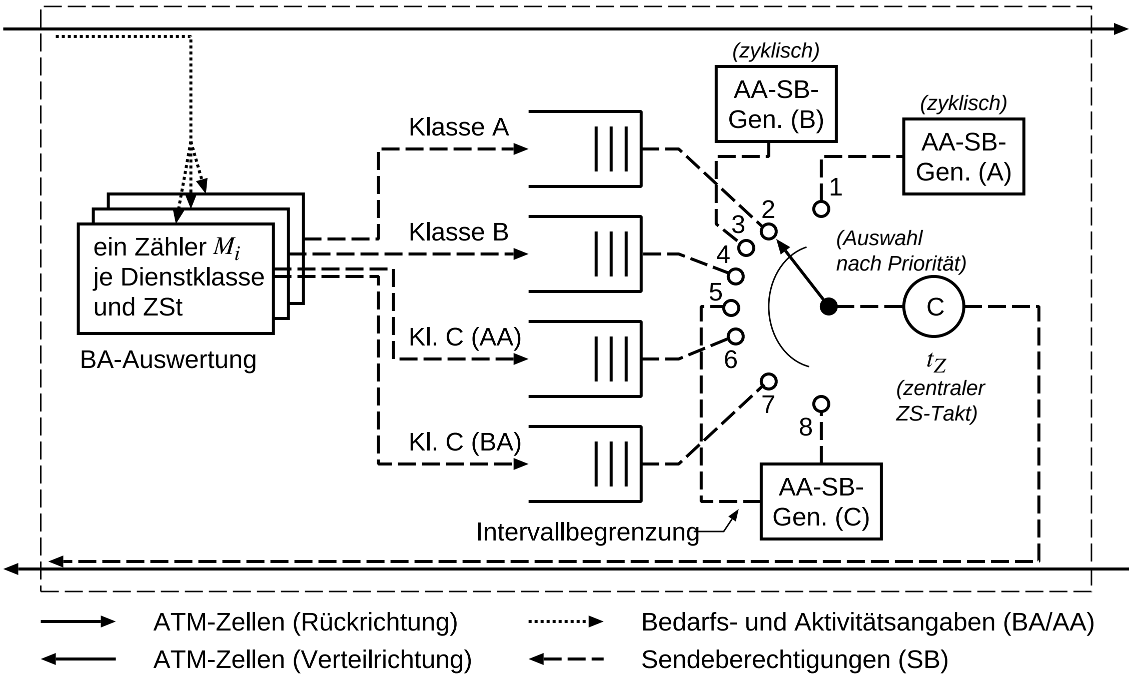


Abb. 6.11: *Architektur der Kopfstation für Systemvorschlag 2.*

6.3.4 Leistungsbewertung und -vergleich

Zum Leistungsvergleich der Systemvorschläge werden die Szenarien P100, P10, S1 und S2 eingesetzt, die in den Abschnitten 6.1.1 und 6.1.2 definiert sind. In Abb. 6.12 ist zunächst die Verteilung der Zweipunkt-CDV nach der Simulation der Systemvorschläge 1 und 2 dargestellt. Die D100-Quellen wurden der Klasse A und die TS10-Quellen der Klasse B zugeordnet. Für Systemvorschlag 1 wurde an den Stationen mit D100-Verkehr die Bedienperiode für Klasse A auf $99t_Z$ und die Aktivitätsabfrageperiode für Klasse B auf $t_{P_B} = t_Z/\rho_{P_B} = 10t_Z$ eingestellt. Für Systemvorschlag 2 wurde $t_{P_A} = 10t_Z$ und $t_{P_B} = 50t_Z$ gewählt. Die Abfrageperiode für Klasse C ist in beiden Systemen $t_{P_C} = 50t_Z$. In Systemvorschlag 2 muß t_{P_B} deutlich größer sein als t_{P_A}, damit der Anteil der Übertragungskapazität, der für die zyklischen Aktivitätsabfrageblöcke insgesamt eingesetzt wird, nicht zu groß wird. In Systemvorschlag 1 dagegen kann t_{P_B} relativ klein sein, da für Klasse A keine Aktivitätsabfrage stattfindet.

Die zyklische Bedienung der D100-Quellen in Klasse A in Systemvorschlag 1 (Abb. 6.12 links) zeigt die erwarteten Verzögerungsschwankungen von einer Bedienperiode, also $99t_Z$. Die Belastung des Systems und der Zugangsstation durch anderen Verkehr hat hierbei auf die Bedienung der Quellen in Klasse A keinen Einfluß, daher sind die Ergebnisse für die

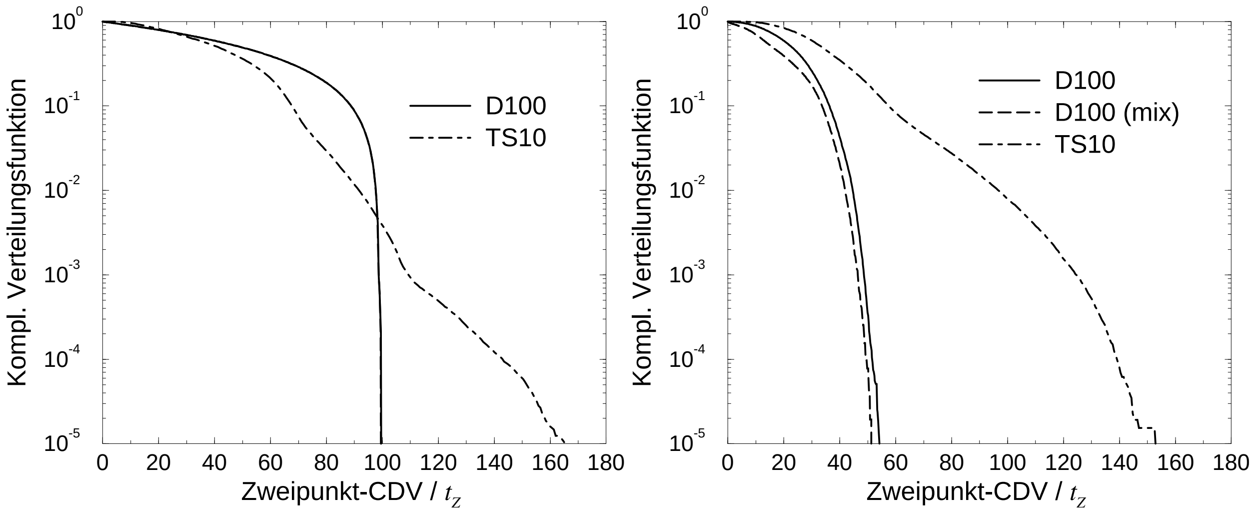


Abb. 6.12: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV für das Szenario P100 in den Systemvorschlägen 1 (links) und 2 (rechts). CDV der D100-Quellen an eigenen Zugangsstationen (——), der D100-Quellen, die sich Zugangsstationen mit TS10-Quellen teilen (– – –) und der TS10-Quellen an diesen Zugangsstationen (–·–).*

D100-Quellen an eigenen Zugangsstationen nicht von den Ergebnissen aus Zugangsstationen unterscheidbar, an denen zusätzlich in Klasse B eine TS10-Quelle bedient wird.

Mit Systemvorschlag 2 (Abb. 6.12 rechts) lassen sich die Durchlaufzeitschwankungen der D100-Quellen stark verringern. An den Zugangsstationen mit D100- und TS10-Quellen sind sie sogar noch etwas geringer als an den anderen Zugangsstationen, weil sich hier die zusätzliche Möglichkeit der Meldung neuer ATM-Zellen der D100-Quelle durch die an die ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben ergibt. Bei den Durchlaufzeitschwankungen der TS10-Quelle (Klasse B) zeigt sich kein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden Systemen, obwohl für Systemvorschlag 1 die Abfrageperiode $t_{P_B} = 10t_Z$ und für Systemvorschlag 2 $t_{P_B} = 50t_Z$ eingestellt war.

In Abb. 6.13 ist die komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV für das Szenario P10 dargestellt. Dabei wurde für Systemvorschlag 1 die Bedienperiode für Klasse A an den fünf betroffenen Zugangsstationen auf $9{,}9t_Z$ eingestellt, so daß sich an jeder Zugangsstation neun Teilperioden von $10t_Z$ und eine Teilperiode von $9t_Z$ ergeben. Dadurch erhält Klasse A ein $(1\text{-}10^{-5})$-Quantil der Verzögerungsschwankung von $10t_Z$, dem ein Wert von etwa $47t_Z$ mit Systemvorschlag 2 gegenübersteht. Die genaue Verteilung und damit der Mittelwert der Durchlaufzeit in Systemvorschlag 2 hängt davon ab, ob die betrachtete D10-Quelle sich eine Zugangsstation mit einer TS10-Quelle teilt oder nicht. Dies hat aber keinen Einfluß auf den Verlauf der Verteilung im Grenzbereich langer Durchlaufzeiten, wie Abb. 6.13 rechts zeigt.

Die Durchlaufzeit der Zellen aus den TS10-Quellen ist im Vergleich zu Abb. 6.12 bei beiden Systemvorschlägen deutlich verringert. Im Szenario P10 kommen TS10-Quellen nur an ge-

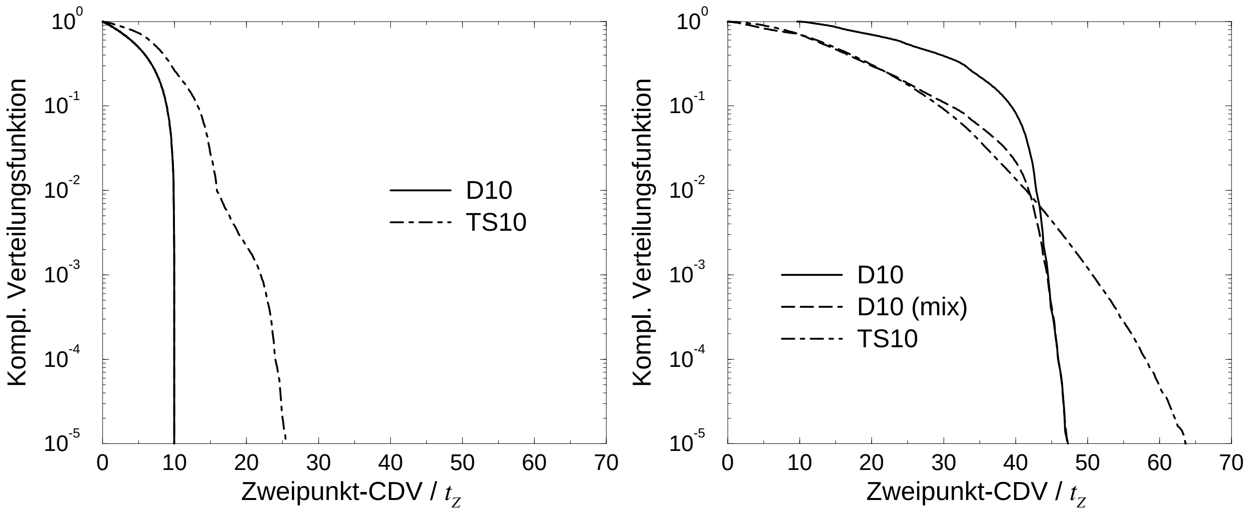


Abb. 6.13: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV für das Szenario P10 in den Systemvorschlägen 1 (links) und 2 (rechts). CDV der D10-Quellen an eigenen Zugangsstationen (——), der D10-Quellen, die sich Zugangsstationen mit TS10-Quellen teilen (– – –) und der TS10-Quellen an diesen Zugangsstationen (–·–).*

meinsamen Zugangsstationen mit D10-Quellen vor, so daß beim Warten auf eine Möglichkeit zur Meldung einer neuen Ankunft die effektive Abfrageperiode $t_{PE_B} = 3t_{P_B}$ relativ groß ist gegenüber der Wartezeit bis zur nächsten Gelegenheit, eine neue Ankunft in einer Bedarfsangabe zu melden, die an eine ATM-Zelle der Klasse A zur Kopfstation übertragen wird. Daher ergibt sich für die TS10-Quellen im Systemvorschlag 1 eine effektive Abfrageperiode von zehn Zeitschlitzdauern, während sie im Systemvorschlag 2 mit ihrem (1-10^{-5})-Quantil bei etwa $47t_Z$ liegt. Das (1-10^{-5})-Quantil der Zweipunkt-CDV ist jeweils noch um etwa $15t_Z$ größer.

In diesem Szenario hat demnach die zyklische Bedienung der Klasse A Vorteile gegenüber der dynamischen Zuweisung der Zeitschlitze. Die Grenze, von der an die zyklische Bedienung kürzere Durchlaufzeiten hervorruft, liegt nach Abb. 5.63 bei $t_Q = 2\tau = 36t_Z$. Andererseits ist die Zweipunkt-CDV für Klasse A bei Systemvorschlag 2 auch in Szenario P10 noch etwas geringer als in Szenario P100, so daß insgesamt die *Grenze* der Zweipunkt-CDV in Systemvorschlag 2 geringer ist als in Systemvorschlag 1.

Das Szenario S1 nach Tab. 6.4 sieht zusätzlich zu den in Szenario P100 angenommenen Quellen noch 30 Hintergrundquellen vom Typ TS100 vor, die in Dienstklasse C übermittelt werden sollen. In beiden Systemvorschlägen wird für Klasse C eine Aktivitätsabfragerate von $\rho_{P_C} = 1/50$ eingestellt. Da das mittlere Gesamtangebot hierdurch sehr groß ist und da in Klasse B Verkehr mit variabler Zellrate übertragen wird, sind Verluste in Klasse C zu erwarten.

Die Zusammenstellung der komplementären Verteilungsfunktionen der Zweipunkt-CDV in Abb. 6.14 zeigt, daß bei beiden Systemvorschlägen der Verkehr der Klasse C (TS100) sehr

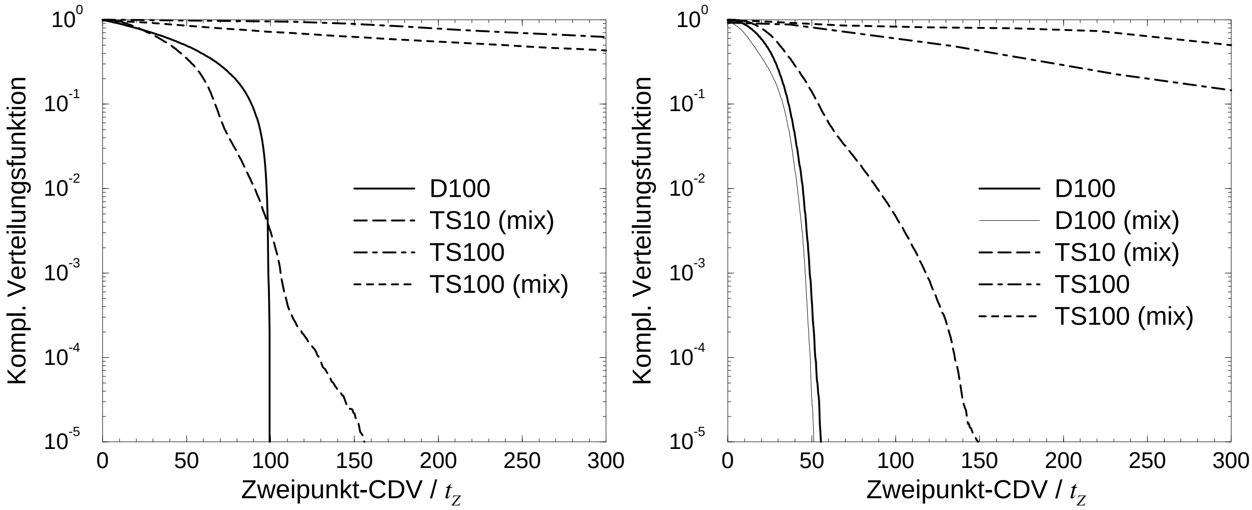


Abb. 6.14: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV im Szenario S1 für die D100-Quellen (——), die TS10-Quellen (– – –), die TS100-Quellen an Zugangsstationen mit D100- und TS10- Verkehr (—·—) und die TS100-Quellen an eigenen Zugangsstationen (------). Links: Systemvorschlag 1; rechts: Systemvorschlag 2.*

große Verzögerungsschwankungen erfährt. Die Wahrscheinlichkeit für große Durchlaufzeiten sinkt allerdings bei Systemvorschlag 2 schneller ab als bei Systemvorschlag 1. In beiden Fällen wird die CDV für die Dienstklassen A und B nicht vergrößert, wie ein Vergleich mit Abb. 6.12 zeigt. An den Zugangsstationen, die nur Verkehr der Klasse C zu übermitteln haben, geht bei Systemvorschlag 2 etwa jede dritte ATM-Zelle verloren. An den anderen Zugangsstationen können neue ATM-Zellen der TS100-Quellen über Bedarfsangaben gemeldet werden, die an ATM-Zellen der anderen Dienstklassen gekoppelt sind. In Systemvorschlag 1 ist die gesamte Systemauslastung um 2% geringer, da die zyklische Aktivitätsabfrage nur für zwei der drei Dienstklassen durchgeführt werden muß. Die etwas überhöhte Bedienrate in Klasse A macht nur etwa 0,5% der Übertragungskapazität aus und wird dazu verwendet, den ATM-Zellen der Klasse C an den betroffenen Zugangsstationen zusätzliche Bandbreite zur Verfügung zu stellen. Die Summe aus Verkehrsangebot und der für zyklische Aktivitätsangaben reservierten Übertragungskapazität beträgt im Szenario S1 bei Systemvorschlag 1 im Mittel nur 97,5%, während bei Systemvorschlag 2 ein Wert von 99% erreicht wird, so daß wegen der variablen Zellrate der TS10- und TS100-Quellen Verluste nur noch durch extrem große Warteschlangen verhindert werden könnten.

Abb. 6.15 zeigt den Unterschied im (1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit des TS100-Verkehrs an verschiedenen Zugangsstationen für die beiden Systemvorschläge. Die unterschiedliche Behandlung des Verkehrs der Klasse C an unterschiedlichen Zugangsstationen ist eine Art von Unfairneß. Allerdings erfährt der Verkehr der Klasse C genau an jenen Zugangsstationen eine schnellere oder verlustärmere Bedienung, an denen gleichzeitig Verkehr der Klassen A oder B übertragen wird. Wenn die Benutzer des Zugangsnetzes für Verkehr der Klassen A

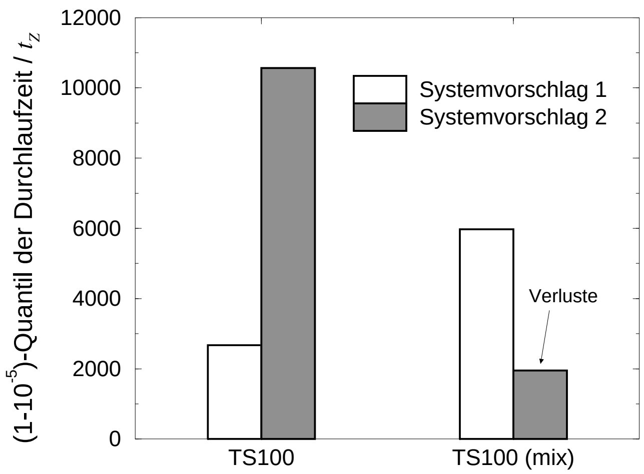


Abb. 6.15: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit der ATM-Zellen aus Quellen des Typs TS100 an eigenen Zugangsstationen und an Zugangsstationen mit D100- und TS10-Verkehr („mix") im Szenario S1.*

oder B höhere Gebühren bezahlen als für Klasse C, dann kann diese Ungleichbehandlung mit der Begründung motiviert werden, daß die höhere Dienstgüte für Klasse C durch die Gebühren für die Klassen A und B bezahlt wird.

Im Szenario S2 ist das mittlere Gesamtverkehrsangebot um 2% geringer, so daß auch mit Systemvorschlag 2 keine Verluste auftreten. Abb. 6.16 zeigt die komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV für die verschiedenen Quellen an verschiedenen Zugangsstationen. Wie im Szenario P10 (Abb. 6.13) ist auch hier die Durchlaufzeitschwankung mit Systemvorschlag 1 für die Dienstklassen A und B deutlich geringer als mit Systemvorschlag 2.

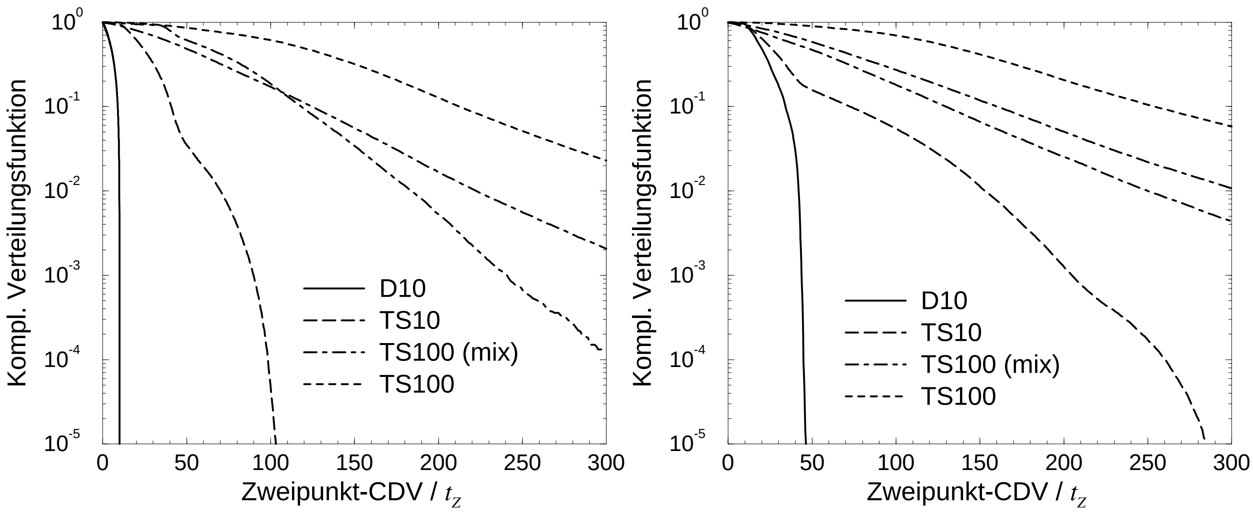


Abb. 6.16: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV im Szenario S2 für die D10-Quellen (——), die TS10-Quellen (– – –), die TS100-Quellen an Zugangsstationen mit D10- bzw. TS10- Verkehr (–·–) und die TS100-Quellen an eigenen Zugangsstationen. Links: Systemvorschlag 1; rechts: Systemvorschlag 2.*

Vergleichbar mit den Ergebnissen für Szenario S1 (Abb. 6.14) erfahren auch hier die Zellen der TS100-Quellen an eigenen Zugangsstationen größere Zellverzögerungsschwankungen als an Zugangsstationen, die auch Verkehr der Klassen A oder B übertragen. Hierbei gilt dasselbe Fairneß-Argument wie oben: Wenn die Reservierung von Übertragungskapazität für die Klassen A und B bezahlt wird, darf einer Zugangsstation, deren Verkehr bezahlt wird, auch ein größerer Anteil der Restbandbreite zur Verfügung stehen als solchen Zugangsstationen, an denen nur Verkehr der Klasse C übermittelt wird. Abb. 6.17 zeigt, daß die Zellverzögerungsschwankungen des TS100-Verkehrs im Szenario S2 an Zugangsstationen mit Verkehr der Klasse A am geringsten sind. An Zugangsstationen mit Verkehr der Klasse B sind sie etwas größer, und der größte Wert tritt auf, wenn Verkehr der Klasse C an Zugangsstationen ohne höher priorisierten Verkehr übertragen wird.

