

Universität Stuttgart

Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. P. J. Kühn

68. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten

**Modellierung und Leistungsuntersuchung eines
verteilten Video-On-Demand-Systems für
MPEG-codierte Videodatenströme mit
variabler Bitrate**

von

Jürgen Enssle

1998

D 93

© 1998 Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart
Druck: E. Kurz & Co., Druckerei + Reprografie GmbH., Stuttgart
ISBN 3-922403-78-6



University of Stuttgart

Institute of Communication Networks and Computer Engineering

Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. P. J. Kühn

68th Report on Studies in Congestion Theory

**Modeling and Performance Evaluation of a
Distributed Video On Demand System for
Variable Bit Rate MPEG Encoded
Video Data Streams**

by

Jürgen Enssle

1998

Modeling and Performance Evaluation of a Distributed Video On Demand System for Variable Bit Rate MPEG Encoded Video Data Streams

Summary

The fast generation, distribution and processing of digital information is getting increasingly important for business and leisure activities in modern societies. This development is driven by the continuing advances in computer technology, telecommunications and consumer electronics that result in more and more powerful magnetical, optical and semiconductor devices to store, transfer and process huge amounts of data. Additionally, a number of compression algorithms were developed within the last few years to reduce the vast amount of data necessary to describe continuous media and thus make the handling of digital audio and video economically feasible. Mainly the MPEG method, denoted after the *Moving Pictures Experts Group* that developed it, has prevailed since the standardization of MPEG-1 in 1993 by the ISO (*International Organization for Standardization*) due to its flexibility and high achievable compression ratio at different quality levels.

The digital storage of a considerable number of movies, even in compressed form, is still demanding for today's computer systems. To reduce the storage cost, generally a hierarchical storage architecture is applied consisting of tape drives, hard disks and solid state memory. The storage device for every movie is selected according to its selection rate and movies may be relocated when their selection rate changes. To increase the I/O-throughput and the availability of the video data on the hard disks, the data of many movies is striped over a number of disks and some redundant data is added in a so-called RAID (Redundant Array of Independent Disks) system.

To transfer different media with different quality of service requirements via a single high-speed communication network the B-ISDN (*Broadband Integrated Services Digital Network*) was standardized by the ITU (*International Telecommunication Union*) based on the ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) technique for transmission, multiplexing and switching. The ATM concept employs packet switching using small fixed size packets called cells to support virtual connections with constant or variable bit rates (VBR). Several connections may share the network resources, e.g. physical transmission links, using the asynchronous time division multiplexing scheme. The use of VBR connections in conjunction with the possibility to achieve a statistical multiplexing gain is especially interesting for the transmission of compressed video data, since the reduction of the temporal and spatial redundancy by an efficient compression scheme at a predefined quality of service level results in a VBR video data stream.

The sum of all these developments enables the digital authoring, processing, transfer and presentation of information using any combination of the media text, graphic, audio and video to create future networked services. One such service is video on demand. The success of a video on demand service, i. e. its acceptance by the users, depends on several factors. Besides the sociological and economical aspects regarding the contents selection, marketing, user interface design and pricing, the design of a cost-effective delivery infrastructure is a major success factor.

This thesis deals with modeling and performance evaluation issues arising from the provisioning of VBR MPEG encoded video data streams by a distributed video server and the transfer of the compressed video data over an ATM network. The first part of the thesis concentrates on the modeling of the stochastic properties of the video data streams and their multiplexing behavior. In the second part, the system model for a distributed video server with RAID storage nodes is developed that is used in conjunction with the MPEG video data stream model to investigate performance relevant system parameters and the overall performance of such a system.

Chapter 1 gives some background on recent technical advancements that motivated this work and provides an overview of the thesis.

Chapter 2 introduces the foundations for video communications over the B-ISDN. First, the basic principles of the MPEG compression algorithm to reduce the temporal and spatial redundancy of consecutive video pictures are introduced that affect the stochastic behavior of the resulting video data streams. Thereafter, some background information on the B-ISDN regarding its architecture, protocols and services and the ATM technique are provided. The last section of the chapter is devoted to the delivery infrastructure of a video on demand service. The delivery system components are introduced according to the DAVIC (Digital Audio-Visual Council) reference model, the architecture of the distributed video on demand server is illustrated and an overview on RAID systems with different RAID levels is provided.