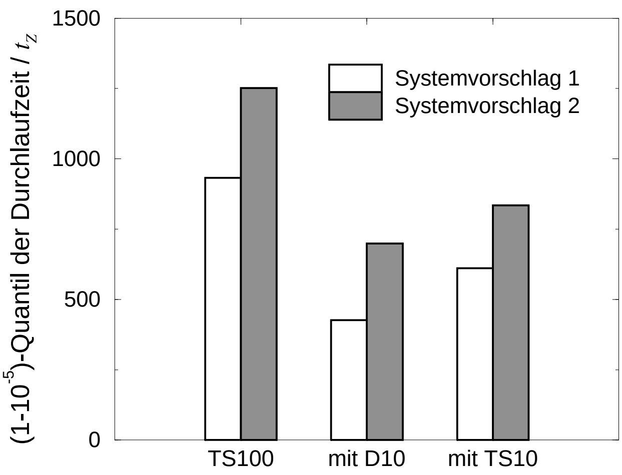


Abb. 6.17: *(1-10^{-5})-Quantil der Durchlaufzeit der ATM-Zellen aus Quellen des Typs TS100 an eigenen Zugangsstationen („TS100“), an Zugangsstationen mit D10-Verkehr („mit D10“) und solchen mit TS10-Verkehr („mit TS10“) im Szenario S2.*

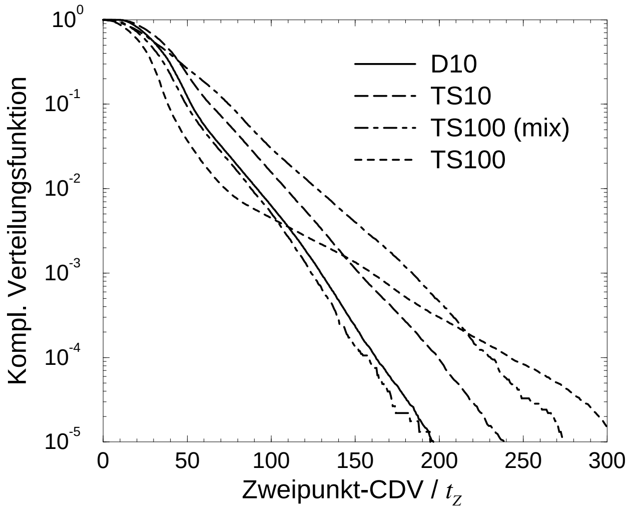


Abb. 6.18: *Komplementäre Verteilungsfunktion der Zweipunkt-CDV im Szenario S2 ohne Prioritäten für Quellen des Typs D10 (——), TS10 (– – –), TS100 an Zugangsstationen mit D10- bzw. TS10- Verkehr (–·–) und TS100 an eigenen Zugangsstationen.*

Durch die Trennung der Dienstklassen werden auch im Szenario S2 die Überlasteffekte zumindest von Klasse B ferngehalten (vgl. Abb. 6.16 und Abb. 6.13). Dies wird besonders in Abb. 6.18 im Vergleich mit einem System deutlich, in dem – bei ansonsten gleichen Voraussetzungen – alle Dienstklassen mit derselben Priorität behandelt werden. Ohne Priorität werden zwar die Durchlaufzeitschwankungen für Klasse C reduziert, aber die CDV für den zeitkritischen Verkehr der Klasse A ist deutlich größer als in den beiden Systemvorschlägen aus den Abschnitten 6.3.2 und 6.3.3.

Kapitel 7

Betrachtung der Verbindungsebene

Der Einsatz eines ATM-Zugangsnetzes anstelle einzelner Teilnehmerzugangsleitungen zu einer Vermittlungsstelle hat einen Einfluß auf die Verbindungsannahmesteuerung (*Connection Admission Control, CAC*) in der Vermittlungsstelle. Diese Verbindungsannahmesteuerung entscheidet bei jedem Verbindungsaufbauwunsch anhand der für die Verbindung angemeldeten Verkehrsparameter (*Traffic Descriptors*) darüber, ob die neue Verbindung mit den entsprechenden Parametern noch angenommen werden kann, so daß die Dienstgüte sowohl für die neu angenommene Verbindung als auch für die bereits bestehenden Verbindungen gewährleistet werden kann.

Wenn die Anzahl und das Verhalten der Verkehrsquellen auf der Verbindungsebene vorgegeben sind, kann die Blockierwahrscheinlichkeit, also die Wahrscheinlichkeit, mit der ein neu eingetroffener Verbindungswunsch abgelehnt werden muß, über eine entsprechende Dimensionierung der Ressourcen (Leitungs- und Vermittlungskapazität) eingestellt werden.

Die Blockierwahrscheinlichkeit im Zugangsbereich wurde von Archambault und Quian [15] und von Panken [116] untersucht. Archambault und Quian setzen als charakteristisches Merkmal des Breitband-Zugangsnetzes an, daß eine endliche Anzahl von Teilnehmern jeweils einen von drei Diensten verwendet. Die Bandbreiteanforderungen des Dienstes werden für CAC-Belange analog zu einer Mehrkanaldurchschaltung modelliert, wobei für Dienste mit variabler Zellrate jeweils eine effektive Zellrate eingesetzt wird. Dadurch wird modelliert, daß in einem Zugangsnetz statistisches Multiplexen mit dynamischer Zuteilung der Übertragungskapazität möglich ist. Der wesentliche Unterschied zu anderen Modellen zur Blockierwahrscheinlichkeit bei Mehrkanaldurchschaltung besteht hier in der Berücksichtigung der Korrelationen, die dadurch entstehen, daß eine endliche Anzahl von Teilnehmern jeweils auf maximal einen aus drei Diensten zugreift.

Panken [116] sieht den wesentlichen Unterschied zwischen einem ATM-Zugangsnetz und einem direkten Anschluß aller Teilnehmer an einen Vermittlungsknoten darin, daß im Zugangsnetz durch die begrenzte Übertragungsgeschwindigkeit der *Anschlußleitungen* zwischen T-Referenzpunkt und ONU (vgl. Abb. 2.27) eine zusätzliche Blockierung eintritt, und betrachtet außerdem die Erweiterung der klassischen Modelle durch Gruppenankünfte von Verbindungswünschen.

Zusätzlich müssen allerdings bei der Betrachtung der Verbindungsannahme in ATM-Zugangsnetzen noch zwei weitere Aspekte berücksichtigt werden: Die Auslastungsgrenze eines Zugangsnetzes liegt bei kleineren Verkehrswerten als die eines Vermittlungsknotens mit derselben Übertragungskapazität auf der Ausgangsleitung und die erzielbare Dienstgüte wird auch bei geringer Auslastung durch das Medienzugriffsverfahren entscheidend beeinflußt. Diese beiden Aspekte werden in den folgenden beiden Abschnitten kurz diskutiert.

7.1 Auslastungsgrenze

Ohne konzentrierendes Zugangsnetz im Anschlußbereich, wenn also alle Zugangsstationen über eingene Leitungen an einen ATM-Vermittlungsknoten angeschlossen sind, kann auf mehreren Ebenen ein Bündelungsgewinn erzielt werden:

1. Dadurch, daß nicht an jeder Station gleichzeitig Verbindungen aktiv sind, kann auf der *Verbindungsebene* ein Bündelungsgewinn erzielt werden, so daß die Ausgangsleitung des Vermittlungsknotens zum Weitverkehrsnetz hin eine geringere Übertragungskapazität benötigt als es der Summe aller Übertragungskapazitäten der Teilnehmeranschlußleitungen entspricht.

2. Wenn innerhalb einer Dienstklasse mehrere Stationen Verkehr senden, können die statistischen Schwankungen der einzelnen Zellraten ausgenutzt werden, um einen Multiplexgewinn durch *statistisches Multiplexen* zu erzielen. Im Rahmen einer vorgegebenen Verlust- oder Verzögerungsgrenze können so mehrere Verbindungen in einer Dienstklasse mit einer geringeren Übertragungskapazität bedient werden, als wenn für jede Verbindung eine der Spitzenzellrate entsprechende Übertragungskapazität reserviert werden müßte.

3. Durch entsprechende Pufferverwaltung in einem Vermittlungsknoten können verschiedenen Dienstklassen unterschiedliche Dienstgüten (CDV, Verlustwahrscheinlichkeit) zugesichert werden. Die CAC-Funktion im Vermittlungsknoten berücksichtigt bei der

Entscheidung über die Annahme einer neuen Verbindung in einer Dienstklasse die Fähigkeiten der Pufferverwaltung und die den anderen Verbindungen zugesicherte Dienstgüte. Dadurch kann ein statistischer Multiplexgewinn auch *zwischen verschiedenen Dienstklassen* erzielt werden: Der Verkehr einer Dienstklasse mit weniger hoher Priorität kann die Restkapazität der Ausgangsleitung nutzen, die nach der Bedienung der Dienstklassen mit höherer Priorität verbleibt. Dabei wird durch die CAC sichergestellt, daß die benötigte Übertragungskapazität mit genügend großer Wahrscheinlichkeit vorhanden ist, so daß die Dienstgütekriterien eingehalten werden können. Dazu ist eine Überprüfung der tatsächlichen Zellrate jeder Verbindung durch eine Quellflußkontrolle nötig.

Mit einem konzentrierenden ATM-Zugangsnetz stellt sich die Situation folgendermaßen dar:

1. Ein einem konzentrierten Vermittlungsknoten vergleichbarer Bündelungsgewinn auf der Verbindungsebene kann erreicht werden, wenn mindestens ein semi-statisches Multiplexen (s. Abschnitte 4.2 und 5.1) oder ein dynamisches Multiplexen von Datenzellen vorgesehen wird.

2. Das statistische Multiplexen von Verkehr innerhalb einer Dienstklasse ist bei semi-statischer Bandbreitezuteilung auf den Verkehr beschränkt, der an derselben Zugangsstation übertragen wird. Durch dynamische Kanalzuteilung kann auch ein statistischer Multiplexgewinn innerhalb einer Dienstklasse zwischen mehreren Zugangsstationen erzielt werden, wie in Abschnitt 5.3.5 gezeigt wurde.

3. Zur Unterstützung unterschiedlicher Dienstgüte in verschiedenen Dienstklassen müssen die Dienstklassen bei der Zuweisung der Sendeberechtigungen im Zugangsnetz berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 6.2). Die Dienstgüte kann jeweils nur in dem Maß garantiert werden, wie sie durch das Medienzugriffsverfahren erreicht werden kann. Diese Randbedingung wird im folgenden Abschnitt 7.2 weiter ausgeführt. Eine weitere Einschränkung der Dienstgütegarantien tritt aufgrund der verteilten Pufferung auf: Die Warteschlangen in den Zugangsstationen müssen lang genug sein, um Verluste beim Warten auf Sendeberechtigungen zu vermeiden. Dadurch treten unter Umständen bei einem zu großen Verkehrsangebot auf der Büschelebene weniger Verluste auf als in einem entsprechenden konzentrierten Multiplexer [35]. Durch diese Umwandlung von Verlusten in zusätzliche Verzögerung kann es vorkommen, daß ein bei der Verbindungsannahme vorgegebenes Verzögerungskriterium überschritten wird. Außerdem wird in diesem Fall die für eine mit geringerer Priorität behandelte Dienstklasse zur Verfügung stehende Restbandbreite entsprechend geringer sein, so daß auch

deren Dienstgüte nicht eingehalten werden kann. Dieser Einfluß des Zugangsnetzes auf die erreichbare Dienstgüte muß bei der Verbindungsannahme berücksichtigt werden. Außerdem wird der erzielbare Multiplexgewinn eingeschränkt, wenn mehrere ATM-Dienstklassen wie in den Systemvorschlägen in Abschnitt 6.3 in einer Zugangsnetz-Dienstklasse zusammengefaßt werden. Dabei muß für alle Verbindungen in einer Zugangsnetz-Dienstklasse dieselbe hohe Dienstgüte garantiert werden wie für eine Verbindung aus der ATM-Dienstklasse mit den höchsten Dienstgüteanforderungen, die derselben Zugangsnetz-Dienstklasse zugeordnet ist.

4. Durch den Einsatz von Übertragungskapazität in beiden Richtungen zum Transport von MAC-Steuerinformationen (Sendeberechtigungen und Bedarfs- oder Aktivitätsangaben) wird die zur Verfügung stehende Übertragungskapazität des Zugangsnetzes etwas verringert. Der genaue Einfluß dieser Verringerung muß anhand der erzielbaren Dienstgüte bewertet werden, vgl. Kapitel 5.

In der Verteilrichtung verhält sich ein ATM-Zugangsnetz, abgesehen von Punkt 4 und der in den Abschnitten 2.7.1.1 und 5.1.4 diskutierten Ratenanpassung, transparent und kann daher wie eine einzelne Leitung mit der entsprechenden Übertragungskapazität betrachtet werden.

7.2 Einfluß des Medienzugriffs

Beim ATM-Verbindungsaufbau wird eine Dienstgüte vereinbart, die Grenzen für die Verlustwahrscheinlichkeit und die Zellverzögerungsschwankungen festlegt. Das Einhalten dieser Grenzen wird für die in der Verbindung übermittelten ATM-Zellen garantiert, falls die vereinbarten Verkehrsparameter (beispielsweise die maximale und die durchsetzbare Zellrate, vgl. [82, 18]) eingehalten werden. Daher darf nur eine Dienstgüte vereinbart werden, die für alle verkehrsparameterkonformen Verkehre eingehalten werden kann. In konzentrierten ATM-Vermittlungsknoten treten die größten Zellverzögerungsschwankungen auf, wenn die vereinbarten Zellraten maximal ausgeschöpft werden. Zu solchen „Worst Case"-Verkehren gibt es verschiedene Untersuchungen, beispielsweise [152].

Durch den Einsatz von Medienzugriffsmechanismen mit großer Reaktionszeit in einem ATM-Zugangsnetz kommt eine weitere Komponente hinzu: Nicht nur das Verkehrsangebot an den Multiplexer, sondern auch der Zellabstand des Verkehrs an einer Zugangsstation ist entscheidend für die garantierbaren Durchlaufzeitschwankungen. In Kapitel 5 wurde gezeigt, welchen Verzögerungsschwankungen verschiedene Verkehre in der Rückrichtung von ATM-Zugangsnetzen unterliegen. Dabei war zu sehen, daß Verkehr mit einer konstanten, hohen Zellrate geringere Verzögerungsschwankungen erfährt als Verkehr mit einer variablen oder geringen Zellrate. In den Abschnitten 5.5.2 und 5.7.1 wurden diese Abhängigkeiten von denen der Auslastung der Warteschlange für Sendeberechtigungen in der Kopfstation isoliert, indem nur eine einzelne aktive Zugangsstation betrachtet wurde.

Wenn nun der *Übermittlungsdienst* anstelle des *Verkehrs* betrachtet wird, dann muß als „Worst Case“ im Hinblick auf die Verzögerungen durch die Reaktionszeit der Medienzugriffsmechanismen jeder Verkehr betrachtet werden, der eine *geringere* Zellrate aufweist als vereinbart, oder in dem sich Pausen- und Aktivitätsphasen einer Quelle abwechseln. Daher kann einer Verbindung der ATM-Dienstklasse für konstante Zellrate (CBR im ATM-Forum oder DBR bei ITU-T), für die eine maximale Zellrate $1/t_Q$ vereinbart wurde, nicht die beispielsweise in Abb. 5.61 für D-Verkehr eingetragene Zweipunkt-CDV zugesichert werden, sondern es kann nur das Maximum über alle zu $t'_Q \geq t_Q$ auftretenden Zweipunkt-CDV-Werte für D- oder TS-Verkehr zugesichert werden. Verbindungen mit sehr strengen Anforderungen an die maximalen Zellverzögerungsschwankungen (CDV kleiner als t_{PE}) können daher in einem ATM-Zugangsnetz überhaupt nicht akzeptiert werden.

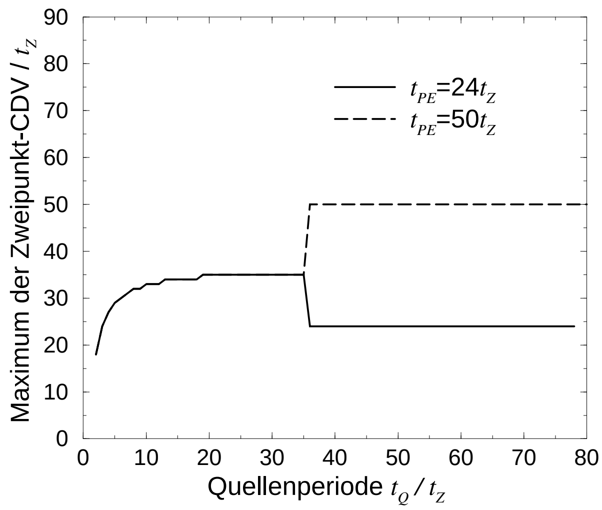


Abb. 7.1: *Maximum der Zweipunkt-CDV für D-Verkehr als Funktion der Quellenperiode t_Q.*

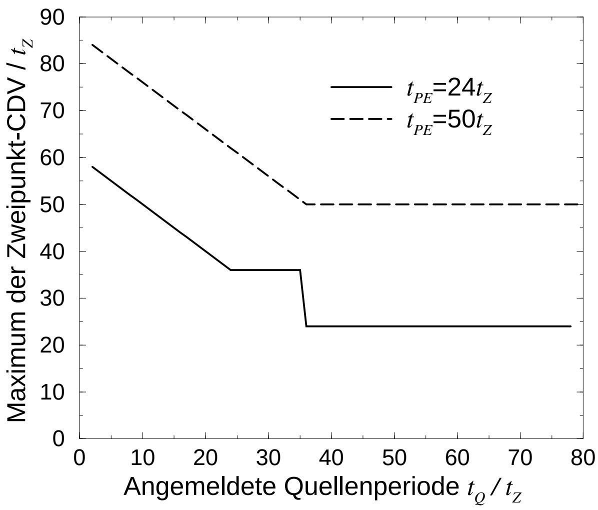


Abb. 7.2: *Maximum der garantierbaren Zweipunkt-CDV für D-Verkehr als Funktion der angemeldeten Quellenperiode t_Q.*

Für den Mechanismus der zyklischen Aktivitätsabfrage ist die maximale Zweipunkt-CDV, die bei einer D-Quelle auftritt, in Abb. 7.1 für die effektiven Abfrageperioden $t_{PE} = 24t_Z$ und $t_{PE} = 50t_Z$ analog zu Abb. 5.61 aufgetragen. Dies entspricht der CDV, die die Zellen einer einzelnen periodischen Quelle bei der Übertragung in der Rückrichtung eines entsprechenden ATM-Zugangsnetzes erfahren. Im Vergleich dazu zeigt Abb. 7.2 die entsprechend den oben gemachten Ausführungen garantierbare CDV-Grenze unter denselben Randbedingungen. Im Bereich $t_Q < 2\tau$ ist die gegenüber Abb. 7.1 vergrößterte CDV-Grenze deutlich zu sehen.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden Mechanismen untersucht und verglichen, die in Medienzugriffsprotokollen im Rückkanal von ATM-Zugangsnetzen eingesetzt werden. Kapitel 2 beschrieb dazu die topologische und funktionale Architektur von ATM-Zugangsnetzen und die Randbedingungen, unter denen die Medienzugriffsprotokolle untersucht wurden. Es wurden zwei Bezeichnungen für Netzelemente definiert: die *Kopfstation* und die *Zugangsstationen* seien diejenigen Netzelemente, zwischen denen das Medienzugriffsprotokoll abläuft. Zur Untersuchung periodischer Vorgänge mit simulativen Methoden wurden in Kapitel 3 Voruntersuchungen durchgeführt, die auf die Methode der Dekorrelation durch wiederholte zufällige Phasensprünge führten. Diese Methode wurde in den Untersuchungen der Kapitel 5 und 6 eingesetzt.

In den aus der Literatur bekannten Klassifikationen für Medienzugriffsprotokolle fallen die meisten der hier untersuchten Protokolle in dieselbe Kategorie „Medienzugriff nach Reservierung“. Daher wurde in Kapitel 4 eine genauere Klassifikation der verschiedenen Optionen für den Medienzugriff mit Reservierung durchgeführt, die drei Aspekte der Reservierung näher betrachtet: das Einplanen von Minizeitschlitzen zur Reservierung und die Art des Zugriffs auf diese Mini-Zeitschlitze, den Inhalt der Reservierungen und die Verarbeitung der Reservierungen in der zentralen Kopfstation, bei der eine zusätzliche Verkehrsformung durchgeführt werden kann.

In Kapitel 5 wurde zunächst eine neue Analyse für die Ensemble-Verteilungsdichte der Wartezeiten im Wartesystem n*D/C/1 (beschrieben in Anhang A.1) dazu verwendet, einerseits die Grenzen des statischen Multiplexens und andererseits die Leistungsfähigkeit eines konzentrierten Multiplexers aufzuzeigen. Die Untersuchung des konzentrierten Multiplexers zeigt, welche Leistung ein Medienzugriffsverfahren im besten Fall erbringen kann. Zur Untersuchung der Medienzugriffsmechanismen wurden in Tab. 5.1 auf S. 88 vier homogene

Verkehrsszenarien mit großer oder kleiner sowie konstanter oder variabler Zellrate definiert. Anhand dieser Szenarien wurden die weiteren Untersuchungen in Kapitel 5 durchgeführt.

In Abschnitt 5.3 wurde untersucht, nach welcher Strategie Mini-Zeitschlitze für Bedarfsangaben einzuplanen sind. Die Mini-Zeitschlitze verringern die für ATM-Zellen zur Verfügung stehende Übertragungskapazität in der Rückrichtung des Zugangsnetzes. Daher waren in dem in [26, 31] beschriebenen BAF-System solche Mini-Zeitschlitze nur eingeplant worden, wenn keine ATM-Zellen zu übertragen waren, damit die maximale Systemauslastung nicht durch die Verwendung von Übertragungskapazität für Mini-Zeitschlitze verringert würde. Die Untersuchungen in Abschnitt 5.3 haben allerdings gezeigt, daß diese Strategie nicht sinnvoll ist. Im Gegenteil empfiehlt es sich sogar, einen gewissen Anteil der Übertragungskapazität des Rückkanals fest für Mini-Zeitschlitze für Bedarfsangaben zu reservieren, da hierdurch auch bei großer Systemauslastung die Durchlaufzeit der ATM-Zellen durch das System teilweise drastisch gesenkt werden kann. Es wurde gezeigt, daß bei einem Verkehrsangebot von 80% der Übertragungskapazität die kürzesten Durchlaufzeiten auftreten, wenn zusätzlich etwa 12–15% der Übertragungskapazität für Mini-Zeitschlitze für Bedarfsangaben reserviert werden.

In verschiedenen Systemvorschlägen für ATM-Zugangsnetze wurde der wahlfreie Vielfachzugriff anstelle eines zyklischen Zugriffs auf Mini-Zeitschlitze für Bedarfsmeldungen vorgesehen, damit Zugangsstationen, die keinen Verkehr zu senden haben, nicht unnötig abgefragt werden. Für den dabei eingesetzten Stack-Algorithmus zur Kollisionsauflösung wurde – ausgehend von Systemen ohne große Signallaufzeiten – in der Literatur ein optimaler Aufspreizungsfaktor von $q_W = 3$ angegeben. In Abschnitt 5.4.2 wurde gezeigt, daß bei großen Signallaufzeiten eine wesentlich größere Aufspreizung ($q_W = 10$) sinnvoll ist. Dadurch können nicht nur die seltener auftretenden langen Durchlaufzeiten bei mehreren Folgekollisionen, sondern auch die mittleren Durchlaufzeiten der ATM-Zellen durch das Zugangsnetz verringert werden. In Abschnitt 5.4.3 wurde gezeigt, daß unter den gegebenen Randbedingungen der zyklische, festgelegte Zugriff auf Mini-Zeitschlitze für Bedarfsangaben zu kürzeren Durchlaufzeiten führt als der wahlfreie Zugriff. Auch bei einem Anteil von weniger als 10% aktiver Zugangsstationen mit stark büschelförmigem Verkehr gilt dieses Ergebnis, obwohl dieses Szenario für die wahlfreie Bedarfsmeldung besonders günstig ist. Aus analytischen Abschätzungen in Abschnitt 5.7.1, die durch Simulationsergebnisse größenordnungsmäßig bestätigt wurden, wurden in Abschnitt 5.7.4 Grenzkurven berechnet, die zeigen, unter welchen Randbedingungen der wahlfreie oder der zyklische, festgelegte Zugriff auf Mini-Zeitschlitze zu den kürzesten Durchlaufzeiten führt. Die Grenzkurven zeigen, daß der wahlfreie Zugriff nur bei einem sehr kleinen Anteil aktiver Stationen oder bei sehr kurzen Signallaufzeiten kürzere Durchlaufzeiten ermöglicht.