Chapter 3 provides the mathematical and conceptual background used to model the VBR MPEG video data streams and the distributed video on demand server for performance evaluation purposes. The model of any technical system describes its essential general and abstract system attributes necessary to provide the desired functionality and can be considered an abstraction of the real system. The model has to be described in suitable mathematical, graphical or more or less formal textual form. Random phenomena common in computer and communication systems are modeled by random variables and stochastic processes, that are introduced in Chapter 3.1 and 3.2. The properties of a number of distributions and transformations used in the remaining chapters are summarized and correlation and stationarity measures are reviewed. Besides the choice of suitable random processes to model the random occurrences in a technical system, the exact estimation of their parameters is

essential for the accuracy of the model. Therefore, Subsection 3.2.4 is devoted to the estimation of statistical parameters from empirical observations. Consecutive picture sizes of VBR encoded video data exhibit long term correlations (long-range dependence), that can be modeled by self-similar (fractal) processes. Therefore, Section 3.3 is devoted to the definition of self-similar stochastic processes, methodologies to assess their fractal properties and the introduction of fractional Gaussian noise processes that will be used in the remainder of the thesis to model the long-range dependence property of the VBR MPEG video data streams. In Section 3.4, a hierarchical traffic modeling approach commonly used in ATM performance evaluation studies is presented and extended to suit the variability of the VBR video data streams. The basic structural components that are used to model the video server are outlined in Section 3.5. They are derived from queueing theory and Petri net elements to incorporate waiting, blocking and synchronization effects. Finally, Section 3.6 introduces the event driven simulation technique employed for the performance evaluation studies with special emphasis on the convergence of the results and their confidence intervals when using long-range dependent stochastic processes.

Chapter 4 contains the development of the model for the VBR MPEG video data streams. After a survey of various possibilities to model VBR encoded video data streams, the main stochastic properties of VBR MPEG encoded video data are described using an action movie as example. Emphasis is put on the separation of characteristics coming from the movie material and the MPEG compression technique. As expected, the different picture types used in the MPEG algorithm are clearly visible in the statistics trace since generally intra-coded pictures are larger than predictive coded pictures that again are larger than the bidirectionally predicted pictures. Thus the MPEG GOP (group of pictures) structure imposes a regular pattern on the consecutive picture sizes that is clearly visible in their empirical autocorrelation function. Additionally, the autocorrelation function exhibits a hyperbolically decaying component characteristic for long-range dependent processes that can be mainly attributed to the movie contents. The distribution function of the picture sizes is highly asymmetrical and difficult to model by a theoretical distribution, but the picture size distributions of the different picture types correspond very well with lognormal distributions. The above presented findings lead to the three level hierarchical model of Section 4.3 that spans the cell, picture and scene level of a VBR MPEG video data stream. The cell level is determined by the packetization algorithm, the picture level is dominated by the MPEG GOP structure and the lognormal picture size distributions. The scene level models the varying complexity of movie contents using an approximative implementation of a fractional Gaussian noise process called fast fractional Gaussian noise.

Chapter 5 is concerned with the multiplexing potential of the VBR MPEG video data streams in an ATM network environment. For that reason, a FIFO multiplexer with deterministic service rate and limited buffer size fed by a number of video data streams is introduced as a simple model for an ATM switch or concentrator. First, this multiplexer is used to