Der Einsatz binärer Aktivitätsangaben anstelle der vollständigen Warteschlangenlänge oder der Anzahl neu angekommener ATM-Zellen in der Zugangsstation kann zu wesentlich verkürzten Durchlaufzeiten führen, wenn durch den Verzicht auf eine Bit-Synchronisation des Empfängers in der Kopfstation kürzere Mini-Zeitschlitze eingesetzt werden können. Dies wurde in Abschnitt 5.5 mit Analyse- und Simulationsergebnissen gezeigt. Die vollständige Analyse für den Beginn des Medienzugriffs nach einer Pausenphase an einer einzelnen Zugangsstation wurde in Anhang A.2 bis A.4 dargestellt. Die Analyse der Zusammenhänge zwischen zyklischen Aktivitätsangaben und den an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelten Bedarfsangaben führte sowohl zu den in Abschnitt 5.7, Tab. 5.5 für andere Mechanismen verallgemeinerten Aussagen über die maximale Durchlaufzeit für eine einzelne Zugangsstation, als auch auf die Erklärung des Verlaufs der Ensemble-Verteilungsdichtefunktion in Abb. 5.35 und 5.36. Da die Beiträge des Medienzugriffs und des Warteprozesses in der Kopfstation näherungsweise separierbar sind, kann mit der Analyse auch im stärker ausgelasteten Zugangsnetz die Ensemble-Verteilungsdichtefunktion der Durchlaufzeit vorhergesagt werden, wie der Vergleich zwischen Analyse und Simulation in den Abbildungen 5.39 und 5.40 zeigt.

Die implizite Verkehrsformung im Bündel aller Verbindungen einer Zugangsstation wurde im BAF-System [26, 31] als Mittel zur Verringerung der Durchlaufzeitschwankungen und damit der Reduktion des Einflusses des Medienzugriffsprotokolls auf das Verkehrsprofil des Ausgangsverkehrs eines Zugangsnetzes vorgesehen. Die Untersuchungen in Abschnitt 5.6 haben allerdings gezeigt, daß unter normalen Umständen eine implizite Verkehrsformung im Bündel nicht sinnvoll ist. Auch die aus der Literatur bekannten Alternativvorschläge [116] können die durch den Medienzugriff verursachten Zellverzögerungsschwankungen nicht reduzieren. In Abschnitt 5.6.3 wurde zusätzlich ein Vorschlag aus der Literatur [9] zur *expliziten* Wiederherstellung eines Verkehrsprofiles verallgemeinert und untersucht. Es konnte gezeigt werden, daß mit diesem Mechanismus eine deutliche Verringerung der Zellverzögerungsschwankungen möglich ist.

In Kapitel 6 wurden Mechanismen zur Behandlung mehrerer Dienstklassen in einem Zugangsnetz verglichen. Dabei zeigte sich, daß ein lokaler Einsatz statischer Prioritäten in den Zugangsstationen ohne deren Berücksichtigung in der Kopfstation nicht sinnvoll ist. Wenn die unterschiedlichen Dienstklassen jedoch in den Bedarfsangaben für den Medienzugriff berücksichtigt werden, dann kann eine effektive Trennung der Verkehre unterschiedlicher Dienstklassen erreicht werden. Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurden in Abschnitt 6.3 zwei Systemvorschläge ausgearbeitet und untersucht. Dabei wurde gezeigt, daß in einem ATM-Zugangsnetz sowohl eine große Systemauslastung als auch ein statistischer Multiplexgewinn in verschiedenen Dienstklassen erreicht werden kann.

In Kapitel 7 wurde schließlich der Einfluß der vorausgegangenen Untersuchungen auf die Verbindungsebene betrachtet. Der Einsatz eines ATM-Zugangsnetzes verringert sowohl die Auslastungsgrenzen der einzelnen Dienstklassen, als auch den Grad des innerhalb einer Dienstklasse und zwischen verschiedenen Dienstklassen erzielbaren Multiplexgewinns. Außerdem zeigen die verwendeten Medienzugriffsmechanismen einen Einfluß auf die erzielbare Dienstgüte, der in Abschnitt 7.2 näher beschrieben wurde und der bei der Zusicherung der Dienstgüte beim Verbindungsaufbau berücksichtigt werden muß.

Die Ergebnisse der Untersuchungen in den Kapiteln 5 bis 7 sind auf ähnliche Problembereiche wie den HFC-, Funk- oder Satellitenzugang zu ATM-Netzen übertragbar, in denen TDMA-Medienzugriffsprotokolle eingesetzt werden, die ohne direkte Kommunikation zwischen den Zugangsstationen und mit einer langen Signallaufzeit zwischen der Kopfstation und den Zugangsstationen funktionieren müssen. Die Systemparameter in jenen Systemen unterscheiden sich zwar etwas von den in dieser Arbeit betrachteten, sie sollten jedoch durch die in Abschnitt 5.7 ausgeführten Parameterstudien abdeckbar sein.

Genauere analytische Untersuchungen des Systemverhaltens bei zyklischer Aktivitätsabfrage in der stationären Phase (Phase IV in Anhang A.4.4.4) oder für periodischen Verkehr könnten, ebenso wie die Berücksichtigung von Hintergrundverkehr in dieser Analyse, noch interessante Forschungsaspekte enthalten.

In fortgeschrittenen Systemkonzepten könnte zum Aufbau der ersten Verbindung an einer Zugangsstation ein wahlfreier Zugriff auf dafür vorgesehene Mini-Zeitschlitze eingesetzt werden. Nach dem Verbindungsaufbau würde einer Zugangsstation dann ein Mini-Zeitschlitz zur zyklischen Aktivitätsabfrage solange fest zugewiesen, bis die letzte Verbindung wieder abgebaut ist. Dadurch ließe sich die effektive Abfrageperiode der zyklischen Aktivitätsabfrage und damit die Durchlaufzeit weiter verringern.

Die Untersuchung von WFQ-Verfahren (*Weighted Fair Queueing*) zur dynamischen Priorisierung des Verkehrs mehrerer Dienstklassen in der Kopfstation und eventuell auch in den Zugangsstationen sollten im Zusammenhang mit den in dieser Arbeit untersuchten Medienzugriffsverfahren betrachtet werden.

Anhang A

Analysen

A.1 Zeitkontinuierliche Betrachtung eines N*D/C/1-Systems

Das periodische Bediensystem N*D/D/1 war in den letzten Jahren Gegenstand mehrerer Untersuchungen [46, 62, 148]. Roberts und Virtamo [131, 130] haben die Wartezeitverteilung mit dem Ansatz der virtuellen Wartezeit nach Beneš [21] (s. auch Abschn. 3.2.3) berechnet. Die Untersuchungen beziehen sich auf klassische zeitkontinuierliche Bediensysteme, in denen eine Anforderung, die ein leeres System antrifft, sofort zur Bedienung kommt.

Im Gegensatz zu dieser deterministischen (D-) Bedienung soll hier eine periodisch getaktete deterministische (C-) Bedienung (*clocked*)[1] in einem ansonsten zeitkontinuierlichen System untersucht werden. Dabei beginnt die Bedieneinheit nur dann mit einer Bedienung, wenn sich zu einem Bedientaktzeitpunkt eine Anforderung in der Warteschlange befindet. Eine neu eintreffende Anforderung, die ein leeres System antrifft, muß also bis zum nächsten Taktzeitpunkt warten, bis ihre Bedienung begonnen wird.

Der Unterschied im Systemzustand X zwischen der getakteten und der klassischen nicht getakteten Bedienung ist in Abb. A.1 veranschaulicht. Zu Wartesystemen, deren Bedieneinheit getaktet ist, deren Eingangsprozesse aber zeitkontinuierlich betrachtet werden, gibt es bisher relativ wenige Untersuchungen. Yang [153] hat Vergleiche zwischen den beiden Betriebsweisen für ein M/D/1-System mit verschiedenen Warteschlangendisziplinen angestellt und gezeigt, daß sich bei geringer Auslastung die Erwartungswerte der Wartezeit und

[1]vgl. die Fußnote auf S. 82

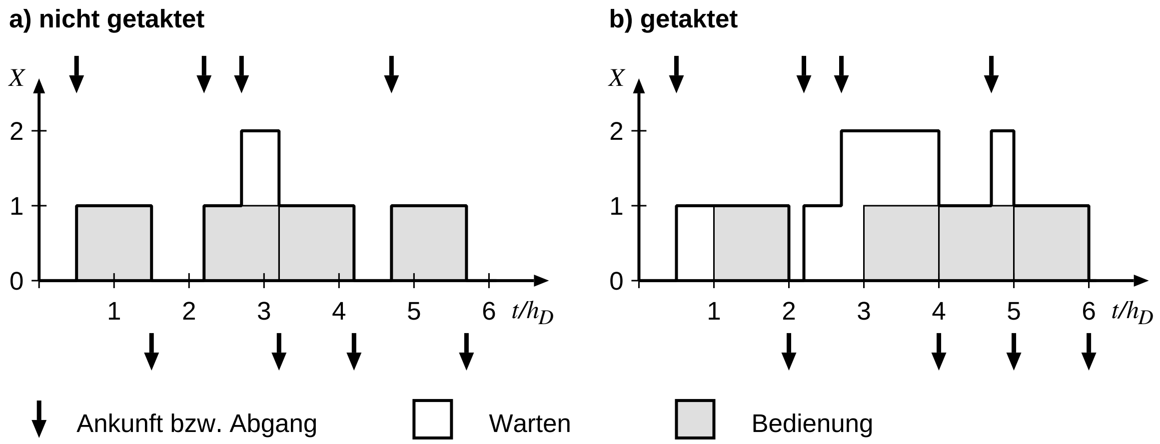


Abb. A.1: *Prozeß des Systemzustandes X bei deterministischer Bedienung: a) nicht getaktete, b) getaktete Bedienung.*

der Warteschlangenlänge, bei hoher Auslastung dagegen die entsprechenden Varianzen teilweise erheblich unterscheiden. Für Systeme mit periodischen Quellen (N*D/C/1) gibt es bisher nur Aussagen zur Verteilung der Dauer der Betriebs- und Leerlaufperioden und der Abstände von Ausgangsereignissen [119].

Die im folgenden dargestellte Analyse bestimmt in einem (N+1)*D/C/1-System mit getakteter Bedienung die Ensemble-Verteilung der Wartezeiten durch die Restarbeit in einem entsprechenden N*D/C/1-System.

A.1.1 Erweiterte Definition der Restarbeit

Die Restarbeit und damit die virtuelle Wartezeit muß hier gegenüber dem üblichen Ansatz für nicht getaktete Bedieneinheiten modifiziert werden. Üblicherweise ist die Restarbeit in einem leeren System gleich Null. Um ein getaktetes System zu analysieren, bietet es sich an, die Restarbeit im leeren System gleich der Vorwärts-Rekurrenzzeit bis zum nächsten Taktzeitpunkt zu definieren, so daß sich die in Abb. A.2 dargestellte Restarbeit ergibt.

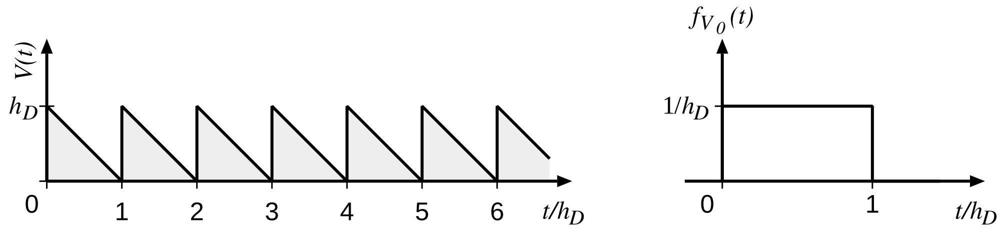


Abb. A.2: *Erweiterte Restarbeit im leeren System bei getakteter Bedienung.*

Die erweiterte Restarbeit im leeren System ist gleichverteilt zwischen 0 und h_D; damit ist ihre Verteilungsdichte und deren Laplace-Transformierte durch (3.12) beschrieben. Als Analogie kann man sich vorstellen, diese erweiterte Restarbeit sei durch eine Klasse von Anforderungen geringerer, aber nicht unterbrechbarer Priorität verursacht, die dieselbe Bedienzeit h_D erfahren und deren Quelle die Bedieneinheit nie leerlaufen läßt. Die erweiterte momentane Restarbeit $V(t)$ ist in Abb. A.3 für den Verlauf des Systemzustandes aus Abb. A.1 dargestellt. Die grau unterlegten Bereiche zeigen eine leere Bedieneinheit an.

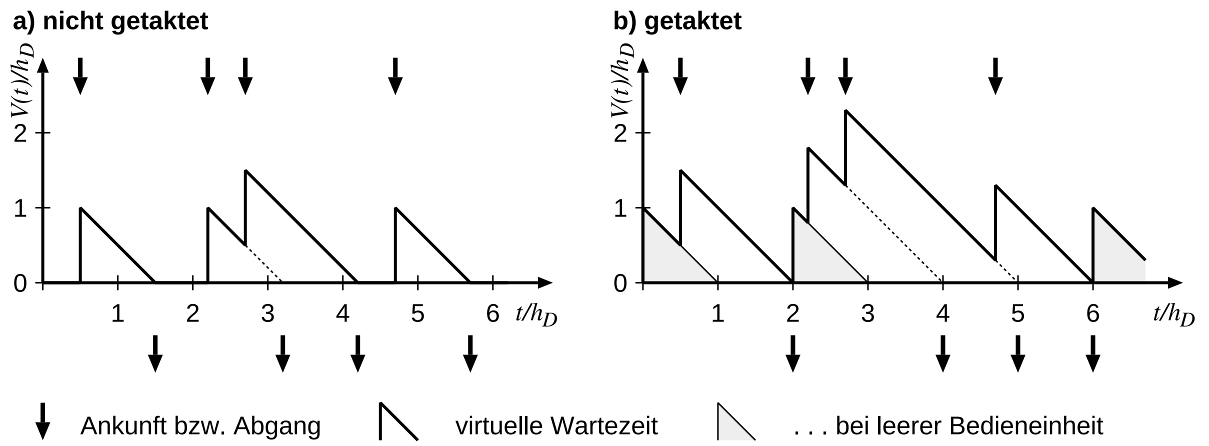


Abb. A.3: *Restarbeit bei deterministischer Bedienung: a) nicht getaktete, b) getaktete Bedienung.*

A.1.2 Restarbeit in einem 1*D/C/1-System

Die Wartezeitverteilung in einem 1*D/C/1-System ist, wie man leicht sehen kann, gleich der Verteilung der virtuellen Wartezeit im leeren System; sie ist damit durch $\Psi_D(s)$ nach (3.12) gegeben. Dabei ist die Wartezeit definiert als die Zeit vom Eintreffen der Anforderung bis zum *Beginn* ihrer Bedienung.

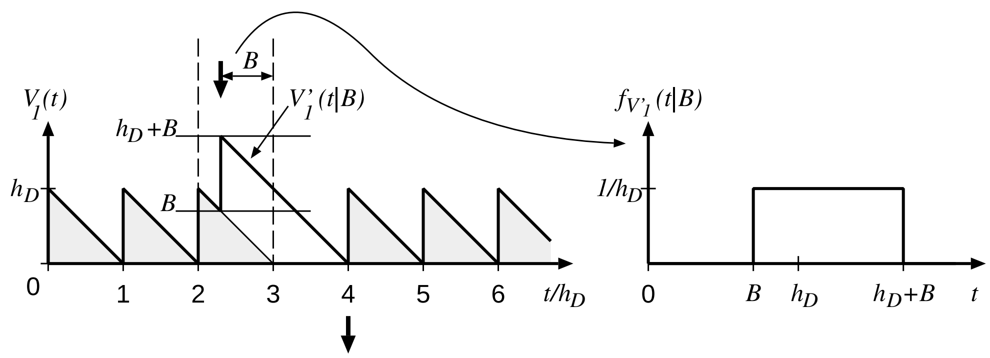


Abb. A.4: *Restarbeit und ihre Verteilung im Ankunftsintervall bei getakteter Bedienung.*

Eine Anforderung aus der Quelle vergrößert, wie in Abb. A.4 angedeutet, die Restarbeit im System vom Zeitpunkt ihrer Ankunft an bis zum nächsten Taktzeitpunkt um h_D. Wenn die

Restarbeit kurz vor der Ankunft den Betrag B hatte, dann ist sie in dem Bedienintervall, in dem die Ankunft eintrifft, nicht mehr zwischen 0 und h_D, sondern zwischen B und $h_D + B$ gleichverteilt. Da B zwischen 0 und h_D gleichverteilt und von $V_0(t)$ unabhängig ist, erhält man die Verteilungsdichte der Restarbeit im Ankunftsintervall, $f_{V_1'}(t)$, aus der Faltung der Gleichverteilung für B mit der Gleichverteilung für $V_0(t)$. In der Laplace-Transformation (LT) stellt sich diese Faltung als Multiplikation dar:

$$f_{V_1'}(t) \circ\!\!-\!\!\bullet\, \Phi_{V_1'}(s) = \Psi_D(s) \cdot \Psi_D(s) \tag{A.1}$$

Bei einer Quellenperiode von d ist somit der Anteil $\frac{d-h_D}{d}$ der Restarbeit unverändert gegenüber dem leeren System, und der Anteil $\frac{h_D}{d}$ wird durch (A.1) bestimmt. Damit ergibt sich die LT der VDF der Restarbeit im System 1*D/C/1:

$$\Phi_{V_1}(s) = \frac{d-h_D}{d}\Psi_D(s) + \frac{h_D}{d}\Psi_D^2(s) \tag{A.2}$$

Diese Restarbeit beschreibt wiederum die Ensemble-Verteilung der Wartezeit in einem System mit zwei Quellen (2*D/C/1).

A.1.3 Rekursionsformel für $\Phi_{V_k}(s)$

Die Rekursionsformel

$$\Phi_{V_k}(s) = \left(k \cdot \frac{h_D}{d}\Phi_{V_{k-1}}(s) + \frac{d-kh_D}{d}\right) \cdot \Psi_D(s) \quad , \quad k = 1, 2, \ldots \tag{A.3}$$

gibt die LST der Verteilungsfunktion der Restarbeit im System k*D/C/1 in Abhängigkeit der entsprechenden Funktion für das System $(k-1)$*D/C/1 an. Zusammen mit der bekannten Funktion für das leere System

$$\Phi_{V_0}(s) = \Psi_D(s) = \frac{1}{h_D s}\left(1 - \mathrm{e}^{-h_D s}\right) \tag{A.4}$$

ist so die Verteilung der Restarbeit in jedem System N*D/C/1 bestimmt.

Begründung

Ein k*D/C/1-System zeigt in $d/h_D - k$ Bedienintervallen die gleiche Verteilung der Restarbeit wie das leere System. In den restlichen k Bedienintervallen treffen die ankommenden Anforderungen die Restarbeit eines Systems $(k-1)$*D/C/1 an und vergrößern diese (gleichverteilt) um 0 bis h_D, was zu dem Produkt von $\Phi_{V_{k-1}}(s)$ und $\Psi_D(s)$ führt. Ein formaler Beweis für $k > 3$ steht noch aus; die Ergebnisse der Analyse unterscheiden sich allerdings auch für größere k nicht von entsprechenden Simulationsergebnissen.

A.1.4 Geschlossene Darstellung von $\Phi_{V_k}(s)$

Aus der Rekursionsformel kann die folgende geschlossene Darstellung abgeleitet werden:

$$\Phi_{V_k}(s) = \frac{k!}{d^{k+1}}\Psi_D(s) \cdot \sum_{j=0}^{k} \frac{h_D^{k-j}}{j!}\Psi_D^{k-j}(s) d^j (d - jh_D) \quad , \quad k = 0, 1, 2, \ldots \tag{A.5}$$

Dabei ist h_D die Dauer einer Bedienung und d die Periode der Quellen. $\Psi_D(s)$ ist die LT der VDF einer kontinuierlichen Gleichverteilung zwischen 0 und h_D nach (3.12).

<u>Beweis</u>
Der Beweis erfolgt durch Einsetzen: Wie die folgende Berechnung der rechten Seite von (A.3) zeigt, erfüllt (A.5) die Rekursionsformel.

$$\begin{aligned}
\left(\frac{kh_D}{d}\Phi_{V_{k-1}}(s) + \frac{d-kh_D}{d}\right)\Psi_D(s) &= \left(\frac{kh_D}{d}\frac{(k-1)!}{d^k}\sum_{j=0}^{k-1}\frac{h_D^{k-1-j}}{j!}\Psi_D^{k-j}(s)d^j(d-jh_D) + \frac{d-kh_D}{d}\right)\Psi_D(s) \\
&= \frac{k!}{d^{k+1}}\Psi_D(s)\sum_{j=0}^{k-1}\frac{h_D^{k-j}}{j!}\Psi_D^{k-j}d^j(d-jh_D) + \frac{d-kh_D}{d}\Psi_D(s) \\
&= \frac{k!}{d^{k+1}}\Psi_D(s)\sum_{j=0}^{k}\frac{h_D^{k-j}}{j!}\Psi_D^{k-j}d^j(d-jh_D)
\end{aligned}$$

Außerdem ist die Anfangsbedingung erfüllt:

$$\Phi_{V_0}(s) \;=\; \frac{1}{d}\Psi_D(s)\frac{h_D^0}{0!}\Psi_D^0(s)d^0(d-0) = \Psi_D(s)$$

A.1.5 Verteilungsdichte der virtuellen Wartezeit

Die Verteilungsdichtefunktionen werden durch Laplace-Rücktransformation der entsprechenden $\Phi_{V_k}(s)$ gewonnen. Diese Rücktransformation kann bei der hier vorliegenden Struktur von $\Phi_{V_k}(s)$ durch Rücktransformation der einzelnen Summanden erfolgen. Die Summanden bestehen aus Potenzen von $\Psi_D(s)$, deren Rücktransformation hier zunächst einzeln angegeben werden soll.

Die Potenzen von $\Psi_D(s)$ lassen sich nach dem Binomischen Satz als Summen darstellen und können dann nach der aus Tabellenwerken [6, 150] bekannten Transformationsformel

$$\frac{1}{s^\mu}\mathrm{e}^{-as} \bullet\!\!-\!\!\circ \frac{(t-a)^{\mu-1}}{\Gamma(\mu)}\sigma(t-a) \quad , \quad \mu > 0 \tag{A.6}$$

mit

$$\Gamma(\mu) = (\mu-1)! \quad , \quad \mu = 1, 2, \ldots \tag{A.7}$$

und der Sprungfunktion $\sigma(t)$ aus Abschnitt 3.2.1 in Verteilungsdichtefunktionen zurücktransformiert werden:

$$\begin{aligned}
\Psi_D^\mu(s) &= \frac{1}{(h_D s)^\mu}\left(1-\mathrm{e}^{-h_D s}\right)^\mu \\
&= \frac{1}{(h_D s)^\mu}\sum_{b=0}^{\mu}\binom{\mu}{b}(-1)^b \mathrm{e}^{-b h_D s} \\
\Psi_D^\mu(s) &\bullet\!\!-\!\!\circ\ \frac{1}{h_D^\mu(\mu-1)!}\sum_{b=0}^{\mu}(-1)^b\binom{\mu}{b}(t-bh_D)^{\mu-1}\sigma(t-bh_D)
\end{aligned} \tag{A.8}$$

Für die Rücktransformation eignet sich eine alternative Darstellung von (A.5) besser:

$$\Phi_{V_k}(s) = \sum_{j=0}^{k}\frac{h_D^j k!}{d^{j+1}(k-j)!}\Psi_D^{j+1}(s)(d-(k-j)h_D) \tag{A.9}$$

Zusammen mit (A.8) erhält man daraus:

$$f_{V_k}(t) = \frac{1}{h_D}\sum_{j=0}^{k}\binom{k}{j}\frac{d-(k-j)h_D}{d^{j+1}}\sum_{b=0}^{j+1}(-1)^b\binom{j+1}{b}(t-bh_D)^j\sigma(t-bh_D) \quad , \quad k=0,1,2,\ldots \tag{A.10}$$

A.1.6 Erwartungswert und Varianz der virtuellen Wartezeit

Erwartungswert und Varianz der virtuellen Wartezeit können aus der LT ihrer VDF mit den bekannten Formeln

$$\mathrm{E}[V] = -\lim_{s\to 0}\frac{d}{ds}\Phi_V(s) \tag{A.11}$$

und

$$\mathrm{VAR}[V] = \lim_{s\to 0}\frac{d^2}{ds^2}\Phi_V(s) - (\mathrm{E}[V])^2 \tag{A.12}$$

gewonnen werden. Zunächst sind Erwartungswert und zweites Moment der gleichverteilten ZV V_0 zu bestimmen.

$$\begin{aligned}
\frac{d}{ds}\Psi_D(s) &= -\frac{1-\mathrm{e}^{-h_D s}-h_D s\mathrm{e}^{-h_D s}}{h_D s^2} \\
\mathrm{E}[V_0] &= \frac{h_D}{2} && \text{(A.13)} \\
\frac{d^2}{ds^2}\Psi_D(s) &= \frac{2-2h_D s\mathrm{e}^{-h_D s}-2\mathrm{e}^{-h_D s}-(h_D s)^2\mathrm{e}^{-h_D s}}{h_D s^3} \\
\mathrm{E}\left[V_0^2\right] &= \lim_{s\to 0}\frac{d^2}{ds^2}\Psi_D(s) \\
&= \lim_{s\to 0}\frac{-2h_D(-h_D s\mathrm{e}^{-h_D s}+\mathrm{e}^{-h_D s})+2h_D\mathrm{e}^{-h_D s}-h_D^2(-h_D s^2\mathrm{e}^{-h_D s}+2s\mathrm{e}^{-h_D s})}{3h_D s^2} \\
\mathrm{E}\left[V_0^2\right] &= \lim_{s\to 0}\frac{h_D^3 s^2\mathrm{e}^{-h_D s}}{3h_D s^2} = \frac{h_D^2}{3} && \text{(A.14)}
\end{aligned}$$

Für die Potenzen von $\Psi_D(s)$, die in (A.9) vorkommen, findet man entsprechend:

$$\frac{d}{ds}\Psi_D^\mu(s) = \mu\Psi_D^{\mu-1}(s)\frac{d}{ds}\Psi_D(s) \tag{A.15}$$

$$-\lim_{s\to 0}\frac{d}{ds}\Psi_D^\mu(s) = \frac{\mu h_D}{2} \tag{A.16}$$

$$\frac{d^2}{ds^2}\Psi_D^\mu(s) = \mu\Psi_D^{\mu-1}(s)\frac{d^2}{ds^2}\Psi_D(s) + \mu(\mu-1)\Psi_D^{\mu-2}(s)\left(\frac{d}{ds}\Psi_D(s)\right)^2 \tag{A.17}$$

$$\lim_{s\to 0}\frac{d^2}{ds^2}\Psi_D^\mu(s) = \frac{\mu h_D^2}{4}\left(\frac{1}{3}+\mu\right) \tag{A.18}$$

Mit Hilfe dieser Beziehungen kann nun zunächst der Erwartungswert der virtuellen Wartezeit aus (A.9) berechnet werden:

$$\begin{aligned}
\mathrm{E}\left[V_k\right] &= -\lim_{s\to 0}\frac{d}{ds}\Phi_{V_k}(s) \\
&= -\lim_{s\to 0}\sum_{j=0}^{k}\frac{h_D^j k!}{d^{j+1}(k-j)!}(d-(k-j)h_D)\frac{d}{ds}\Psi_D^{j+1}(s) \\
&= \sum_{j=0}^{k}\frac{h_D^j k!}{d^{j+1}(k-j)!}(d-(k-j)h_D)\frac{h_D}{2}(j+1) \\
&= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j\frac{(d-(k-j)h_D)(j+1)}{d} \\
&= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j\left(1+j-\frac{(k-j)h_D(j+1)}{d}\right) \\
&= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j \\
&\quad +\frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}j\cdot\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j - \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^{j+1}(j+1)(k-j) \\
&= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j \\
&\quad +\frac{h_D}{2}\sum_{j=1}^{k}j\cdot\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j - \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k-1}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^{j+1}(j+1)(k-j) \\
&= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j \\
&\quad +\frac{h_D}{2}\sum_{j=1}^{k}j\cdot\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j - \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k-1}\frac{k!}{(k-(j+1))!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^{j+1}(j+1) \\
\mathrm{E}\left[V_k\right] &= \frac{h_D}{2}\sum_{j=0}^{k}\frac{k!}{(k-j)!}\left(\frac{h_D}{d}\right)^j
\end{aligned} \tag{A.19}$$

Entsprechend findet man für das zweite Moment der virtuellen Wartezeit:

$$\mathrm{E}\left[V_k^2\right] = \lim_{s\to 0}\frac{d^2}{ds^2}\Phi_{V_k}(s)$$

$$= \sum_{j=0}^{k} \frac{k!}{(k-j)!} \left(\frac{h_D}{d}\right)^j \frac{d-(k-j)h_D}{d} \lim_{s\to 0} \frac{d^2}{ds^2} \Psi_D^{j+1}(s)$$

$$\mathrm{E}\left[V_k^2\right] = \frac{h_D^2}{4} \sum_{j=0}^{k} \frac{k!}{(k-j)!} \left(\frac{h_D}{d}\right)^j \frac{d-(k-j)h_D}{d} (j+1)(j+\frac{4}{3}) \quad \text{(A.20)}$$

Die Varianz der virtuellen Wartezeit ergibt sich aus (A.20) und (A.19):

$$\mathrm{VAR}\left[V_k\right] = \mathrm{E}\left[V_k^2\right] - \left(\mathrm{E}\left[V_k\right]\right)^2 \quad \text{(A.21)}$$

A.1.7 Quantile der virtuellen Wartezeit

Das Maximum von V_k liegt immer bei $(k+1)h_D$. Im Abschnitt zwischen kh_D und $(k+1)h_D$ besteht die VDF von V_k nur noch aus dem Beitrag von $\Psi_D^{k+1}(s)$:

$$f_{V_k} = \frac{1}{h_D} \left(\frac{(k+1)h_D - t}{d}\right)^k \quad \text{für } t \in ((kh_D, (k+1)h_D] \quad \text{(A.22)}$$

Die entsprechende komplementäre Verteilungsfunktion in diesem Bereich ist

$$F_{V_k}^C(t) = \int_t^{(k+1)h_D} f_{V_k}(\tilde{t}) d\tilde{t} = \frac{1}{k+1} \frac{d}{h_D} \left(\frac{(k+1)h_D - t}{d}\right)^{k+1} \quad \text{für } t \in ((kh_D, (k+1)h_D] \quad \text{(A.23)}$$

In der Umkehrung erhält man für $t \in ((kh_D, (k+1)h_D]$:

$$t_q = (k+1)h_D - d \cdot \sqrt[k+1]{\frac{(k+1)h_D}{d} f_{V_k}^C(t_q)} \quad \text{(A.24)}$$

Da die Wartezeit in einem $(k+1)$*D/C/1-System verteilt ist wie die virtuelle Wartezeit im k*D/C/1-System, erhält man für die Wartezeit W_n in einem n*D/C/1-System die folgende inverse komplementäre Randverteilung:

$$t_q = nh_D - d \cdot \sqrt[n]{\frac{nh_D}{d} f_{W_n}^C(t_q)} \quad \text{für } t_q \in ((n-1)h_D, nh_D] \quad \text{(A.25)}$$

A.2 Das System 1*D/C/1 mit getaktetem (C) Tor

Es wird eine einzelne periodische Quelle mit Periode t_Q betrachtet, deren Anforderungen in einer Warteschlange WS_1 zwischengespeichert werden, bis diese Warteschlange durch ein Tor S_1 periodisch (mit Periode t_B) vollständig geleert wird. Dabei werden die Anforderungen

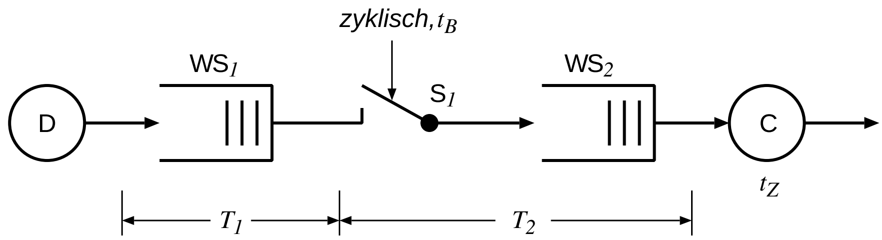


Abb. A.5: *Systemmodell 1*D/C/1 mit C-Tor.*

unter Beibehaltung der Reihenfolge in die zweite Warteschlange WS$_2$ weitergeleitet, aus der sie von einer zyklisch arbeitenden Bedieneinheit C mit Bediendauer t_Z entnommen werden.

Abb. A.5 illustriert das betrachtete System. Die Zufallsvariable T_1 beschreibe die Aufenthaltsdauer der Anforderungen in WS$_1$ und T_2 die in WS$_2$. Das Ensemble der T_1 unter allen Phasenbeziehungen zwischen Quelle und System hat die Verteilung

$$f_{T_1}(t) = \frac{1}{t_B}\mathbf{1}\{t \in (0, t_B]\} \tag{A.26}$$

Wäre die Bedieneinheit unendlich schnell ($t_Z \to 0$), dann wäre die Verteilung von T_1 die Verteilung der Durchlaufzeit der Anforderungen durch das betrachtete System. Da aber jede Anforderung in dem durch S$_1$ weitergereichten Stapel die Bedienung der Vorgänger abwarten muß, ergeben sich die in Abb. A.6 skizzierten Verhältnisse. Dabei wird angenommen, daß die Bedieneinheit auf den Tor-Prozeß synchronisiert sei.

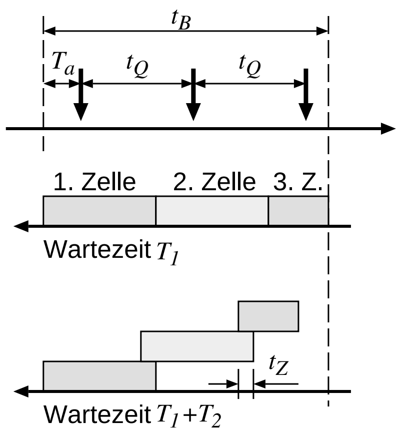


Abb. A.6: *Beiträge zur Ensemble-Wartezeitverteilung.*

Die Wartezeit $T_1^{(1)}$ der ersten Zelle im Stapel liegt im Intervall $(t_B - t_Q, t_B]$. Die zweite Zelle erfährt $T_1^{(2)} \in (t_B - 2t_Q, t_B - t_Q]$ u.s.w. . Wenn nun die Summe $T_1 + T_2$ betrachtet wird, dann erfährt die erste Zelle eine Wartezeit $T_2 = 0$. Die k-te Zelle im Stapel erfährt hier eine Wartezeit $T_2^{(k)} = (k-1)t_Z$. Die entsprechenden Beiträge der Summe $T_1 + T_2$ zur Ensemble-

Wartezeitverteilung sind in Abb. A.6 unten skizziert. Für die Ensemble-Wartezeitverteilung erhält man

$$f_{T_D}(t) = \frac{1}{t_B}\mathbf{1}\{t \in (\kappa_B t_Z, t_B]\} \cdot \left(1 + \left\lfloor \frac{t_B - t}{t_Q - t_Z} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{t_B - t - t_Z}{t_Q - t_Z} \right\rfloor \right) - \mathbf{1}\{t \in (t_B - t_Z, t_B]\} \tag{A.27}$$

mit

$$\kappa_B = \left\lfloor \frac{t_B}{t_Q} \right\rfloor \quad . \tag{A.28}$$

Die Differenz der Klammerfunktionen in (A.27) ist eine geschlossene Darstellung für den periodischen Anteil in $f_{T_D}(t)$. Es gilt

$$\sum_{a=-\infty}^{+\infty} \mathbf{1}\{t \in [at_a, at_a + t_Z)\} = \left\lfloor \frac{t}{t_a} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{t - t_Z}{t_a} \right\rfloor \quad . \tag{A.29}$$

Der Ausgleichsterm $-\mathbf{1}\{t \in (t_B - t_Z, t_B]\}$ in (A.27) kann entfallen, wenn anstelle der Klammerfunktion die in der Programmierung oft anzutreffende Ganzzahlfunktion `int(x)` eingesetzt wird, die im Gegensatz zu $\lfloor x \rfloor$ symmetrisch um $x = 0$ ist.

Um die in (A.27) definierte Verteilungsdichtefunktion zur Verwendung an anderer Stelle zur Verfügung zu stellen, wird die Abkürzung $\Xi(t, t_Q, t_B)$ definiert:

$$\begin{aligned} \Xi(t, t_Q, t_B) \quad = \quad & \frac{1}{t_B}\mathbf{1}\{t \in (\left\lfloor \frac{t_B}{t_Q} \right\rfloor t_Z, t_B]\} \cdot \\ & \left(1 + \left\lfloor \frac{t_B - t}{t_Q - t_Z} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{t_B - t - t_Z}{t_Q - t_Z} \right\rfloor - \mathbf{1}\{t \in (t_B - t_Z, t_B]\} \right) \end{aligned} \tag{A.30}$$

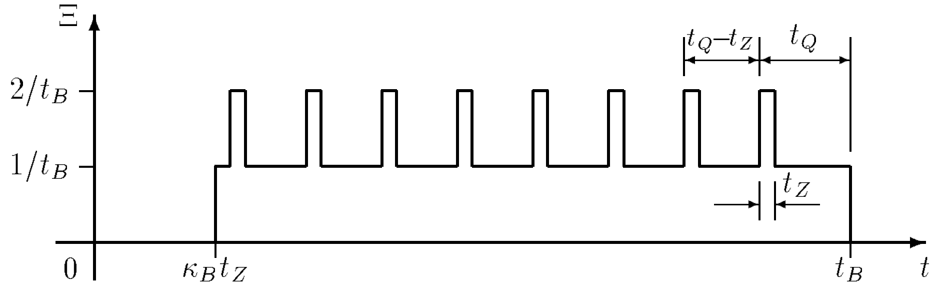


Abb. A.7: *Verlauf der Verteilungsdichtefunktion $\Xi(t, t_Q, t_B)$ nach (A.30).*

Der prinzipielle Verlauf von $\Xi(t, t_Q, t_B)$ ist in Abb. A.7 dargestellt. Die in Abb. A.6 unten skizzierte Überlappung der einzelnen Beiträge zur Ensemble-Verteilungsdichte äußert sich in mit der Periode $t_Q - t_Z$ auftretenden Spitzen. Die maximale Wartezeit ist t_B, das Maximum von T_1. Sie kann sich nur auf die erste Anforderung im Stapel beziehen, so daß hierfür $T_2 = 0$

ist. Die minimale Wartezeit tritt auf, wenn eine Anforderung direkt vor dem Schließen des Tores S_1 in Abb. A.5 in der Warteschlange WS_1 eintrifft. Ihre Wartezeit in WS_1 ist dann $T_1 = 0$. In WS_2 muß die Bedienung aller Vorgänger im Stapel abgewartet werden, was zu $T_2 = \kappa_B t_Z$ führt.

A.3 Der Erwartungswert von $\lfloor X \rfloor$

Gesucht ist der Erwartungswert der Klammerfunktion $\lfloor X \rfloor$ einer auf dem Intervall $(a, b]$ mit reellem a und b gleichverteilten kontinuierlichen Zufallsvariable X. Wegen der Linearität des Erwartungswert-Operators kann die Berechnung auf drei getrennten Intervallen erfolgen.

Das erste Intervall I_1 erstreckt sich von a bis zur nächstgrößeren ganzen Zahl. Auch wenn a bereits ganzzahlig ist, soll I_1 bis $a+1$ reichen. Das zweite Intervall hat ganzzahlige Grenzen, wenn es bis $\lfloor b \rfloor$ reicht. Das Intervall I_3 schließt den Bereich von $\lfloor b \rfloor$ bis zum eventuell nicht ganzzahligen b ein und hat die Länge 0, falls b ganzzahlig ist.

$$I_1 = (a, \lfloor a \rfloor + 1] \tag{A.31}$$
$$I_2 = (\lfloor a \rfloor + 1, \lfloor b \rfloor] \tag{A.32}$$
$$I_3 = (\lfloor b \rfloor, b] \tag{A.33}$$

Der Erwartungswert $\mathrm{E}[\lfloor X \rfloor]$ läßt sich nun nach dem Gesetz der totalen Wahrscheinlichkeit aus den drei bedingten Erwartungswerten berechnen:

$$\begin{aligned} \mathrm{E}[\lfloor X \rfloor] = \; & \mathrm{E}[\lfloor X \rfloor | X \in I_1] \cdot \mathrm{P}\{X \in I_1\} \\ & + \mathrm{E}[\lfloor X \rfloor | X \in I_2] \cdot \mathrm{P}\{X \in I_2\} \\ & + \mathrm{E}[\lfloor X \rfloor | X \in I_3] \cdot \mathrm{P}\{X \in I_3\} \end{aligned} \tag{A.34}$$

Die Wahrscheinlichkeit $\mathrm{P}\{X \in I_i\}$ ist jeweils gleich dem Quotienten aus der Länge des Intervalles I_i und $b-a$. In I_1 und I_3 ist $\lfloor X \rfloor$ jeweils konstant, so daß die entsprechenden bedingten Erwartungswerte $\lfloor a \rfloor$ und $\lfloor b \rfloor$ sind. Der bedingte Erwartungswert im Intervall I_2 läßt sich leicht aus der bekannten Summe aufeinanderfolgender ganzer Zahlen berechnen:

$$\mathrm{E}[\lfloor X \rfloor | X \in I_2] = \frac{\lfloor b \rfloor + \lfloor a \rfloor}{2} \tag{A.35}$$

Durch Einsetzen in (A.34) erhält man nach kleineren Umformungen schließlich das Ergebnis (A.36).

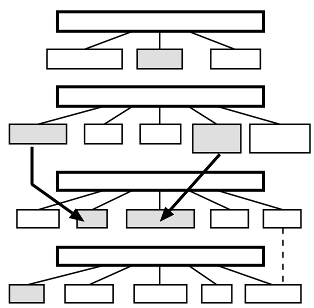
$$\begin{aligned}
\mathrm{E}[\lfloor X \rfloor] &= \frac{\lfloor a \rfloor + 1 - a}{b-a} \cdot \lfloor a \rfloor \\
&\quad + \frac{\lfloor b \rfloor - \lfloor a \rfloor - 1}{b-a} \cdot \frac{\lfloor b \rfloor + \lfloor a \rfloor}{2} \\
&\quad + \frac{b - \lfloor b \rfloor}{b-a} \cdot \lfloor b \rfloor \\
&= \ldots \\
\mathrm{E}[\lfloor X \rfloor] &= \frac{1}{2(b-a)} \Big[\lfloor b \rfloor \cdot (2b - \lfloor b \rfloor - 1) - \lfloor a \rfloor \cdot (2a - \lfloor a \rfloor - 1) \Big] \qquad \text{(A.36)}
\end{aligned}$$

Obwohl in der Herleitung vorausgesetzt wurde, daß zwischen den Verteilungsgrenzen a und b mindestens eine ganze Zahl liegt ($\lfloor a \rfloor \neq \lfloor b \rfloor$), gilt (A.36) auch, wenn $\lfloor a \rfloor = \lfloor b \rfloor$ ist. In diesem Fall ist $\mathrm{E}[\lfloor X \rfloor] = \lfloor a \rfloor$, was auch in (A.36) leicht nachzuprüfen ist.

A.4 Aktivitätsabfrage

A.4.1 Randbedingungen und Quellmodell

Abb. A.8 stellt die bei der Aktivitätsabfrage eingesetzten Mechanismen anhand der Übersicht aus Abb. 4.1 zusammen (vgl. Abschn. 5.5).



Datenübertragung:
nach Reservierung
Übertragung von Reservierungen:
periodisch + an ATM-Zellen gekoppelt
Inhalt der Bedarfsangaben:
Aktivität (Warteschlangenlänge>0) + neue Ankünfte (WSL)
Formung des Verkehrsprofiles:
keine

Abb. A.8: *Eingesetzte Mechanismen.*

Zugangsstationen melden die Ankunft von ATM-Zellen der Rückrichtung über zyklische Aktivitätsabfrage (binäre Information, ob die Warteschlangenlänge größer als Null ist) und über an ATM-Zellen der Rückrichtung gekoppelte Bedarfsangaben. Die Aktivitätsabfrage erfolgt zyklisch mit der Periode t_P. Da in einem AA-Zeitschlitz m Zugangsstationen ihre Aktivität angeben können, ist die effektive Aktivitätsabfrageperiode

$$t_{PE} = \left\lceil \frac{n_0}{m} \right\rceil t_P \quad , \qquad \text{(A.37)}$$

wenn insgesamt n_0 Zugangsstationen vorhanden sind.

Im Gegensatz zur Aktivitätsangabe, in der eine Zugangsstation nur die Information übermitteln kann, daß ihre Warteschlangenlänge positiv ist, kann über die an ATM-Zellen gekoppelten Bedarfsangaben die exakte Warteschlangenlänge an die Kopfstation gemeldet werden, die dort in die Anzahl neuer Ankünfte umgerechnet wird.

Das System wird hier im Leerlauf betrachtet, d. h. außer einer speziell betrachteten Zugangsstation soll keine andere ATM-Zellen zu übertragen haben. Dadurch ist die zentrale Warteschlange für Sendeberechtigungen in der Kopfstation immer leer, wenn eine Aktivitäts- oder Bedarfsangabe von der betrachteten Zugangsstation eintrifft. Die Verkehrsquelle an der betrachteten Zugangsstation erzeuge büschelförmigen „On-Off"-Verkehr. Die Anzahl der äquidistanten Zellen (Abstand t_Q) in einem Büschel sei durch die Zufallsvariable C_B gegeben. Diese Büschelgröße C_B folge einem Erneuerungsprozeß, so daß die Größe eines betrachteten Büschels unabhängig ist von den Größen aller vorhergegangenen Büschel.

Damit für die Analyse definierte Zustände vorliegen, sollen noch zwei Einschränkungen hinsichtlich der Quellenparameter gemacht werden:

- Der Medienzugriff soll im „On"-Zustand der Quelle den stationären Zustand erreichen können, in dem alle neu ankommenden ATM-Zellen über Bedarfsangaben gemeldet werden, die an zuvor angekommene Zellen gekoppelt werden. Dazu muß $t_Q < 2\tau$ sein, s. Gl. (4.1).
- Der Abstand einer „On"-Phase der Quelle von ihrer vorhergegangenen „On"-Phase soll mindestens so groß sein, daß die erste Zelle eines Büschels jeweils über eine Aktivitätsangabe gemeldet wird. Dies ist in jedem Fall sichergestellt, wenn der Abstand der Zellbüschel größer als zwei Rundlaufzeiten (4τ) ist.

Abb. A.9 zeigt schematisch das erzeugte Verkehrsmuster der Referenzquelle.