demonstrate that the model developed in Chapter 4 matches very well the behavior of the empirical data that was used to parameterize it in terms of the performance results obtained when multiplexing a number of such streams. Therefore, the multiplexing results obtained with the theoretical model are compared with trace driven simulations using the empirical picture sizes. Next, the hierarchical model is used to systematically investigate the impact of the parameters at the different levels on the multiplexing performance. At the cell level, the cell interarrival times should be smoothed as much as possible, i.e. at least for the duration of a picture, to minimize the cell loss probability at a given load and multiplexer buffer size. As the GOP pattern is periodic, the phase relation of the video data streams multiplexed together is decisive for the characteristics of the overall traffic offered. The cell loss probability at moderate buffer sizes and a constant load can be improved by several orders of magnitude by ideal phasing of the traffic streams compared to the worst case, when all video data streams are in phase. Even the gain when compared to random phase relations is very noticeable. Consequently, the admissible load at a predefined cell loss probability can be improved considerably if it is possible to manipulate the phase relation of the MPEG video data streams. For multiplexers that are able to buffer several thousand cells, the long-range dependence property (scene level) governs the cell loss level and the slope of the cell loss curve when increasing the buffer size. The stronger the long-range dependence of the video data streams the more the buffer has to be increased to achieve a certain cell loss reduction. Generally, it is observed that the most important time scale of the video data stream model that impacts the cell loss probability of the multiplexer closely corresponds with its buffer size that allows the multiplexer to experience a certain window of the data streams.

Chapter 6 is dedicated to the derivation and specification of the model for the distributed video server and its performance evaluation. In Section 6.1, the general system architecture of the distributed video on demand server is presented. It consists of a management node, a number of storage nodes and a couple of service nodes that are all interconnected via an ATM switching node. In the following, only storage nodes with RAID Level 0 disk farms will be considered, since tape libraries have to be staged by disks to overcome their long initial start-up delay whereas solid state memory devices do not encounter significant access delays. So essentially, the performance of the disk systems is responsible for the overall video server efficiency. The architecture and functionality of the service node, the ATM switching node and the RAID storage node are detailed in the next section. The service nodes are responsible for the timely delivery of their video data streams to the customer premises equipment. They have to request the video data from one of the storage nodes, buffer it and send it out picture by picture. The switching node is considered at the burst level using permanent virtual connections among the video server components. The RAID storage node incorporates the RAID control unit and a number of I/O-busses with their associated disks. The RAID control unit is responsible for the processing of the data requests from the service nodes. As the data is striped over many disks, it has to issue a number of disk requests, gather

the data coming from the disks and send it to the requesting service node when complete. The hand shake protocol that is used in the video server model to request and transfer the video data within the video server is given in Section 6.3. The systematic description of the video server model using the basic structural components introduced in Section 3.5 is explained in Section 6.4 and its parameters are summarized in Section 6.5. The video server model is constructed in an object-oriented way from independent building blocks of the different video server components that interact with each other using the protocol defined in Section 6.3. Additionally, the service node model includes the modeling of the user behavior regarding the selection probability for the available movies. Finally, the performance evaluation of the video server is detailed in Section 6.6. It is shown that an aggressive read-ahead strategy is beneficial for the disk performance. The benefit in terms of access delay and throughput is however limited by the disk cache size and the number of concurrent video data streams that have to be served. To maximize the performance of the disks, the read-ahead size has to be related to the disk request size. The disk request size again is a compromise between large requests that minimize the disk overhead and thus give good throughput and small requests that minimize the time span to read the data. The disk request size results from the RAID request size (the amount of data that is requested from the RAID storage node by a service node) and the striping unit size of the RAID system. The choice of a suitable striping unit size is of key importance for the overall system performance, because it is additionally responsible for the mean number of RAID requests that can be processed in parallel by the RAID storage node. All in all, it has a considerable impact on the time span necessary for the RAID storage node to process a RAID request and the achievable throughput. Finally, the overall performance of the video server model is investigated and statistical guarantees for the timely delivery of the video data to the customer are derived.