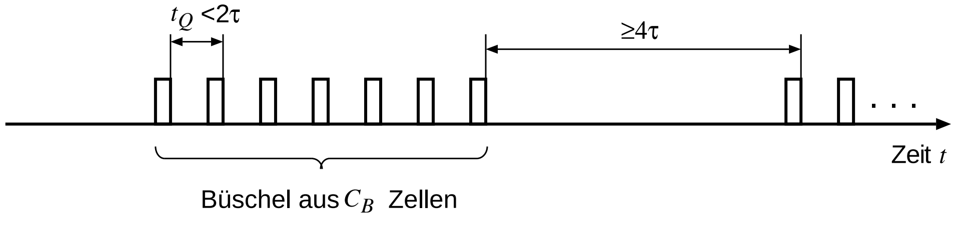


Abb. A.9: *Zeitliches Verhalten der Referenzquelle.*

A.4.2 Phasen des Einschwingvorgangs beim Medienzugriff

Die Analyse betrachtet zunächst ein Büschel von C_B Zellen im ansonsten leeren System. Abb. A.10 illustriert beispielhaft den Einschwingvorgang beim Medienzugriff unter diesen Randbedingungen.

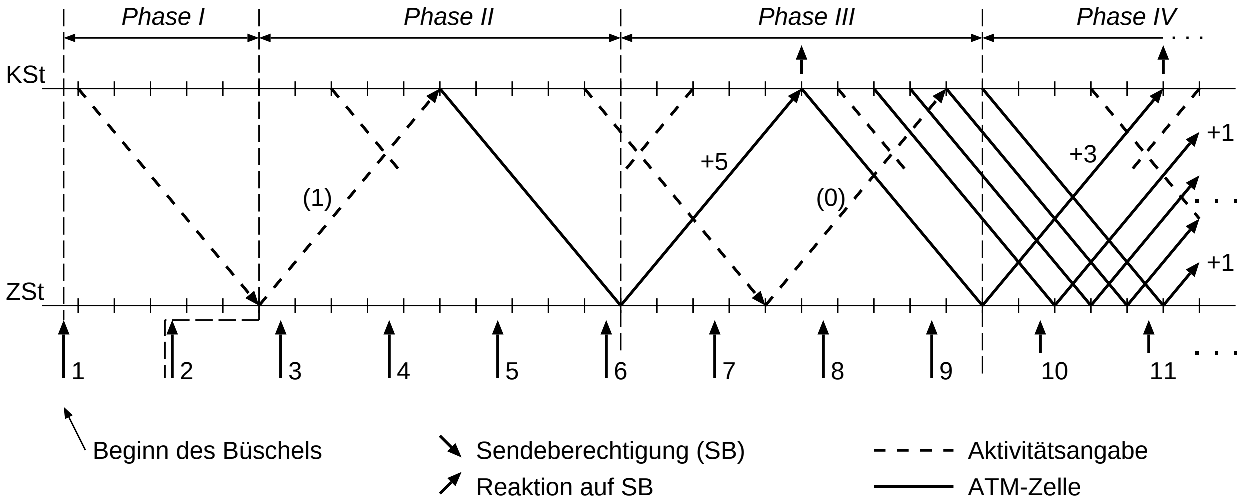


Abb. A.10: *Einschwingvorgang beim Medienzugriff. Parameter:* $t_P = 7t_Z$, $t_{PE} = 14t_Z$, $t_Q = 3t_Z$, $2\tau = 10t_Z$.

Dieser Einschwingvorgang läßt sich in vier Phasen unterteilen: In **Phase I** kommt die erste Zelle des Büschels an. Die Ankunft kann mit der ersten darauf folgenden Aktivitätsangabe gemeldet werden, was in Abb. A.10 mit „(1)“ an der Aktivitätsangabe markiert ist. Die folgenden Zellen (Nr. 2–6) des Büschels können erst zusammen mit dem Transport der ersten Zelle zur Kopfstation gemeldet werden, also erst, wenn eine Sendeberechtigung für die erste Zelle an der Zugangsstation ankommt. In Abb. A.10 ist das Melden dieser fünf Zellen mit der Bemerkung „+5“ bei der Übertragung der ersten ATM-Zelle in der Rückrichtung angedeutet. Dieser Abschnitt des Einschwingvorgangs soll als **Phase II** bezeichnet werden. Dabei werden alle Zellen, deren Ankunft am Ende von Phase II gemeldet wird, dieser Phase zugerechnet, also auch die Zelle Nr. 2, die in Abb. A.10 ankommt, bevor die erste Möglichkeit zur Aktivitätsangabe besteht.

Phase III beginnt mit der Übertragung der ersten Zelle zur Kopfstation. Alle nun ankommenden Zellen (im Bild die Nummern 7–9) können erst gemeldet werden, wenn die erste Sendeberechtigung für eine Zelle aus Phase II an der Zugangsstation eintrifft. Danach – bis zum Ende des Zellbüschels – folgen die Sendeberechtigungen und damit die Gelegenheiten, neu angekommene Zellen zu melden, häufiger, was als **Phase IV** bezeichnet werden soll.

Kurz zusammengefaßt bedeutet das: In Phase I wartet die erste Zelle des Büschels auf eine Sendeberechtigung zur Aktivitätsabfrage. In Phase II warten die weiteren währenddessen ankommenden Zellen, bis die Sendeberechtigung für die erste Zelle eintrifft, so daß auch ihre Ankunft gemeldet werden kann. In Phase III wird auf die zweite Sendeberechtigung gewartet, nach der dann in Phase IV die Sendeberechtigungen und damit die Gelegenheiten zur Meldung neu angekommener Zellen häufiger eintreffen.

A.4.3 Zufallsvariablen

Zur Analyse der Durchlaufzeitverteilung wird nun zunächst für konstante Büschelgröße C_B die Durchlaufzeitverteilung für die einzelnen Phasen ermittelt und anschließend daraus die Durchlaufzeitverteilung des Ensembles aller Zellen im Büschel berechnet. Dazu sollen die folgenden Zufallsvariablen und Verteilungsdichtefunktionen verwendet werden:

T_{RW}	Zufallsvariable für die Wartezeit einer Zelle von ihrer Ankunft an der Zugangsstation bis zum Absenden ihrer Meldung an die Kopfstation
T_{PW}	Zufallsvariable für die Wartezeit einer Sendeberechtigung in der zentralen SB-Warteschlange der Kopfstation
T_W	ZV für die Summe aus T_{RW} und T_{PW} für dieselbe Zelle
f_{RW}	Verteilungsdichtefunktion für T_{RW}
f_W	Verteilungsdichtefunktion für T_W

Um Indizes zu sparen, werden die Verteilungsdichtefunktionen für T_{RW} und T_W nicht nach der in Abschnitt 3.2.1 eingeführten Notation, sondern mit $f_{RW}(t)$ und $f_W(t)$ bezeichnet.

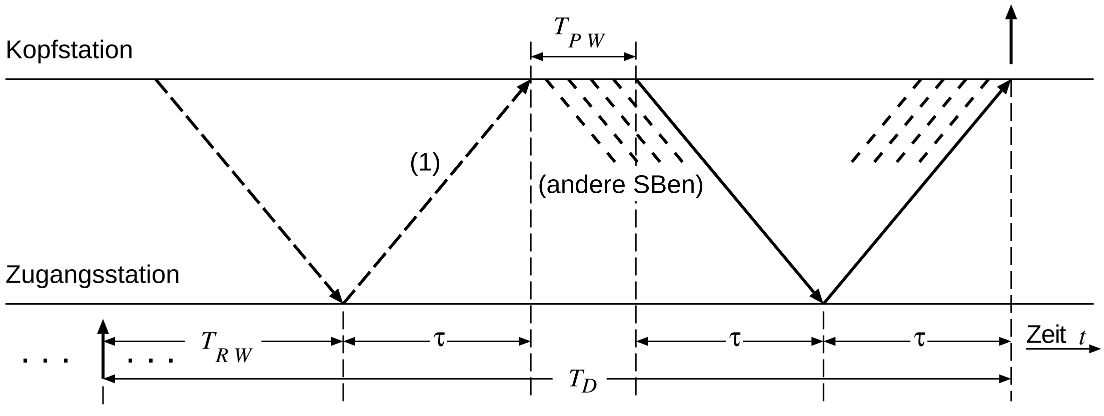


Abb. A.11: *Definition der Zufallsvariablen T_{RW} und T_{PW}.*

Die Zufallsvariable T_{RW} bezeichnet die Wartezeit zwischen der Ankunft einer Zelle an der Zugangsstation und dem Absenden der entsprechenden Bedarfsangabe an die Kopfstation.

Wie Abb. A.11 zeigt, schließt sich an diese Wartezeit eine einfache Laufzeit der Bedarfsangabe an. Wenn diese die Kopfstation erreicht, wird dort eine entsprechende Sendeberechtigung erzeugt und in die zentrale Warteschlange eingereiht. Dort wartet die Sendeberechtigung für die betrachtete Zelle während der Dauer T_{PW}. Die anschließende Laufzeit der Sendeberechtigung zur Zugangsstation und die der ATM-Zelle zur Kopfstation dauert jeweils die feste Zeit τ. Damit setzt sich die Durchlaufzeit T_D nach (A.38) zusammen:

$$T_D = T_{RW} + T_{PW} + 3\tau \tag{A.38}$$

Im folgenden soll nur noch der variable Anteil T_W der Durchlaufzeit interessieren. Er wird als Gesamtwartezeit bezeichnet und nach (A.39) berechnet.

$$T_W = T_{RW} + T_{PW} = T_D - 3\tau \tag{A.39}$$

Um die individuellen Gesamtwartezeiten der ATM-Zellen an bestimmten Positionen innerhalb des Büschels zu bezeichnen, kann den Zufallsvariablen noch je ein Index für die Phase und für die Nummer der Zelle innerhalb der Phase hinzugefügt werden, vgl. Abb. A.12. Diese Bezeichnungen sollen nach (A.39) auch für T_W gelten.

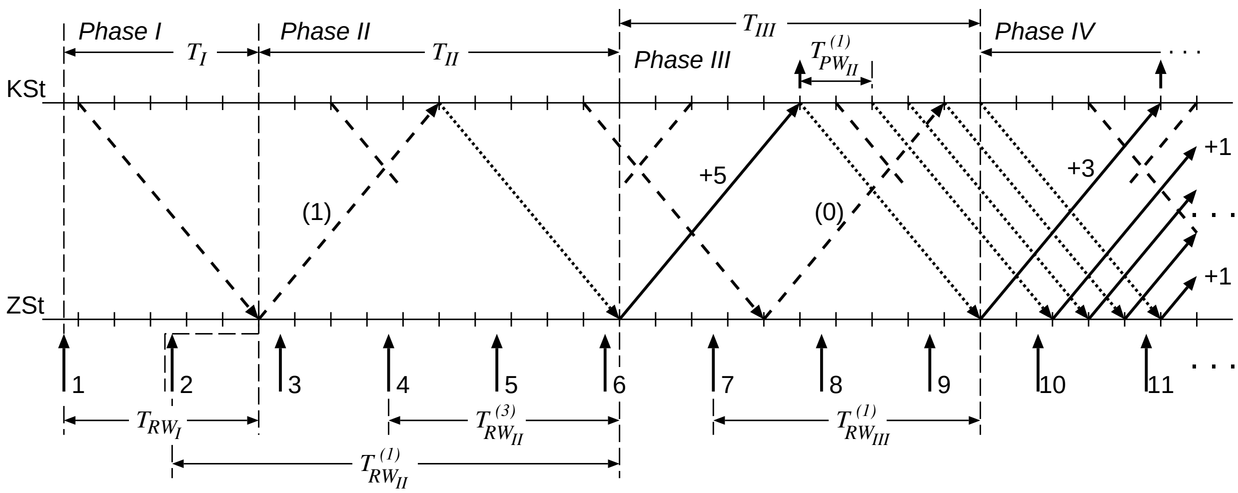


Abb. A.12: *Notation für die Zufallsvariablen.*

A.4.4 Phasenweise Analyse

A.4.4.1 Phase I

Die Wartezeit T_{RW_I} für die Meldung der ersten Zelle ist gleichverteilt auf dem Intervall $(0, t_{PE}]$:

$$f_{RW_I}(t) = \frac{1}{t_{PE}} \mathbf{1}\{t \in (0, t_{PE}]\} \tag{A.40}$$

Falls die dabei erzeugte Aktivitätsmeldung an der Kopfstation zu einem Zeitpunkt ankommt, zu dem eine Sendeberechtigung für Aktivitätsangaben abgesendet werden muß, verzögert sich das Aussenden der Sendeberechtigung für die erste Zelle um die Dauer eines Zeitschlitzes:

$$f_{W_I}(t) = \begin{cases} f_{RW_I}(t - t_Z) & \text{falls Zusammentreffen mit SB für AA} \\ f_{RW_I}(t) & \text{sonst} \end{cases} \tag{A.41}$$

Um Gleichung (A.41) geschlossen auszudrücken, wird die Hilfsfunktion $\zeta_y(k)$ eingeführt, die die Anzahl der Zeitschlitze angibt, die wegen der Vergabe von Sendeberechtigungen zur Aktivitätsangabe abgewartet werden müssen, wenn eine bekannte Aktivitätsabfrage um die Zeit y zurückliegt und k Vorgänger in der zentralen Warteschlange für Sendeberechtigungen warten:

$$\zeta_y(k) = \left\lfloor \frac{y + k t_Z}{t_P} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{y - t_Z}{t_P} \right\rfloor \tag{A.42}$$

Die entsprechende zusätzliche Verzögerung für Phase I ergibt sich damit zu

$$\xi_I = \zeta_{2\tau}(0) = \left\lfloor \frac{2\tau}{t_P} \right\rfloor - \left\lfloor \frac{2\tau - t_Z}{t_P} \right\rfloor \tag{A.43}$$

Damit läßt sich Gleichung (A.41) nun geschlossen darstellen:

$$f_{W_I}(t) = f_{RW_I}(t - \xi_I \cdot t_Z) \tag{A.44}$$

A.4.4.2 Phase II

Zur Bestimmung der Wartezeit bis zur Meldung von Zellen der Phase II wird die Zufallsvariable T_{II} eingeführt, die angibt, wieviel Zeit zwischen dem Absenden der Aktivitätsmeldung in Phase I und dem Empfang der entsprechenden Sendeberechtigung (und damit dem Ende der Phase II) vergeht. Sie ergibt sich in dem betrachteten leeren System direkt aus der Summe der Rundlaufdauer und der zusätzlichen Wartezeit von ξ_I Zeitschlitzen aus (A.43):

$$T_{II} = 2\tau + \xi_I t_Z \tag{A.45}$$

Alle Zellen im Büschel, die in Phase II nach der ersten Zelle des Büschels ankommen, können nach Eintreffen der Sendeberechtigung für die erste Zelle zusammen mit deren Transport zur Kopfstation gemeldet werden. Die Untergrenze κ_{II} und die Obergrenze κ_{IIa} für die Anzahl der in Phase II ankommenden Zellen ohne Berücksichtigung einer eventuell geringeren Büschellänge C_B sind durch (A.46) gegeben:

$$\kappa_{II} = \left\lfloor \frac{T_{II}}{t_Q} \right\rfloor \quad \text{und} \quad \kappa_{IIa} = \left\lfloor \frac{T_{II} + t_{PE}}{t_Q} \right\rfloor \tag{A.46}$$

Die Wartezeit bis zum Melden der Ankunft ist also für die b-te Zelle in Phase II folgendermaßen verteilt:

$$f_{RW_{II}}^{(b)}(t) = \frac{1}{t_{PE}} \cdot \mathbf{1}\{t > 0\} \cdot \mathbf{1}\{t \in (T_{II} - bt_Q, T_{II} - bt_Q + t_{PE}]\}, \quad b = 1, 2, \ldots \min\{\kappa_{IIa}, C_B - 1\} \tag{A.47}$$

Um den gesamten variablen Anteil $T_{W_{II}}^{(b)}$ der Durchlaufzeit für die b-te Zelle der Phase II zu bestimmen, wird die folgende Überlegung angestellt: Die angenommene FIFO-Warteschlangendisziplin (*First In First Out*) der Warteschlange in der Zugangsstation bewirkt, daß die im Büschel nacheinander angekommenen Zellen in der Reihenfolge ihres Ankommens auch an die Kopfstation weitergeleitet werden, wenn Sendeberechtigungen von der Kopfstation eintreffen. Die Sendeberechtigungen werden in der Kopfstation nach Eintreffen der ersten Zelle erzeugt und in die zentrale Warteschlange eingereiht. Die b-te Zelle in Phase II muß also warten, bis für alle $(b-1)$ Vorgängerzellen aus Phase II Sendeberechtigungen eingetroffen sind. Zusätzlich wird das Aussenden der Sendeberechtigungen durch die eingeschobenen Sendeberechtigungen für BA-Blöcke zur Aktivitätsabfrage verzögert. Diese Verzögerung wird durch Phase und Periode des Taktes der Sendeberechtigungen für BA-Blöcke bestimmt. Die Größe δ_{II} gibt den Abstand zwischen dem Eintreffen der Bedarfsangaben für Phase II und der nächsten Sendeberechtigung für BA-Blöcke an. Ihre Bestimmung nach (A.48) ist in Abb. A.13 skizziert.

$$\delta_{II} = \left\lceil \frac{T_{II} + 2\tau}{t_P} \right\rceil \cdot t_P - (T_{II} + 2\tau) \tag{A.48}$$

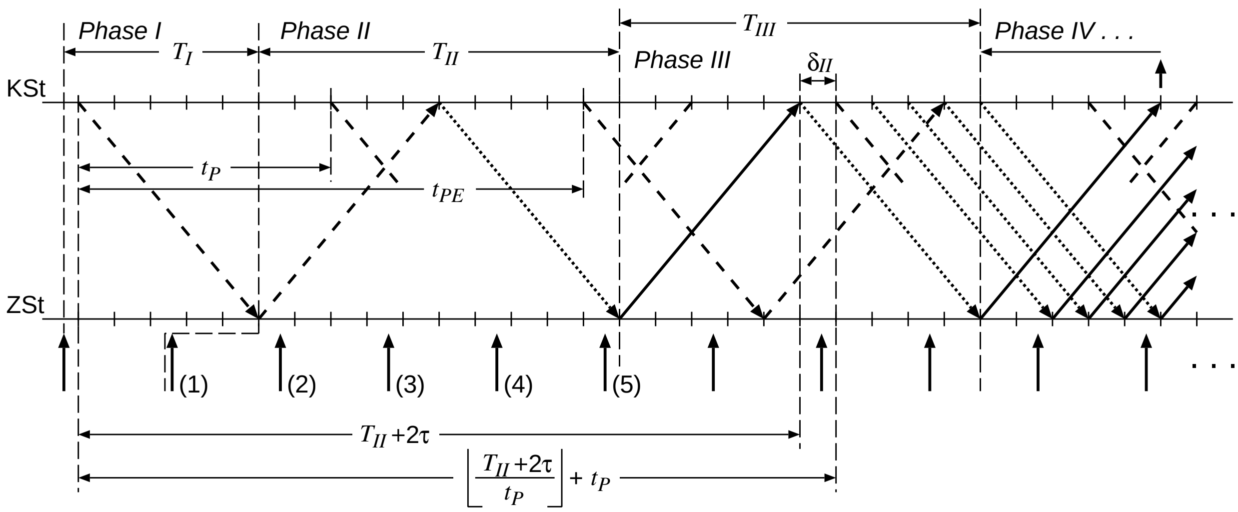


Abb. A.13: *Bestimmung von* δ_{II}.

Nach (A.48) liegt δ_{II} zwischen 0 und $t_P - t_Z$, da t_P und 2τ ganze Vielfache von t_Z sein sollen. Die Anzahl $\xi_{II}(b)$ der Zeitschlitze, während derer die Sendeberechtigung für die b-te Zelle in Phase II in der Kopfstation warten muß, ist damit durch (A.49) gegeben:

$$\xi_{II}(b) = b + \left\lfloor \frac{(b-1)t_Z - \delta_{II}}{t_P - t_Z} \right\rfloor \quad , \quad b = 1, 2, \ldots \tag{A.49}$$

Damit und mit (A.47) erhält man nun die Verteilungsdichtefunktion für die Wartezeit $T_{W_{II}}^{(b)}$ der b-ten Zelle in Phase II:

$$f_{W_{II}}^{(b)}(t) = f_{RW_{II}}^{(b)}(t - \xi_{II}(b) \cdot t_Z) \tag{A.50}$$

Der Index b ist hier durch die Anzahl der Zellen in Phase II, also durch das Minimum aus $C_B - 1$ und κ_{IIa}, begrenzt.

A.4.4.3 Phase III

Die Dauer von Phase III erhält man aus der Summe der doppelten Laufzeit und der eventuell auftretenden zusätzlichen Verzögerung der Sendeberechtigung für die erste Zelle aus Phase II analog zu (A.45):

$$T_{III} = 2\tau + \xi_{II}(1) \tag{A.51}$$

Die zusätzliche Wartezeit $T_{PW}^{(b)} = \xi_{III}(b)t_Z$ der Sendeberechtigung für die b-te Zelle der Phase III in der Kopfstation ergibt sich analog zu (A.49) aus (A.52) und (A.53).

$$\delta_{III} = \left\lceil \frac{T_{II} + T_{III} + 2\tau}{t_P} \right\rceil t_P - (T_{II} + T_{III} + 2\tau) \tag{A.52}$$

$$\xi_{III}(b) = b + \left\lfloor \frac{(b-1)t_Z - \delta_{III}}{t_P - t_Z} \right\rfloor \quad , \quad b = 1, 2, \ldots \tag{A.53}$$

Während Phase III können – bei andauerndem Büschel – κ_{III} oder κ_{IIIa} Zellen ankommen.

$$\kappa_{III} = \left\lfloor \frac{T_{III}}{t_Q} \right\rfloor \quad , \quad \kappa_{IIIa} = \left\lceil \frac{T_{III}}{t_Q} \right\rceil \tag{A.54}$$

Dabei wird jedes Intervall $(T_{III} - bt_Q, T_{III} - (b-1)t_Q]$ der Wartezeit $T_{RW_{III}}$ von einer noch zu bestimmenden Anzahl κ_{PE} an Zellen durchlaufen, d. h. über den Wertebereich $(0, t_{PE}]$ von T_{RW_I} betrachtet gibt es κ_{PE} Teilintervalle dieses Bereichs, in denen jeweils eine andere Zelle des Büschels die Position der b-ten Zelle innerhalb von Phase III einnimmt.

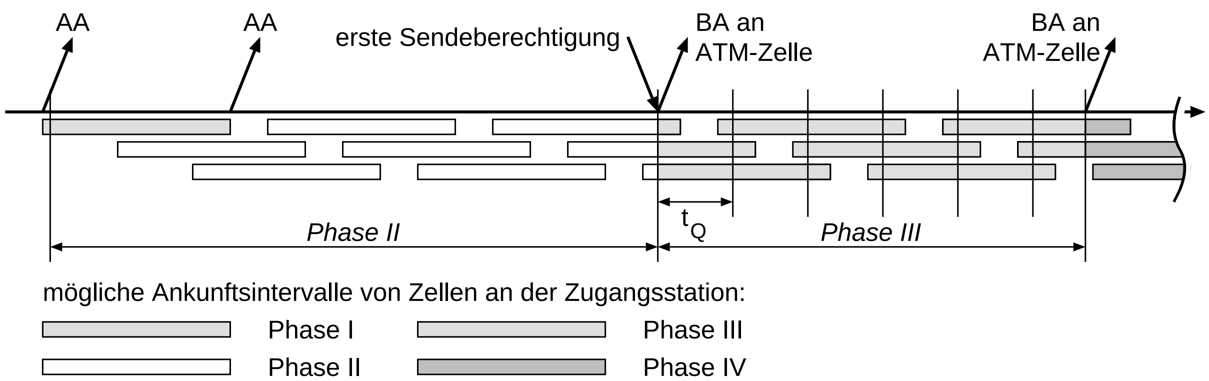


Abb. A.14: *Teilintervalle in Phase III.*

Abb. A.14 zeigt die möglichen Positionen der individuellen Zellen im Büschel, wobei die Ankunft der ersten Zelle zwischen zwei aufeinanderfolgenden Gelegenheiten zur Aktivitätsangabe (AA) liegt. Die Intervalle mit den Grenzen $(T_{III} - bt_Q, T_{III} - (b-1)t_Q]$ sind für Phase III eingezeichnet. Die κ_{PE}-fache Überdeckung (in der dargestellten Konstellation ist $\kappa_{PE} = 2$) jedes dieser Intervalle ist deutlich zu erkennen. Außerdem werden die Intervalle noch teilweise überdeckt, wenn t_{PE} kein ganzes Vielfaches von t_Q ist. Diese Überdeckung soll nun zunächst näher untersucht werden.

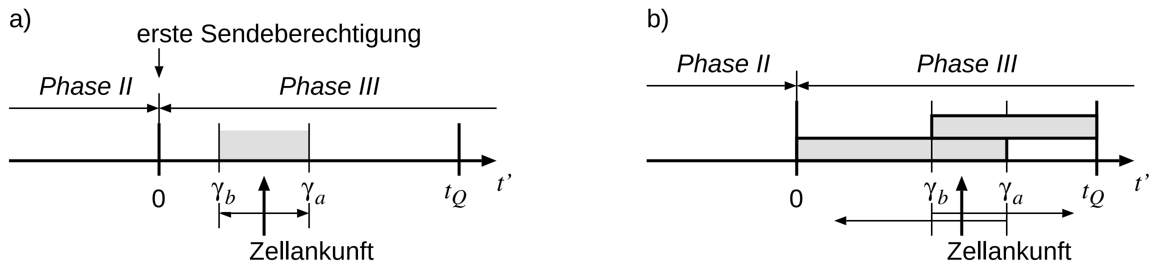


Abb. A.15: *Fallunterscheidung für die Überdeckung der t_Q-Teilintervalle durch Zellankünfte am Beginn von Phase III.*

In Abb. A.15 sind zwei mögliche Fälle dargestellt. In Fall a) variieren die möglichen Ankunftszeitpunkte von ATM-Zellen in Phase III so, daß nur in einem zusammenhängenden Teil des betrachteten Intervalles Zellankünfte möglich sind. Dies tritt auf, wenn $t_{PE} < t_Q$ und der Parameter $\gamma_a > t_{PE}$ ist. Fall b) deckt alle anderen Überdeckungsmöglichkeiten ab, wobei für $\gamma_a < \gamma_b$ ein nicht-zusammenhängender Bereich entsteht.

Die Grenzen γ_a und γ_b bezeichnen den Abstand der ersten Zellankunft in Phase III bei der minimalen (γ_a) beziehungsweise maximalen (γ_b) Wartezeit T_{RW_I} der ersten Zelle auf eine Möglichkeit zur Aktivitätsangabe:

$$\gamma_a = \left(\left\lfloor \frac{T_{II}}{t_Q} \right\rfloor + 1 \right) t_Q - T_{II} \tag{A.55}$$

$$\gamma_b = \begin{cases} t_Q & \text{falls } \left\lceil \frac{t_{PE}+T_{II}}{t_Q} \right\rceil t_Q = t_{PE} + T_{II} \\ \left\lceil \frac{t_{PE}+T_{II}}{t_Q} \right\rceil t_Q - (t_{PE} + T_{II}) & \text{sonst} \end{cases} \tag{A.56}$$

Nun kann auch die Anzahl κ_{PE} der Überdeckungen jedes Teilintervalles angegeben werden, wenn die Büschellänge $C_B > 1 + \kappa_{IIa} + \kappa_{IIIa}$ ist.

$$\kappa_{PE} = \frac{t_{PE} - \gamma_a + \gamma_b}{t_Q} - 1 \tag{A.57}$$

Wenn die Büschellänge dagegen kleiner ist, so daß die letzte Zelle des Büschels bereits in Phase III auftritt, dann müssen die unterschiedlichen Beiträge aus der vollständigen Überlappung und den beiden Teilüberlappungen noch abhängig vom Index b des Teilintervalles gewichtet werden. Abb. A.16 zeigt dazu die Numerierung der Teilintervalle in Phase III. Der Wechsel der Numerierung zwischen den Phasen ist nötig, um die Wartezeit $T_{PW_i}^{(b)} = \xi_i(b) t_Z$ in der zentralen Warteschlange für jede Zelle des Büschels in den beiden Phasen II und III jeweils möglichst einfach ausdrücken zu können.

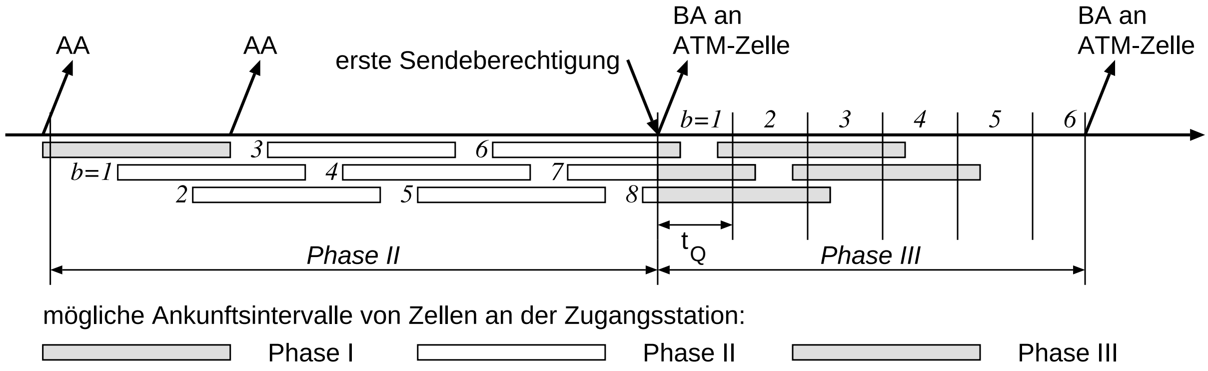


Abb. A.16: *Numerierung der Zellen und Überdeckungen der Intervalle in Phase III. (Ende des Zellbüschels in Phase III.)*

$$\begin{aligned}
\alpha_1(b) &= \max\{0, \min\{1, C_B - \kappa_{II} - b\}\} = \mathbf{1}\{C_B - \kappa_{II} - b > 0\} && \text{(A.58)}\\
\alpha_2(b) &= \max\{0, \min\{1, C_B - \kappa_{IIa} - b\}\} = \mathbf{1}\{C_B - \kappa_{IIa} - b > 0\} && \text{(A.59)}\\
\alpha_3(b) &= \max\{0, \min\{\kappa_{PE}, C_B - 1 - \kappa_{II} - b\}\} && \text{(A.60)}
\end{aligned}$$

Die Verteilungsdichtefunktion der Melde-Wartezeit T_{RW} für Zellen der Phase III ergibt sich im Fall a) ($t_{PE} < t_Q$ und $\gamma_a > t_{PE}$) in jedem Teilintervall aus der Überdeckung zwischen γ_b und γ_a:

$$f_{RW_{III}}^{(b)}(t) = \frac{1}{t_{PE}}\mathbf{1}\{t > 0\}\alpha_2(b)\mathbf{1}\{t \in (T_{III} - (b-1)t_Q - \gamma_a, T_{III} - (b-1)t_Q - \gamma_b]\} \quad \text{(A.61)}$$

Im Fall b) ($t_{PE} \geq t_Q$ oder $\gamma_a \leq t_{PE}$) erhält man sie dagegen als Summe der drei Überdeckungen zwischen 0 und γ_a, zwischen γ_b und t_Q und zwischen 0 und t_Q:

$$\begin{aligned}
f_{RW_{III}}^{(b)}(t) = \; & \frac{1}{t_{PE}}\mathbf{1}\{t > 0\}\Big[\alpha_1(b)\mathbf{1}\{t \in (T_{III} - (b-1)t_Q - \gamma_a, T_{III} - (b-1)t_Q]\}\\
& +\alpha_2(b)\mathbf{1}\{t \in (T_{III} - bt_Q, T_{III} - (b-1)t_Q - \gamma_b]\}\\
& +\alpha_3(b)\mathbf{1}\{t \in (T_{III} - bt_Q, T_{III} - (b-1)t_Q]\}\Big]\\
& (b = 1, 2, \ldots, \kappa_{IIIa}) \qquad \text{(A.62)}
\end{aligned}$$

Die Verteilungsdichtefunktion der Wartezeit T_W der b-ten Zelle in Phase III ist dann analog zu (A.44) und (A.50) zu erhalten, indem man das Argument t in (A.61) und (A.62) abhängig von b um $\xi_{III}(b)t_Z$ verschiebt:

$$f_{W_{III}}^{(b)}(t) = f_{RW_{III}}^{(b)}(t - \xi_{III}(b)t_Z) \quad \text{(A.63)}$$

Für Büschelgrößen $C_B < \lceil 4\tau/t_Q \rceil$ kann mit (A.44), (A.50) und (A.63) die bedingte Ensemble-Wartezeitverteilung für die Zellen des Büschels unter allen Phasenbedingungen exakt angegeben werden:

$$f_W(t)|(C_B = c) = \frac{1}{c}\left[f_{W_I}(t) + \sum_{b=1}^{\min\{c-1,\kappa_{IIa}\}} f_{W_{II}}^{(b)}(t) + \sum_{b=1}^{\kappa_{IIIa}} f_{W_{III}}^{(b)}(t) \right] \qquad \text{(A.64)}$$

Die gesamte Ensemble-Verteilungsdichtefunktion erhält man schließlich durch Gewichtung der einzelnen Verteilungsdichten aus (A.64) mit der Anzahl der jeweils im Büschel auftretenden Zellen und der Wahrscheinlichkeit für die entsprechende Büschelgröße:

$$f_W(t) = \sum_{c=1}^{c_{max}} c \cdot \mathrm{P}\{C_B = c\} \cdot f_W(t)|(C_B = c) \qquad \text{(A.65)}$$

A.4.4.4 Phase IV

In Phase IV kommen die Sendeberechtigungen regelmäßiger an der Zugangsstation an. Da in jedem Zyklus nun etwa

$$\kappa_{IV} = \left\lfloor \frac{2\tau}{t_Q} \right\rfloor \qquad \text{(A.66)}$$

Sendeberechtigungen an der Zugangsstation eintreffen und damit ebenso oft neue Ankünfte an die Kopfstation gemeldet werden können, ist eine exakte Analyse der Ensemble-Durchlaufzeiten praktisch nicht mehr möglich. Daher wird als *Näherung* angenommen, daß alle 2τ eine Folge von κ_{IV} Sendeberechtigungen an der Zugangsstation eintrifft. Dadurch wird jeder Zyklus der Länge 2τ in einen Abschnitt der Länge

$$T_{IVa} = 2\tau - \kappa_{IV} t_Z \qquad \text{(A.67)}$$

und einen der Länge

$$T_{IVb} = \kappa_{IV} t_Z \qquad \text{(A.68)}$$

unterteilt. Diese Unterteilung ist in Abb. A.17 für den stationären Fall skizziert.

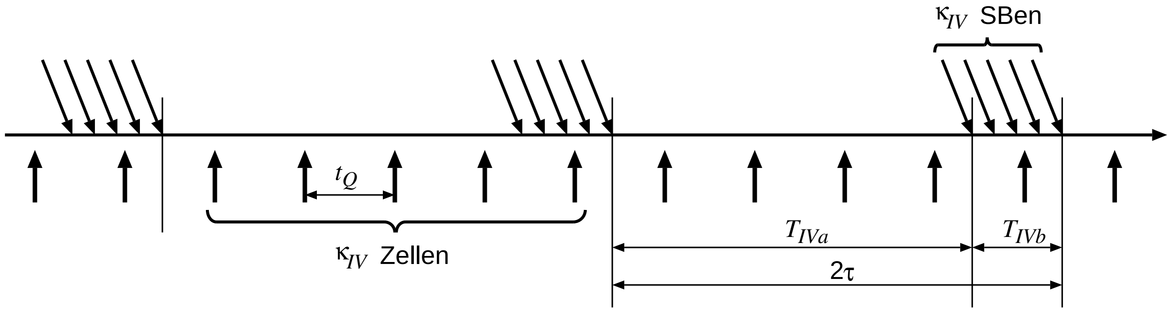


Abb. A.17: *Teilintervalle in Phase IV.*

Im Teilintervall der Länge T_{IVa} kann jede neu an der Zugangsstation eingetroffene ATM-Zelle nach der Zeit 0 bis T_{IVa} gemeldet werden. Für diese Zellen wäre die Ensemble-Verteilungsdichtefunktion für T_W daher $\Xi(t, t_Q, T_{IVa})$ mit $\Xi(t, t_Q, t_B)$ nach (A.30) aus Anhang A.2. Die im folgenden kurzen Teilintervall der Länge T_{IVb} ankommenden ATM-Zellen erfahren eine kürzere Wartezeit T_{RW} bis zur Meldung an die Kopfstation (0 bis t_Z). In die Wartezeit T_{PW} ihrer Sendeberechtigungen in der zentralen Warteschlange der Kopfstation geht allerdings noch die Anzahl der vorher in einer gemeinsamen Bedarfsangabe gemeldeten Neuankünfte ein. Bei genauer Betrachtung stellt man fest, daß sich dadurch die Funktion Ξ nach (A.30) bis $t = 0$ fortsetzt. Insgesamt ergibt sich damit für die Ensemble-Verteilungsdichte der Wartezeit $T_{W_{IV}}$ die Funktion

$$f_{W_{IV}}(t) = \Xi(t + \kappa_{IV} t_Z, t_Q, 2\tau) \qquad \text{(A.69)}$$

mit $\Xi(t, t_Q, t_B)$ nach (A.30) aus Anhang A.2.

A.4.5 Zusammenfassung der Phasen

Wenn in (A.65) die Verteilungsdichtefunktion (A.69) einbezogen werden soll, dann muß diese mit der mittleren Anzahl $\mathrm{E}[C_{IV}]$ der in Phase IV an der Zugangsstation ankommenden ATM-Zellen gewichtet werden. $\mathrm{E}[C_{IV}]$ wird aus der Summe

$$C_B = 1 + \mathrm{E}[C_{II} + C_{III}] + \mathrm{E}[C_{IV}] \qquad \text{(A.70)}$$

bestimmt. In den Phasen II und III kommen $\lfloor (T_{II} + T_{III})/t_Q \rfloor$ bis $\lfloor (t_{PE} + T_{II} + T_{III})/t_Q \rfloor$ Zellen an. Der Erwartungswert $\mathrm{E}[C_{II} + C_{III}]$ kann daher nach der in Anhang A.3 beschriebenen Formel berechnet werden. Die Grenzen a und b in (A.36) sind hier:

$$\beta_a = \frac{T_{II} + T_{III}}{t_Q} \qquad \text{(A.71)}$$

$$\beta_b = \frac{t_{PE} + T_{II} + T_{III}}{t_Q} \qquad \text{(A.72)}$$

Wenn die Gesamtanzahl C_B der Zellen im Büschel einbezogen wird, dann sind bei der Berechnung von $\mathrm{E}[C_{IV}]$ drei Fälle zu unterscheiden:

$\beta_a \geq C_B - 1$:
In diesem Fall liegt das Ende des Büschels sicher in den Phasen I–III, so daß keine Zelle in Phase IV übertragen wird:

$$\mathrm{E}[C_{IV}|(C_B = c)] = 0 \text{ für } c \leq \beta_a + 1 \qquad \text{(A.73)}$$

$\beta_a < C_B - 1$ **und** $\beta_b \geq C_B - 1$:
In diesem Fall entscheidet die Größe von T_{RW_I} darüber, ob Zellen in Phase IV übertragen werden. Die mittlere Anzahl von Zellen in den Phasen II und III ist $C_B - 1$ mit Wahrscheinlichkeit $\frac{\beta_b-(C_B-1)}{\beta_b-\beta_a}$ und berechnet sich mit Wahrscheinlichkeit $\frac{C_B-1-\beta_a}{\beta_b-\beta_a}$ aus (A.36) mit den Grenzen $a = \beta_a$ und $b = C_B - 1$.

$$\begin{aligned} \mathrm{E}\left[C_{IV}|(C_B = c)\right] &= c-1-\frac{t_Q}{t_{PE}}\Big[\big[\beta_b - (c-1)\big](c-1) + \frac{1}{2}\big[(c-1)(c-2) - \lfloor\beta_a\rfloor(2\beta_a - \lfloor\beta_a\rfloor - 1)\big]\Big] \\ &\quad \text{für } c \in (\beta_a + 1, \beta_b + 1] \end{aligned} \tag{A.74}$$

$\beta_b < C_B - 1$:
Hier werden die letzten Zellen des Büschels immer in Phase IV übertragen. Daher kann $\mathrm{E}\left[C_{II} + C_{III}\right]$ nach (A.36) mit $a = \beta_a$ und $b = \beta_b$ berechnet werden.

$$\begin{aligned} \mathrm{E}\left[C_{IV}|(C_B = c)\right] &= c - 1 - \frac{t_Q}{2t_{PE}} \cdot \big[\lfloor\beta_b\rfloor(2\beta_b - \lfloor\beta_b\rfloor - 1) - \lfloor\beta_a\rfloor(2\beta_a - \lfloor\beta_a\rfloor - 1)\big] \\ &\quad \text{für } c > \beta_b + 1 \end{aligned} \tag{A.75}$$

Aus den bedingten Erwartungswerten von C_{IV} in (A.73) bis (A.75) erhält man die gesamte Ensemble-Verteilungsdichtefunktion für den variablen Anteil der Wartezeiten in allen Phasen, zunächst unter der Bedingung einer festen Büschellänge C_B:

$$\begin{aligned} & f_W(t)|(C_B = c) \\ &= \frac{1}{c}\left[f_{W_I}(t) + \sum_{b=1}^{\min\{c-1,\kappa_{IIa}\}} f_{W_{II}}^{(b)}(t) + \sum_{b=1}^{\kappa_{IIIa}} f_{W_{III}}^{(b)}(t) + \mathrm{E}\left[C_{IV}|C_B = c\right]\Xi(t + \kappa_{IV}t_Z, t_Q, 2\tau)\right] \end{aligned} \tag{A.76}$$

Analog zu (A.65) kann schließlich über die bedingten Verteilungsdichten summiert werden:

$$f_W(t) = \sum_{c=1}^{\infty} c \cdot \mathrm{P}\{C_B = c\} \cdot f_W(t)|(C_B = c) \tag{A.77}$$

A.4.6 Vergleich der Analyse mit Simulationsergebnissen

Der Vergleich zwischen Analyse- und Simulationsergebnissen erlaubt die gegenseitige Validierung der Analyse und des Simulationsprogrammes anhand von Beispielen mit bestimmten Parametern. Hier soll die Übereinstimmung der Ergebnisse zunächst getrennt für die Phasen I bis III der exakten Analyse (Abschnitt A.4.6.1) und die Näherung der Phase IV (Abschnitt A.4.6.2) gezeigt werden. Anschließend wird (Abschnitt A.4.6.3) ein Beispiel für die Kombination der Ergebnisse in den Phasen I–IV gezeigt.

Die Wahl der Parameter ist an das Szenario TS10 aus Tab. 5.1 angelehnt. Um die Randbedingung der Analyse (nur eine Zugangsstation ist aktiv) zu erfüllen, wird hier das Szenario *ITS10* mit den folgenden Parametern definiert: Die Quellenperiode während eines Zellbüschels ist $t_Q = 10t_Z$. Von den $n_0 = 128$ am System angeschlossenen Stationen soll nur eine ($n = 1$) eine Quelle ($b_Q = 1$) besitzen und aktiv sein. Der Anteil der Übertragungskapazität in der Rückrichtung, der für Aktivitätsabfrageblöcke eingesetzt wird, soll $\rho_P = 12,5\%$ betragen, so daß jeder achte Zeitschlitz ($t_P = 8t_Z$) zur Aktivitätsabfrage eingesetzt wird. Bei $m = 50$ Mini-Zeitschlitzen in jedem Zeitschlitz wird damit jede Zugangsstation alle $t_{PE}/t_Z = 24$ Zeitschlitze abgefragt. Die Verteilung der Anzahl C_B der Zellen in einem Büschel ist unterschiedlich und wird jeweils angegeben. In der Simulation ist der Abstand zwischen zwei Büscheln gleichverteilt zwischen 110 und 120 Zeitschlitzen, so daß die Randbedingung der Analyse (der Abstand muß größer als 4τ sein) erfüllt ist. Die Rundlaufzeit betrage $2\tau = 36t_Z$ wie in Kapitel 3.

Die Simulationsergebnisse wurden, wenn nicht anders angegeben, in zehn Teiltests mit jeweils 10000 Zellankünften simuliert, damit eine deutliche Unterscheidung zwischen Simulations- und Analyseergebnissen in der grafischen Darstellung möglich wird. Um Analyse- und Simulationsergebnisse auf derselben Zeitskala vergleichen zu können, wird für die Analyse die Größe $f_W(t - 3\tau)$ dargestellt, so daß die Umformung nach (A.39) rückgängig gemacht wird.

A.4.6.1 Phasen I–III

In Abb. A.18 und A.19 ist die Verteilungsdichtefunktion der Durchlaufzeit im Szenario ITS10 für den Fall dargestellt, daß die Quelle in jedem Büschel genau $C_B = 4$ bzw. 8 Zellen abgibt. In beiden Fällen kommt die letzte Zelle immer in Phase II oder III an, so daß Gleichung (A.65) eingesetzt werden kann. Zur besseren Übersicht sind die Simulationsergebnisse in Abb. A.18 und A.19 ohne Konfidenzintervalle dargestellt. Außerdem wurden nur 10^5 Zellen je Teiltest simuliert, so daß die Simulationsergebnisse durch die Schwankungen der Kurven erkennbar sind. Wird die Simulation mit einer größeren Anzahl von Ereignissen durchgeführt, lassen sich die Unterschiede zwischen Simulations- und Analyseergebnissen nicht mehr erkennen.

Die Übereinstimmung zwischen den Ergebnissen aus Analyse und Simulation ist so gut, daß bei 10^7 Zellankünften in jedem Teiltest der Simulation wie in Kapitel 3 die beiden Kurven nicht mehr unterscheidbar wären. Dies ist auch bei der Wahl anderer Quellen- oder

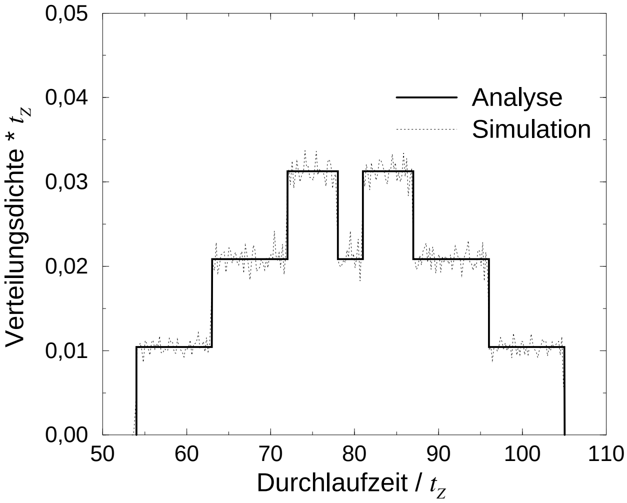


Abb. A.18: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10 bei $C_B = 4$.*

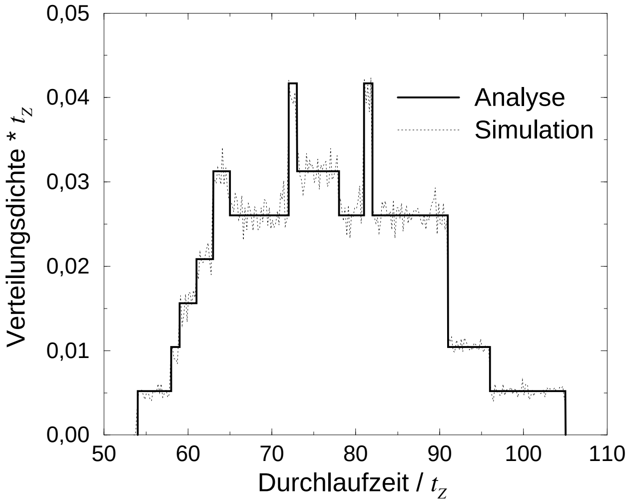


Abb. A.19: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10 bei $C_B = 8$.*

Systemparameter zu sehen[2], so daß davon ausgegangen werden kann, daß die Analyse der Phasen I bis III alle wesentlichen Effekte im betrachteten System richtig beschreibt.