Chapter 7 at last holds the main achievements of the thesis and the conclusions as well as an outlook on further work.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	VI
Abbildungsverzeichnis	X
Tabellenverzeichnis	XV
Abkürzungen	XVII
Formelzeichen	XXI
1 Einleitung	1
1.1 Multimedia und Breitband-Kommunikation	1
1.2 Übersicht über die Arbeit	3
2 Videokommunikation über das Breitband-ISDN	5
2.1 Video-Datenkompression	5
2.1.1 Grundlagen der Bildcodierung	6
2.1.2 MPEG-Codierung	8
2.2 Grundlagen des Breitband-ISDN	13
2.2.1 Asynchroner Transfer-Modus	13
2.2.1.1 Zellformat	14
2.2.1.2 Asynchrone Zeitmultiplextechnik	16
2.2.2 B-ISDN-Protokollarchitektur	17
2.2.2.1 Protokoll-Referenzmodell des B-ISDN	17
2.2.2.2 Bitübertragungsschicht	18
2.2.2.3 ATM-Schicht	19

2.2.2.4	ATM-Anpassungsschicht	19
2.2.3	Charakteristika und Anforderungen zukünftiger Dienste	21
2.2.3.1	Dienstklassifikation für das B-ISDN	21
2.2.3.2	Dienstgüteeanforderungen verschiedener Darstellungsmedien	23
2.3	Video-On-Demand	25
2.3.1	Referenzmodell	26
2.3.2	Video-On-Demand-System	28
2.3.2.1	Architektur	28
2.3.2.2	RAID-Systeme	30
2.3.3	Teilnehmerendgeräte	32
3	Methoden der stochastischen Modellierung und Leistungsuntersuchung	34
3.1	Zufallsvariable	35
3.1.1	Definition, Verteilungen und Momente	35
3.1.2	Operationen auf Zufallsvariablen	39
3.1.2.1	Summen unabhängiger Zufallsvariablen	39
3.1.2.2	Zufällige Auswahl aus mehreren Zufallsvariablen	39
3.1.2.3	Funktion einer Zufallsvariablen (Merkmaltransformation)	40
3.2	Stochastische Prozesse	41
3.2.1	Definition und Verteilungen	41
3.2.2	Momente, Korrelation und Stationarität	43
3.2.3	Transformation eines stochastischen Prozesses	45
3.2.4	Schätzung statistischer Parameter	45
3.3	Selbstähnliche (fraktale) Prozesse und Langzeitkorrelation	48
3.3.1	Definitionen	48
3.3.2	Untersuchungsmethoden	50
3.3.2.1	Varianz-Zeit-Graph	50
3.3.2.2	R/S -Analyse	51
3.3.2.3	Periodogramm-Analyse	53
3.3.3	Modellierungsmöglichkeiten langzeitkorrelierter Prozesse	54

3.3.4	Fraktale Gauß-Prozesse	55
3.3.4.1	Definition	55
3.3.4.2	Näherungsverfahren	56
3.4	Hierarchische Verkehrsmodellierung	58
3.4.1	Charakterisierung der Verkehrsströme	60
3.4.2	Rufebene	60
3.4.3	Verbindungsebene	60
3.4.4	Burst-Ebene	61
3.4.5	Zellebene	62
3.5	Modellierung technischer Systeme	63
3.6	Simulationstechnik	65
3.6.1	Ereignisgesteuerte Simulation	66
3.6.2	Zeitliche Konvergenz der Erwartungswerte stochastischer Prozesse	68
4	Modellierung VBR-codierter Videodatenströme	72
4.1	Überblick über Modellierungsmöglichkeiten für VBR-Videodatenströme	72
4.2	Statistische Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme	75
4.2.1	Statistisches Basismaterial	76
4.2.2	Verteilungen	78
4.2.3	Autokorrelation	79
4.3	Hierarchisches Modell einer VBR MPEG-Videoquelle	81
4.3.1	Modellierung der Zellebene	82
4.3.2	Modellierung der Bildebene	83
4.3.3	Modellierung der Szenenebene	85
5	Leistungsuntersuchung eines statistischen ATM-Multiplexers	87
5.1	Modell eines statistischen ATM-Multiplexers	88
5.2	Validierung des hierarchischen Quellmodells	88
5.3	Multiplexen mehrerer VBR MPEG-Quellen	92
5.3.1	Zellebene	92
5.3.2	Bildebene	93
5.3.3	Szenenebene	95