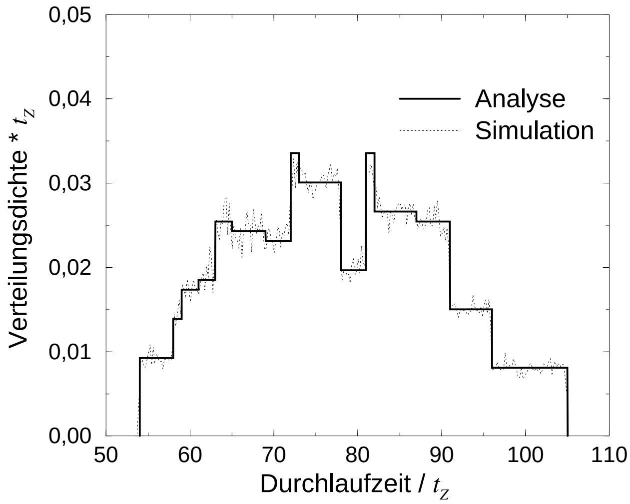


Abb. A.20: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10, C_B gleichverteilt zwischen 1 und 8.*

Auch an der in Abb. A.20 gezeigten Verteilungsdichtefunktion der Durchlaufzeit, der eine Gleichverteilung von C_B zwischen 1 und 8 zugrunde liegt, ist dieselbe gute Übereinstimmung zu sehen.

[2]Aus Platzgründen kann hier nur ein kleiner Ausschnitt aus den Ergebnissen dieser Validierung dargestellt werden.

A.4.6.2 Phase IV

In Abb. A.21 ist die Verteilungsdichte der Durchlaufzeit für $C_B = 800$ dargestellt, so daß die in den Phasen I bis III transportierten Zellen nur noch 1% zur gesamten Verteilung beitragen, so daß die Verteilungsdichte zu 99% aus $f_{W_{IV}}(t)$ nach (A.69) besteht. Um genügend Phasenwechsel für die Darstellung einer Ensemble-Verteilung zu bekommen, wurden in der Simulation hier in jedem Teiltest 10^5 Zellen, also etwa 125 Büschel, bearbeitet.

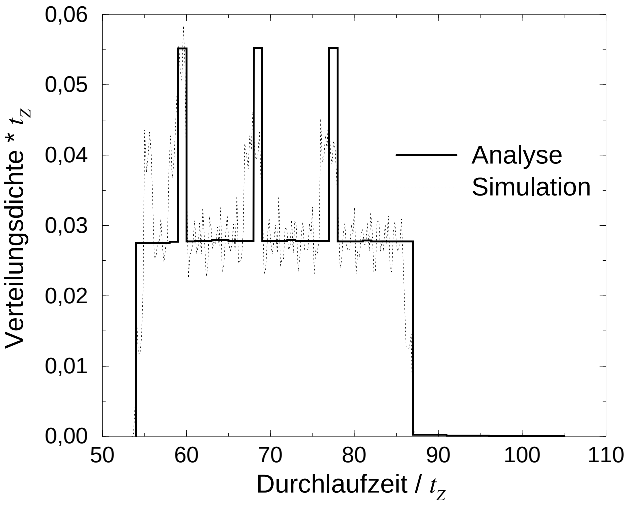


Abb. A.21: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10 bei $C_B = 800$.*

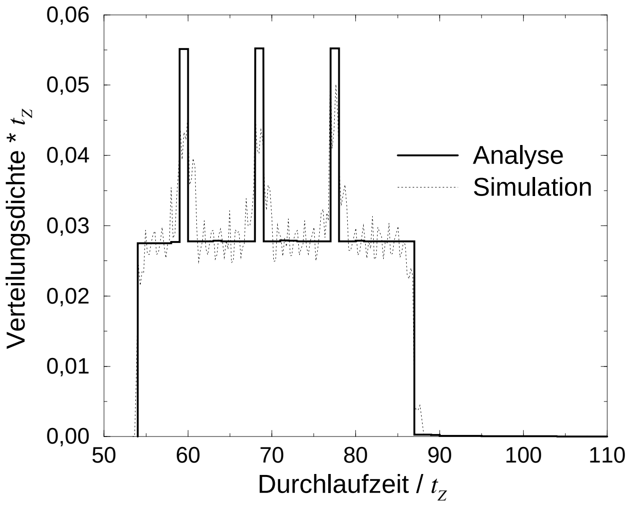


Abb. A.22: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Abgewandeltes Szenario ITS10 mit $C_B = 800$ und $t_P = 11t_Z$.*

Man sieht, daß die Näherung aus Abschnitt A.4.4.4 in dem hier dargestellten Szenario ITS10 nicht exakt stimmt. Die Aufspreizung der in der Simulation gemessenen Maxima der Verteilungsdichte bei 59, 68 und $77\,t_Z$ gegenüber der errechneten Kurve ist auf die in der Analyse von Phase IV nicht mehr berücksichtigte zusätzliche Wartezeit der Sendeberechtigungen in der Kopfstation zurückzuführen, wenn eine Sendeberechtigung für Aktivitätsangabenblöcke ausgesendet wird. Dabei entsteht eine Lücke von einem Zeitschlitz in der engen Folge der Sendeberechtigungen, die an der Zugangsstation ankommen (T_{IVb} in Abb. A.17), so daß die nach der Lücke zur Kopfstation übertragenen Bedarfsangaben eine um einen Zeitschlitz kürzere Wartedauer der Sendeberechtigungen in der Kopfstation erfahren. Dieser Fall tritt nur dann regelmäßig ein, wenn t_P, 2τ und κ_{IV} in einem Verhältnis stehen, das regelmäßig eine Unterbrechung der Abfertigung der während der Zeit T_{IVb} in der Kopfstation wartenden Sendeberechtigungen durch Sendeberechtigungen zur Aktivitätsabfrage verursacht. Zum Vergleich ist in Abb. A.22 dasselbe Szenario mit einer auf $t_P = 11t_Z$ vergrößerten Abfrageperiode dargestellt. Hier treten die Abweichungen von der als Näherung für Phase IV angenommenen blockweisen Bedienung (Abb. A.17) nicht mehr so regelmäßig auf; sie sind daher auch nicht so deutlich in der gemessenen Verteilungsdichte zu erkennen.

A.4.6.3 Phasen I–IV

Die Verteilung für die Büschelgröße C_B wird nun so gewählt, daß die Beiträge der Phasen I bis III und der Phase IV beide wesentlich sind. Abb. A.23 zeigt die Verteilungsdichtefunktion der Durchlaufzeit für eine feste Büschelgröße $C_B = 16$, während in Abb. A.24 für C_B eine Gleichverteilung zwischen 1 und 20 angesetzt ist.

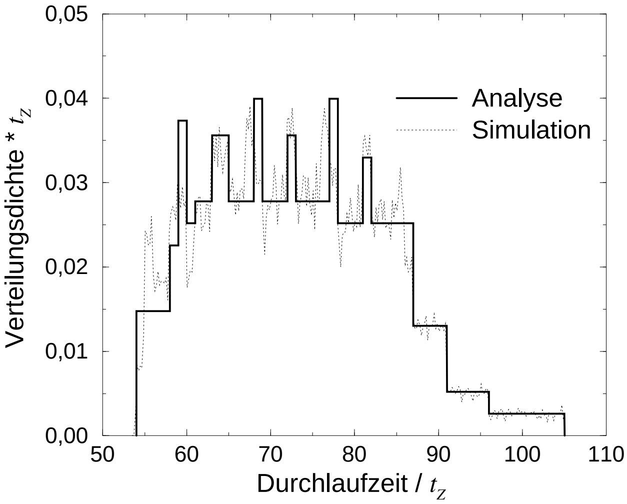


Abb. A.23: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10 bei $C_B = 16$.*

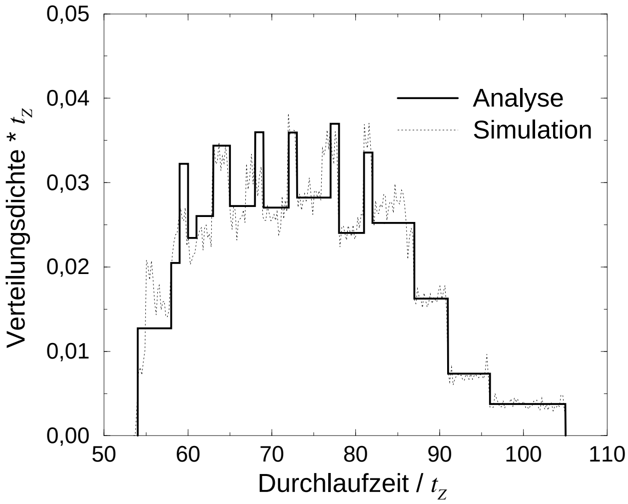


Abb. A.24: *VDF von T_D in Analyse und Simulation. Szenario ITS10; C_B gleichverteilt von 1 bis 20.*

In beiden Fällen sind die Auswirkungen der Näherung für Phase IV zwar zu sehen, aber Grenzen der Verteilung werden davon nicht beeinflußt. Insbesondere wird die Randverteilung für große Durchlaufzeiten von Phase II dominiert, die exakt erfaßt ist. Außerdem treten die Abweichungen gegenüber den Charakteristika der Verteilungsdichtefunktion zurück, wenn C_B variabel ist, wie Abb. A.24 zeigt.

Anhang B

Systembeschreibungen

B.1 Robustheit der Bedarfsangaben

Ein MAC-Protokoll, das auf der Basis der in einer Bedarfsangabe mitgeteilten Anzahl neu angekommener Zellen Sendeberechtigungen an die Zugangsstationen vergibt, wird nicht mehr funktionieren, wenn eine Bedarfsangabe verloren geht. In diesem Fall wird die Warteschlange der Zugangsstation nie vollständig geleert werden und dort wartende ATM-Zellen werden immer erst übertragen, wenn wieder weitere Zellen angekommen sind. Wenn dagegen die Bedarfsangabe die Warteschlangenlänge selbst überträgt, kann die Anzahl der neu angekommen ATM-Zellen daraus berechnet werden: Die Medienzugriffssteuerung in der Kopfstation besitze für jede Zugangsstation i einen Zähler M_i, der den momentan bekannten Stand der Warteschlangenlänge in der Zugangsstation i enthält. Erreicht nun eine Bedarfsangabe der Größe Q_i von der Zugangsstation i die Kopfstation, dann wird die Anzahl neuer Ankünfte A_i nach (B.1) berechnet:

$$A_i = \max\{0, Q_i - M_i\} \tag{B.1}$$

Die Warteschlangenlängeninformation wird anschließend in den Zähler übernommen:

$$M_i^{neu} = \max\{M_i, Q_i\} \tag{B.2}$$

In beiden Schritten wird durch die Maximum-Operation sichergestellt, daß ein durch Bitfehler verfälschter Wert von Q_i keine große Auswirkung hat: Wird ein zu kleiner Wert für Q_i empfangen, dann wird dieser ignoriert. Wird ein zu großer Wert für Q_i empfangen, dann wird das MAC-Protokoll von einer zu großen Anzahl von Ankünften ausgehen, und es werden, je nach Verkehrsaufkommen an der Zugangsstation, Leerzellen zur Kopfstation gesendet, wenn zu viele Sendeberechtigungen generiert wurden.

Um den Zähler M_i richtig zu aktualisieren, muß schließlich noch die Operation

$$M_i^{neu} = \max\{M_i - 1, 0\} \tag{B.3}$$

in jedem Zeitschlitz durchgeführt werden, in dem eine ATM-Zelle oder eine Leerzelle von der Zugangsstation i an der Kopfstation ankommt, oder wenn von Zugangsstation i eine Zelle erwartet wird. Mit diesem Mechanismus können alle möglichen Fehlerfälle so aufgelöst werden, daß keine ATM-Zellen auf unbestimmte Zeit in der Zugangsstation verbleiben, wie die folgende Aufstellung zeigt.

1. *Die Bedarfsangabe geht verloren oder wird in einen zu kleinen Wert verfälscht.*
   Einmal erzeugte Sendeberechtigungen werden nicht zurückgenommen. Falls neue Ankünfte an der Zugangsstation vorhanden waren, werden für diese zunächst keine Sendeberechtigungen erzeugt. Die betroffenen ATM-Zellen werden dadurch zusätzlich verzögert. Beim Empfang der nächsten korrekten Bedarfsangabe für diese Zugangsstation werden die noch fehlenden Sendeberechtigungen nach (B.1) erzeugt, und der Zählerstand in der Kopfstation wird nach (B.2) wieder synchronisiert, so daß die zusätzliche Verzögerung der betroffenen ATM-Zellen gleich dem Abstand der BA-Blöcke ist.

2. *Die Bedarfsangabe wird so verfälscht, daß ein zu großer Wert von Q_i empfangen wird.*
   Es werden zu viele Sendeberechtigungen für die betroffene Station erzeugt. Solange bis M_i wieder kleiner als Q_i ist, werden für diese Station keine weiteren Sendeberechtigungen erzeugt. Hier können keine zusätzlichen Verzögerungen auftreten; die betroffene Zugangsstation erhält zu viele Sendeberechtigungen und sendet Leerzellen an die Kopfstation, wenn bis dahin keine zusätzlichen ATM-Zellen angekommen sind.

3. *Eine Sendeberechtigung geht verloren.*
   Da der Zähler M_i in der Kopfstation dann verringert wird, wenn die entsprechende Zelle von Zugangsstation i erwartet wird, wird bei der nächsten Meldung der aktuellen Warteschlangenlänge nach (B.1) für diese Zelle wieder eine Sendeberechtigung erzeugt. Die Auswirkung eines Verlustes einer Sendeberechtigung ist also zeitlich begrenzt.

4. *Eine Zelle in der Rückrichtung geht verloren.*
   Dies ist ein normaler Fall von ATM-Zellverlusten im Zugangsnetz. Die mit der ATM-Zelle verlorengegangene Bedarfsinformation hat dieselben Auswirkungen wie in Fall 1.

5. *Die Zielinformation einer Sendeberechtigung wird verfälscht.*
   Dies ist eine Kombination des Falles 3 für diejenige Zugangsstation, für die die Sendeberechtigung bestimmt war, und des Falles 2 für die Zugangsstation, die die Sendeberechtigung fälschlicherweise erhält.

Diese Aufstellung zeigt, daß durch die Übertragung der Warteschlangenlänge in der Bedarfsmeldung eine sehr robuste Reaktion des Medienzugriffsprotokolles auf Verfälschung oder Verlust von MAC-Protokollelementen erreicht werden kann. Die Robustheit bezieht sich hier darauf, daß ATM-Zellen unter allen Umständen übertragen werden und eher eine größere Verzögerung in Kauf genommen wird als ein Zellverlust.

Als Alternative können auch Verfahren eingesetzt werden, die die Verzögerung minimieren und dafür Verfälschungen oder Verluste von Bedarfsmeldungen in Zellverluste an der Zugangsstation umsetzen [95, Abschn. 3.6.7.4].

B.2 Verkehrsformung für Sendeberechtigungen mit einem *Virtual Scheduler*

Die hier beschriebene Abwandlung des dem *Generic Cell Rate Algorithm* äquivalenten *Virtual Scheduler* ist an die Beschreibung in [18] angelehnt. Die verwendeten Parameter und Variablen sind in Tab. B.1 zusammengefaßt.

Größe	Name	Bedeutung
L_i	Limit	*burst tolerance*
I_i	Increment	erwartete Dauer zwischen zwei Zellankünften
TAT_i	Theoretical Arrival Time	Zeitpunkt der nächsten erwarteten Ankunft
A_i	Arrivals	Anzahl der neuen Ankünfte
t_a	arrival time	Zeitpunkt der Ankunft der Bedarfsangabe für A_i an der KSt
R_i	Requests	Anzahl der noch zu erzeugenden Sendeberechtigungen
D_i	Admitted	Anzahl der direkt erzeugten Sendeberechtigungen
t_{Sp}	Spacing Timer	Ablaufzeitpunkt für den Timer

Tabelle B.1: *Parameter und Variablen für den* Virtual Scheduler.

Zum Zeitpunkt t_a wird die Bedarfsangabe für eine Zugangsstation i ausgewertet, vgl. Anhang B.1. Danach enthält A_i die Anzahl der neuen Ankünfte an ZSt_i und R_i die Anzahl der ATM-Zellen in ZSt_i, für die noch keine Sendeberechtigungen erzeugt wurden.

Je nach Lage des Ankunftszeitpunktes t_a der Bedarfsangabe relativ zu TAT_i werden nun drei Fälle unterschieden:

1. $t_a > TAT_i$: Ankunft „zu spät“
2. $t_a \in [TAT_i - L_i, TAT_i]$: Ankunft im tolerierten Bereich

3. $t_a < TAT_i - L_i$: Ankunft „zu früh“

In Fall 1 läuft nun der folgende Algorithmus ab:

1. Synchronisierung: $TAT_i := t_a$
2. zugelassene Ankünfte: $D_i := \min\left\{(1 + \left\lfloor \frac{t_a - TAT_i + L_i}{I_i} \right\rfloor), R_i\right\}$
3. Erzeugung von D_i Sendeberechtigungen und
4. Verringerung von R_i um D_i
5. Falls $R_i > 0$: Timer i auf $TAT_i + D_i \cdot I_i - L_i$ setzen
6. nächster erwarteter Ankunftszeitpunkt: $TAT_i^{neu} := TAT_i^{alt} + A_i \cdot I_i$

Bei Ablauf des Timers (eine Realisierung durch einen Zähler, wie sie in [116] beschrieben ist, kann hier sinnvoll sein) wird eine Sendeberechtigung erzeugt und anschließend der Timer neu gesetzt:

1. Erzeuge Sendeberechtigung und reihe sie in die zentrale SB-Warteschlange der KSt ein
2. Falls $R_i > 0$: Timer i auf $t_{\text{jetzt}} + I_i$ setzen

In Fall 2 läuft derselbe Algorithmus ab wie in Fall 1, nur daß der erste Schritt (Synchronisierung) entfällt.

In Fall 3 reduziert sich der Algorithmus auf die folgenden Schritte:

1. Falls Timer i abgelaufen ist: Timer i auf $TAT_i - L_i$ setzen
2. nächster erwarteter Ankunftszeitpunkt: $TAT_i^{neu} := TAT_i^{alt} + A_i \cdot I_i$

Literaturverzeichnis

[1] "Reshaping Communications through Technology Convergence." *IEEE Communications Magazine* Vol. 33, No. 4, April 1995

[2] "Access to Broadband Services." *IEEE Communications Magazine* Vol. 33, No. 8, August 1995

[3] "Digital Interactive Broadband Video Dial Tone Networks." *IEEE Network* Vol. 9, No. 5, Sep./Oct. 1995

[4] "Broadband Services over Residential Networks." *IEEE Network* Vol. 11, No. 1, Jan./Feb. 1997

[5] "Broadband Access Networks." *IEEE Communications Magazine* Vol. 35, No. 3, March 1997

[6] M. Abramowitz, I.A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions*, Dover Publications, New York, 1965

[7] A.A. de Albuquerque, A.J.N. Houghton, S. Malmros, "Field Trials for Fiber Access in the EC." *IEEE Communications Magazine* Vol. 32, No. 2, Feb. 1994, pp. 40–48

[8] J.D. Angelopoulos, I.S. Venieris, G.I. Stassinopoulos, "Dynamic Bandwidth Distribution for APONs with Emphasis on Low Cell Jitter." in *Proceedings of the 11th EFOC&N*, The Hague, Netherlands, June/July 1993, pp. 86–90

[9] J.D. Angelopoulos, I.S. Venieris, "A Distributed FIFO Spacer/Multiplexer for Access to Tree APONs." in *Proceedings of IEEE Supercomm/ICC*, New Orleans, LA, USA, May 1994

[10] J.D. Angelopoulos, E.K. Fragoulopoulos, E.N. Protonotarios, "Efficient support of best effort traffic in passive tree local loops." in *Proceedings of SPIE Conference on Hybrid Fiber Coax Systems*, Philadelphia, PA, USA, 1995, pp. 182–191

[11] J.D. ANGELOPOULOS, J. KOULOURIS, E. FRAGOULOPOULOS, "A MAC Protocol for an ATM based SuperPON." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on All-Optical Communication Systems: Architecture, Control and Network Issues II* Vol. 2919, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 279–287

[12] J. ANGELOPOULOS, "The Single Symbol Simultaneous Reservation (S^3R) method for TDMA sharing of the return channel in HFC." in *Proceedings of NOC'96, Vol. 1: "Broadband Superhighway"*, Heidelberg, Germany, 1996, pp. 37–44

[13] J. ANGELOPOULOS, T. ORFANOUDAKIS, "Control of traffic accessing ATM core networks via HFC systems." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 68–75

[14] M.A. ARAD, R. KAUTZ, A. LEON-GARCIA, "TDMA and CDMA MAC support for multiple qualities of service in wireless ATM networks." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 468–479

[15] S. ARCHAMBAULT, K. QUIAN, "Blocking Probability in Residential Broadband Access Systems." in V. Ramaswami, P. Wirth (Eds.), *Proceedings of ITC 15*, Washington D.C., June 1997, pp. 741–750

[16] THE ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE RBB WG, *RBB Baseline Document Draft.* BTD-RBB-001.02, April 1997

[17] THE ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE, *User-Network Interface (UNI) Signalling Specification*, Version 4.0 af-sig-0061.000, July 1996

[18] THE ATM FORUM TECHNICAL COMMITTEE, *Traffic Management Specification Version 4.0*, af-tm-0056.000, April 1996

[19] J.W. BALLANCE, R.F. LEE, P.H. ROGERS, M.F. HALLS, "A B-ISDN Local Distribution System based on a Passive Optical Network." in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)* San Diego, CA, USA, 1990, Paper 305.4

[20] S. BALZARETTI, M.D. BORTOLI, U. FERRERO, M. RAVERA, "Economic evaluations for the access network: results of the RACE R2087/TITAN project." *CSELT Technical reports* Vol. 23, No. 5, Oct. 1995, pp. 625–633

[21] V.E. BENEŠ, *General Stochastic Processes in the Theory of Queues.* Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1963

[22] C. Bisdikian, "Performance Analysis of the Multi-slot n-ary Stack Random Access Algorithm (msSTART)." *IEEE Project 802.14 Working Group* Doc. IEEE802.14-96/117, May 1996

[23] C. Bisdikian, B. McNeil, R. Norman, R. Zeisz, "MLAP: A MAC Level Access Protocol for the HFC 802.14 Network." *IEEE Communications Magazine* Vol. 34, No. 3, March 1996, pp. 114–121

[24] C. Bisdikian, K. Maruyama, D.I. Seidman, D.N. Serpanos, "Cable Access Beyond the Hype: On Residential Broadband Data Services over HFC Networks." *IEEE Communications Magazine* Vol. 32, No. 11, Nov. 1996, pp. 128–135

[25] P. Bocker, *ISDN – Das diensteintegrierende digitale Nachrichtennetz*, Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 1987.

[26] G.J.A. Böcker, T.W.M. Mosch (Eds.), *High level specification.* RACE 2024 Deliverable 1, Commission of the European Community, RACE 2024 Broadband Access Facilities (BAF) Document Number R2024_ATT_W11_DS_I_001_b1, 1992.

[27] P.E. Boyer, M.J. Servel, F.P. Guillemin, "The SPACER-CONTROLLER: An Efficient UPC/NPC for ATM Networks." in *Proceedings of the XIV International Switching Symposium ISS'92* Yokohama, Japan, Oct. 1992, Paper A9.3

[28] F.M. Brochin, "A cell spacing device for congestion control in ATM networks." *Performance Evaluation* Vol. 16, 1992, pp. 107–127

[29] L. Burgstahler, *Simulation des Medienzugriffsprotokolls BPP für ATM-Zugangsnetze.* S1 Nr. 1315, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994

[30] D. Carballal, G. Salamanca, D. Deloddere, "Access Network Evolution." *Alcatel Telecommunications Review*, 3^{rd} Quarter 1996, pp. 166–175. Deutsche Ausgabe: "Die Evolution des Zugangsnetzes." *Alcatel Telecom Rundschau*, 3. Quartal 1996, S. 166–175.

[31] O. Casals, J. García, C. Blondia, "A Medium Access Control Protocol for an ATM Access Network." in *Proceedings of the Fifth International Conference on Data Communication Systems and their Performance, High Speed Networks*, Eds. H. Perros, Y. Viniotis, North Carolina, USA, Oct. 1993

[32] J. Charzinski, T. Theimer, "A Modified Global FIFO PDA Using Queue Length Information." RACE 2024 (BAF) Internal Document BAF-SWP2-UST-92007-CD-CC/a, Sep. 1992

[33] J. Charzinski, "Early Results from the Single Cell Based MAC Simulator." RACE 2024 (BAF) Internal Document BAF-SWP2-UST-93004-CD-CC/a, Sep. 1993

[34] J. Charzinski, "DQDB as an Access Network." RACE 2024 (BAF) Internal Document BAF-SWP2-UST-94004-CD-CC/a, Sep. 1994

[35] J. Charzinski, "Comparison of BPP with the Global FIFO BAF." RACE 2024 (BAF) Internal Document BAF-SWP2-UST-94011-CD-CC/b, Nov. 1994

[36] J. Charzinski, "A new approach to ATM access networks." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, 1996, pp. 108–119

[37] J. Charzinski, "Performance Analysis of a Multiple Access Mechanism for ATM Access Networks." in *Proceedings of the IEEE ATM'97 Workshop*, Lisboa, Portugal, May 1997, pp. 477–485

[38] J. Charzinski, J. Färber, J. Enssle, M. Frank, "The AMUSE Residential Multimedia Trials: Network Architecture and First Results." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 2: "Core and ATM Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 258–265

[39] J.S. Chow, J.C. Tu, J.M. Cioffi, "A Discrete Multitone Transceiver System for HDSL Applications." *IEEE Journal on Selected Areas in Communications* Vol. 9, No. 6, Aug. 1991, pp. 895–908

[40] M. Clarke, A. Findlay, J.-F. Canac, A. Vergez, in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 358–363

[41] A. Cook, J. Stern, "Optical Fiber Access – Perspectives Toward the 21st Century." *IEEE Communications Magazine* Vol. 32, No. 2, Feb. 1994, pp. 78–86

[42] Digital Audio-Visual Council (DAVIC), Specification Part 02 Version 1.2 *System Reference Models and Scenarios.* Revision 4.0 Geneva, Switzerland, 1997

[43] Digital Audio-Visual Council (DAVIC), Specification Part 08 Version 1.2 *Lower Layer Protocols and Physical Interfaces.* Revision 4.0 Geneva, Switzerland, 1997

[44] K. Diem, C. Lentner (Red.), *Documenta Geigy – Wissenschaftliche Tabellen* G. Thieme Verlag Stuttgart, 1975, S. 161 ff.

[45] C. Drewes, R. Hasholzner, J.S. Hammerschmidt, "Broadband Fixed Radio Access." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 122–129

[46] A.E. Eckberg, "The Single Server Queue with Periodic Arrival Process and Deterministic Service Times." *IEEE Transactions on Communications* Vol. COM-27, No. 3, March 1979, pp. 556–562

[47] F.J. Effenberger, K.W. Lu, "An Overview of FTTH Networks - Past History, Current Status, and Future Designs." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, 1996, pp. 293–304

[48] C.A. Eldering, "Customer Premises Equipment for Residential Broadband Networks." *IEEE Communications Magazine* June 1997, pp. 114–121

[49] J.W. Eng, J.F. Mollenauer, "IEEE Project 802.14: Standards for Digital Convergence." *IEEE Communications Magazine* May 1995, pp. 20–23

[50] D.W. Faulkner, D.B. Payne, J.R. Stern, J.W. Ballance, "Optical Networks for Local Loop Applications." *IEEE Journal of Lightwave Technology* Vol. 7, No. 11, Nov. 1989, pp. 1741–1750

[51] D. Faulkner, R. Mistry, T. Rowbotham, K. Okada, W. Warzanskyj, A. Zylbersztejn, Y. Picault, "The Full Services Access Networks Initiative." *IEEE Communications Magazine* Vol. 35, No. 4, April 1997, pp. 58–68

[52] R. Fielding, J. Gettys, J. Mogul, H. Frystyk, T. Berners-Lee, "Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1" *IETF Proposed Standard* RFC 2068, 1997

[53] P.-G. Fontolliet, *Telecommunication Systems*, Artech House, Dedham, MA, USA, 1986

[54] P.-A. Foriel, A. Fichou, "Connection-based multiplexers: an alternative for traffic shaping in ATM networks." in *Proceedings of the IEEE ATM'97 Workshop*, Lisboa, Portugal, May 1997, pp. 233–240

[55] J. Garcia, C. Blondia, O. Casals, F. Panken, "The Bundle-Spacer: A Cost Effective Alternative for Traffic Shaping in ATM Networks." in *Proceedings of the International Conference on Local and Metropolitan Communication Systems* Kyoto, Japan, Dec. 1994, pp. 177–196

[56] M.W. Garrett, "A Service Architecture for ATM: From Applications to Scheduling." *IEEE Network* Vol. 10, No. 3, May/June 1996, pp. 6–14

[57] A. Gerstlauer, „Simulation verschiedener Permit-Zuweisungsverfahren in einem ATM-Zugangsnetz." S1 Nr. 1303, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994

[58] M. Glade, H. Keller, "Novel Algorithm for Time Division Multiple Access in Broadband ISDN Passive Optical Networks." *International Journal of Digital and Analog Communication Systems* Vol. 6, No. 2, April 1993, pp. 55–62

[59] N. Golmie, S. Masson, G. Pieris, D. Su, "Performance evaluation of MAC protocol components for HFC networks." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, 1996, pp. 120–130

[60] R. Goyal, R. Jain, S. Kalyanaraman, S. Fahmy, S.-C. Kim, "UBR+: Improving Performance of TCP over ATM-UBR Service." Proceedings of ICC'97, June 1997

[61] R. Goyal, R. Jain, S. Fahmy, B. Vandalore, S. Kalyanaraman, S. Kota, P. Samudra, "GFR – Providing Rate Guarantees with FIFO Buffers to TCP Traffic." ATM Forum Document ATM_Forum/97-0831, Sep. 1997

[62] A. Gravey, "Temps d'attente et nombre de clients dans une file nD/D/1." *Annales de l'Institut Henri Poincaré*, Vol. 20, n° 1, 1984, p. 53–73

[63] R. Händel, M.N. Huber, *Integrated Broadband Networks – An Introduction to ATM Networks./* Addison-Wesley, 1991

[64] M. Hale, "A Comparison of Approaches to the Broadband Access/Core Interface." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 18–25

[65] R. Herber, H. Martin, "AMUSE – The next step towards multimedia services for residential users." in *Proceedings of NOC'96, Vol. 2: "ATM, Networks and LANs"*, Heidelberg, 1996, pp.184–190

[66] H. Hessenmüller et al., „Das europäische Projekt AMUSE – Der HFC-Feldversuch in München." *Der Fernmeldeingenieur* Sonderheft Jan./Feb. 1997 S. 1–51

[67] S. Hong, K.-B. Kim, T. Chung, "Design of a Hybrid Structure for the Broadband Subscriber Access Network." in *Proceedings of the Sixth International Network Planning Symposium (Networks'94)*, Budapest, Hungary, Sep. 1994, pp. 551–556

[68] H. Hultzsch, (Hrsg.), *Optische Telekommunikationssysteme*, Damm-Verlag KG Gelsenkirchen, 1996

[69] L.A. Ims, B.T. Olsen, D. Myhre, M. Lähteenoja, J. Mononen, U. Ferrero, A. Zaganiaris, "Multiservice Access Network Upgrading in Europe: A Techno-Economic Analysis." *IEEE Communications Magazine* Vol. 34, No. 12, Dec. 1996, pp. 124–134

[70] L.A. Ims, D. Myhre, B.T. Olsen, "Economics of Residential Broadband Access Network Technologies and Strategies." *IEEE Network* Vol. 11, No. 1, Jan./Feb. 1997, pp. 51–57

[71] Informationstechnische Gesellschaft (ITG) im VDE, Entwurf der ITG-Empfehlung 5.2-03 *Begriffe der Verkehrstheorie*, Jan. 1997

[72] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Standard 802.6-1990: *Local and Metropolitan Area Networks: Distributed Queue Dual Bus (DQDB) Subnetwork of a Metropolitan Area Network (MAN)*, 1990

[73] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Draft Standard 802.14. Eine offizielle Version dieses Standards wird für Mitte 1998 erwartet.

[74] Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Standard 1394-1995: *IEEE Standard for a High Performance Serial Bus*, 1995

[75] International Organization for Standardization (ISO), Standard ISO/IEC 7498-1 *Information technology – Open Systems Interconnection – Basic Reference Model*, 1994

[76] International Organization for Standardization (ISO), Document ISO/IEC 13818-1, *Information technology – Generic coding of moving pictures and associated audio information: Systems.*, 1996

[77] ITU-TSS, ITU-T Rec. G.960 *Access Digital Section for ISDN Basic Rate Access.* March 1993.

[78] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.327 *B-ISDN Functional Architecture.* March 1993.

[79] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.356 *B-ISDN ATM Layer Cell Transfer Performance* 1996.

[80] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.362 *B-ISDN ATM Adaptation Layer Functional Description.* March 1993.

[81] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.363 *B-ISDN ATM Adaptation Layer Specification.* March 1993.

[82] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.371 *Traffic control and congestion control in B-ISDN* 1996.

[83] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.411 *ISDN User-Network Interfaces – Reference Configurations.* March 1993.

[84] ITU-TSS, ITU-T Rec. I.432 *B-ISDN User-Network Interface – Physical Layer Specification.* March 1993.

[85] ITU-TSS, ITU-T Rec. Q.512 *Exchange Interfaces for Subscriber Access.* CCITT Blue Book, 1988

[86] K. Iversen, D. Hampicke, J. Mückenheim, "Feasibility of incoherent all-optical CDMA with 165 subscribers all active at data rates of 155 Mbit/s." in *Proceedings of NOC'96, Vol. 3: "Technology, Infrastructure, WDM Networks"*, Heidelberg, 1996, pp.109–116

[87] M. Iwashita, "A Study on Evaluation of Access Network Transition Scenarios." *IEICE Transactions on Communications* Vol. E79-B, No. 8, Aug. 1996, pp. 1101–1108

[88] K.S. Jacobsen, P.S. Chow, N. Zogakis, J.M. Cioffi, M. Costa, M.E. Britton, "Very High Bit Rate Digital Subscriber Lines (VDSL): An Effective Deployment Strategy for FTTC Utilizing the Existing Copper Network." in *Proceedings of the 7th International Workshop on Optical Access Networks*, Nürnberg, Sep. 1995, Paper 8.2

[89] R. Jain, I. Chlamtac, "The P^2 Algorithm for Dynamic Calculation of Quantiles and Histograms without Storing Observations." *Communications of the ACM* Vol. 28, No. 10, Oct. 1985, pp. 1076–1085

[90] R. Jain, "Congestion control and traffic management in ATM networks: Recent Advances and a survey." *Computer Networks and ISDN Systems* Vol. 28 No. 13, Oct. 1996, pp. 1723–1738

[91] M.J. Karol, Z. Liu, K.Y. Eng, "An efficient demand-assignment multiple access protocol for wireless packet (ATM) networks." *Wireless Networks* Vol. 1, 1995, pp. 267–279

[92] N. Kashima, *Optical Transmission for the Subscriber Loop.* Artech House, Boston, London 1993

[93] D.O. Keck, *Simulation eines Medienzugriffsprotokolls für ATM-Zugangsnetze.* S2 Nr. 1257, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994

[94] M.G. Kendall, A. Stuart, *The Advanced Theory of Statistics* Vol. 1: "Distribution Theory", 3rd Ed., Griffin & Co Ltd., London, 1969

[95] U. Killat, Editor, *Access to B-ISDN via PONs – ATM Communication in Practice.*, Wiley, Chichester and Teubner, Stuttgart, 1996

[96] H. Kocher, *Entwurf und Implementierung einer Simulationsbibliothek unter Anwendung objektorientierter Methoden.* 59. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1994

[97] A. Kolarov, S. Weinstein, "Flexible Bandwidth Allocation in Hybrid Fiber Coax Distribution Networks." in *Proceedings of the IEEE Global Telecommunications Conference (Globecom)* Singapore, Nov. 1995

[98] G. Komp, "The Telephone Network as a Transport Platform for Interactive Video Services." in *Proceedings of NOC'96, Vol. 1: "Broadband Superhighway"*, Heidelberg, 1996, pp.73–80

[99] E. Kreyszig, *Statistische Methoden und ihre Anwendungen*, Vandenhoek & Ruprecht, Göttingen, 1965

[100] H. Kröner, *Verkehrssteuerung in ATM-Netzen – Verfahren und verkehrstheoretische Analysen zur Zellpriorisierung und Verbindungsannahme.* 62. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1995

[101] P.J. Kühn, "Analysis of Switching System Control Structures by Decomposition." *Proceedings of the 9th International Teletraffic Congress (ITC-9)*, Vol. 2, Torremolinos, Spain, Oct. 1979

[102] P.J. Kühn, *Nachrichtenverkehrstheorie.* Vorlesung an der Universität Stuttgart, 1996/1997

[103] P.J. Kühn, T. Raith, P. Tran-Gia, "Methodik der stationären Systemsimulation." in [102]

[104] T.C. Kwok, "Residential Broadband Internet Services and Applications Requirements." *IEEE Communications Magazine* Vol. 35, No. 6, June 1997, pp. 76–83

[105] P. Linna, "Exploration of Broadband Radio Access – Project Objectives and First Results." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 106–113

[106] M. Mathis, J. Mahdavi, S. Floyd, A. Romanow, "TCP Selective Acknowledgment Options." *IETF Proposed Standard* RFC 2018, 1996.

[107] P. Mathys, P. Flajolet, "Q-ary Collision Resolution Algorithms in Random-Access Systems with Free or Blocked Channel Access." *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. IT-31, No. 2, March 1985, pp. 217–243

[108] L.F. Merakos, C. Bisdikian, "Delay Analysis of the n-Ary Stack Random-Access Algorithm." *IEEE Transactions on Information Theory*, Vol. 34, No. 5, Sep. 1988, pp. 931–942

[109] D.J.G. Mestdagh, C.M. Martin, “The Super-PON concept and its technical challenges.” in *Proceedings of IFIP Broadband Communications ’96*, Montreal, Canada, April 1996, pp. 333–345

[110] N. Miki, K. Kumozaki, “Time Division Multiple Access Protocol for a Fiber-Optic Passive Double Star Transport System.” *IEICE Transactions on Communication* Vol. E78-B, No. 7, July 1995, pp. 995–1001

[111] K. Onishi, K. Kaneuchi, H. Ishizaki, K. Yusa, “A PDS Optical Subscriber Transmission System.” *OKI Technical Review* Vol. 61, May 1995, pp. 27–32

[112] V.N. Padmanabhan, J.C. Mogul, “Improving HTTP latency.” *Computer Networks and ISDN Systems* Vol. 28, Dec. 1995, pp. 25–35

[113] F.J.M. Panken, “A TDMA Based Access Control Scheme for an ATM Passive Optical Tree Network.” in *Proceedings of IFIP Broadband Communications ’96* Montreal, Canada, April 1996, pp. 321–332

[114] F.J.M. Panken, “Multiple-access Over the Years.” *4^{th} IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks* Bradford, UK, July 1996, Tutorial Paper No. 4

[115] F.J.M. Panken, “A Mathematical Model to Evaluate the Performance of a Class of Centralized MAC Protocols.” in *Proceedings of the 4^{th} IFIP Workshop on Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks* Bradford, UK, July 1996, pp. 41/1–41/11

[116] F.J.M. Panken, *Design and performance evaluation of multiple-access protocols for ATM-based passive optical networks* Dissertation, Wiskunde en Informatica, Katholieke Universiteit Nijmegen. Thesis Publishers, Amsterdam, NL, 1997

[117] F.J.M. Panken, C. Blondia, O. Casals, J. García, “A MAC Protocol for ATM PONs Supporting Different Service Categories.” in V. Ramaswami, P. Wirth (Eds.), *Proceedings of ITC 15*, Washington D.C., June 1997, pp. 825–834

[118] N. Passas, L. Merakos, D. Skyrianoglou, “Traffic Scheduling in Wireless ATM Networks.” in *Proceedings of the IEEE ATM’97 Workshop*, Lisboa, Portugal, May 1997, pp. 391–400

[119] J. Petersen, “The Output Process of a System ND/D/1 with Time-Slotted Service in Steady State.” *AEÜ* Vol. 47, No. 5/6, Sep./Nov. 1993, pp. 386–389

[120] D. Petras, “Medium Access Control Protocol for wireless, transparent ATM access.” in *Proceedings of the IEEE Wireless Communication Systems Symposium* Long Island, NY, USA, November 1995

[121] D. Petras, A. Krämling, A. Hettich, "Air Interface of a Wireless ATM System." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 114–121

[122] J. Postel, "Transmission Control Protocol." *IETF Standard* STD 7 (RFC 793), 1981

[123] J. Postel, J. Reynolds, "File Transfer Protocol." *IETF Standard* STD 9 (RFC 959), 1985

[124] M. Pousa et al., "Fibre Based Architectures for Large Business Users." in *Proceedings of NOC'96 Vol. 1: "Broadband Superhighway"*, Heidelberg, 1996, pp. 151–157

[125] A. Quayle, "Broadband passive optical network media access control protocols." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on All-Optical Communication Systems: Architecture, Control and Network Issues II* Vol. 2919, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 268–278

[126] A. Quayle, "Can One Access Network Topology Satisfy Most Customers' and Operators' Requirements?" in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 150–156

[127] A. Quayle, S. Hughes, *The Home ATM Network.* ATM Forum Document 97-0401, April 1997

[128] H.-W. Ramke, "When narrowband just isn't enough." in *Siemens telcom report* Vol. 20, No. 3, 1997

[129] E.P. Rathgeb, *Verkehrsflüsse in ATM-Netzen – Modellierung und Analyse von Verkehrsquellen und Quellflußkontrollverfahren.* 51. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1991

[130] J.W. Roberts, Editor, *Performance evaluation and design of multiservice networks.* Final report of the COST 224 project, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 1991

[131] J.W. Roberts, J. Virtamo, "The superposition of periodic cell arrival processes in an ATM multiplexer." *IEEE Transactions on Communications* Vol. 39, No. 2, Feb. 1991, pp. 298–303

[132] L. Sachs, *Angewandte Statistik – Anwendung statistischer Methoden.* Springer-Verlag, Berlin, 7. Auflage 1992, S. 338

[133] K. Seki, Y. Sanada, Q. Wang, S. Kato, V.K. Bhargava, "A Wireless Multimedia Network on a Time Division Duplex CDMA/TDMA." *IEICE Transactions on Communication*, Vol. E78-B, No. 7, July 1995, pp. 1002–1014

[134] G. Siegmund, *ATM – Die Technik des Breitband-ISDN.* R.v.Decker's Verlag, Heidelberg, 2. Auflage, 1994.

[135] C. Sierens, R. Wolters, C. Botte, K. Krijntjes, "Alternative ATM-based Hybrid Fiber Coax Specifications and Emerging Standards." in *Proceedings of NOC'97 Vol. 1: "Broadband Access Networks"*, Antwerp, Belgium, June 1997, pp. 52–59

[136] M.A. Sirbu, D.P. Reed, F.E. Ferrante, "An Engineering and Policy Analysis of Fiber Introduction into the Residential Subscriber Loop." *IEEE Journal of Lightwave Technology* Vol. 7, No. 11, Nov. 1989, pp. 1876–1884

[137] L. Staalhagen, "A Comparison Between the OSI Reference Model and the B-ISDN Protocol Reference Model." *IEEE Network* Vol. 10, No. 1, Jan./Feb. 1996, pp. 24–33

[138] Telecommunications Industry Association (TIA), "Multimedia Premises Reference Architecture." Draft 1.0, September 1995

[139] T. Toniatti, "Performance evaluation of McFred protocol." RACE 2024 (BAF) Internal Document BAF-SWP2-IT-93207-CD-CC/b, Oct. 1993

[140] T. Toniatti, L. Verri, O. Casals, J. Garcia, C. Blondia, J. Angelopoulos, I. Venieris, "Performance of Shared Medium Access Protocols for ATM Traffic Concentration." *European Transactions on Telecommunications* Vol. 5, No. 2, Mar/Apr. 1994, pp. 219–226

[141] S. Topliss, D. Beeler, L. Altwegg, "Synchronization for Passive Optical Networks." *IEEE Journal of Lightwave Technology* Vol. 13, No. 5, May 1995, pp. 947–953

[142] P. Tran-Gia, *Analytische Leistungsbewertung verteilter Systeme.* Springer, Berlin, 1996

[143] U. Trick, J. Herbert, "AON versus PON." in *Proceedings of the 7th International Workshop on Optical Access Networks (OAN)*, Nürnberg, Sep. 1995, Paper 8.1

[144] M.O. van Deventer, J.D. Angelopoulos, J.J.M. Binsma et al., "Architectures for 100 km 2048 split SuperPONs from ACTS-PLANET." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on All-Optical Communication Systems: Architecture, Control and Network Issues II* Vol. 2919, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 242–251

[145] C.-J. van Driel, P.A.M. van Grinsven, "A Hybrid Multiplexing Scheme for Multi-Service Networks." in *Proceedings of SPIE Photonics East 1996 Conference on Broadband Access Systems* Vol. 2917, Boston, MA, USA, Nov. 1996, pp. 210–219

[146] C.-J. van Driel, P.A.M. van Grinsven, V. Pronk, W.A.M. Snijders, "The (R)evolution of Access Networks for the Information Superhighway." *IEEE Communications Magazine* Vol. 35, No. 6, June 1997, pp. 104–112

[147] Video Electronics Standard Association (VESA), "Network Protocol, Network Management, and Device Directory Services." VESA Home Network RFI Version 1.0, Feb. 1997

[148] J. Virtamo, "Idle and busy period distributions of an infinite capacity N*D/D/1 queue." in *Proceedings of the* 14^{th} *International Teletraffic Congress ITC 14*, Antibes Juan-les-Pins, France, June 1994, pp. 453–459

[149] E. Wallmeier, T. Worster, "The Spacing Policer, an Algorithm for Efficient Peak Bit Rate Control in ATM Networks." in *Proceedings of the XIV International Switching Symposium ISS'92* Yokohama, Japan, Oct. 1992, Paper A5.5

[150] R.C. Weast, S.M. Selby (Eds.), *Handbook of Tables for Mathematics* 4. Ed., The Chemical Rubber Co., Cleveland, OH, USA, 1970

[151] A. Weber, *Effizienz des Vielfachzugriffs auf paketorientierte Kanäle in Satellitensystemen für die globale Mobilkommunikation.* Dissertation, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1998

[152] T. Worster, "Modelling Deterministic Queues: The Leaky Bucket as an Arrival Process." in *Proceedings of the* 14^{th} *International Teletraffic Congress ITC 14*, Antibes Juan-les-Pins, France, June 1994, pp. 581–590

[153] O.W.W. Yang, "Performance comparison of some discrete service time systems." *Performance Evaluation* Vol. 23, No. 3, Sep. 1995, pp. 261–284

[154] A. Zaganiaris, D. Joram, E. Turpin, "Etudes technico-économiques des réseaux d'accès optiques dans des projets européens." *L'écho des Recherches* No. 160, 1995, pp. 3–14