6	Leistungsuntersuchung eines verteilten Video-On-Demand-Systems	98
6.1	Systemarchitektur	99
6.2	Architektur und Funktionalität der Systemkomponenten	100
6.2.1	Bedienstation	100
6.2.1.1	Aufbau	100
6.2.1.2	Management der Videodatenströme	101
6.2.1.3	Benutzerverhalten	103
6.2.2	Koppelnetz	104
6.2.3	RAID-System	105
6.2.3.1	Aufbau	105
6.2.3.2	Funktionen der RAID-Steuerung	106
6.2.4	Peripheriegerätebus	113
6.2.5	Festplatte	114
6.2.5.1	Magnetplattenspeicher	114
6.2.5.2	Controller	119
6.2.5.3	Halbleiterspeicher	119
6.3	Protokollarchitektur	122
6.4	Modellierung der Systemkomponenten	124
6.4.1	Bedienstation	126
6.4.2	Koppelnetz	128
6.4.3	RAID-Steuerung	129
6.4.4	Peripheriebus	131
6.4.5	Festplatte	133
6.5	Modellparameter	135
6.5.1	Bedienstation und Videofilmarchiv	136
6.5.2	Koppelnetz	137
6.5.3	RAID-Steuerung	138
6.5.4	Peripheriegerätebus	138
6.5.5	Festplatte	138
6.6	Leistungsuntersuchung und Dimensionierung	139

6.6.1	Festplatte	140
6.6.1.1	Ein Videodatenstrom	140
6.6.1.2	Mehrere Videodatenströme	144
6.6.2	RAID-System	147
6.6.2.1	Geringe Auslastung (10 Videodatenströme)	148
6.6.2.2	Hohe Auslastung (70 Videodatenströme)	152
6.6.2.3	Richtlinien für die Parameterwahl des RAID-Systems	156
6.6.2.4	Variable Auslastung bei günstiger Parameterwahl	157
6.6.3	Bedienstation	158
7	Zusammenfassung und Ausblick	161
	Literatur	166
A	Fraktale ARIMA-Prozesse	186
B	QQ- und PP-Plots der „Krieg der Sterne“-Daten	188
C	<i>R/S</i>-Analysen des hierarchischen Quellmodells	191
D	Mittlere Positionierdistanz eines Magnetplattenspeichers	193

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schritte der Bildcodierung	6
2.2	Vereinfachtes Blockdiagramm eines MPEG-Codierers	10
2.3	Verwendete GOP-Folge	11
2.4	Vereinfachtes Blockdiagramm eines MPEG-Decodierers	12
2.5	Struktur des ATM-Zellkopfes	14
2.6	Asynchrone Zeitmultiplextechnik	16
2.7	Protokoll-Referenzmodell des B-ISDN	17
2.8	Allgemeine Systemarchitektur für einen Video-On-Demand-Dienst	26
2.9	Komponenten eines verteilten Video-On-Demand-Systems	29
2.10	Datenverteilungsschema eines RAID-Systems (Beispiel)	30
2.11	Prototypisches Blockdiagramm eines MPEG-2-Transportstrom-Decodierers	33
3.1	Hierarchische Modellierung einer Verkehrsquelle	59
3.2	Modellierung der Burst-Ebene einer Videoquelle	62
3.3	Einfluß des Hurst-Parameters auf die Größe der Konfidenzintervalle des Mittelwertprozesses eines exakt fraktalen stochastischen Prozesses	71
3.4	Größe der Konfidenzintervalle des Mittelwertprozesses eines ffGn-Prozesses	71
3.5	Verlauf der Realisierungen der Mittelwertprozesse eines ffGn-Prozesses und einer unkorrelierten Folge von Zufallsvariablen	71
4.1	Bildgrößen-Sequenz („Krieg der Sterne“, kleiner Zeitmaßstab)	77
4.2	Bildgrößen-Sequenz („Krieg der Sterne“, großer Zeitmaßstab)	77
4.3	Empirische Verteilungsdichtefunktion der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen	78
4.4	Vergleich der komplementären Verteilungsfunktionen der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen mit Lognormalverteilungen	78
4.5	Vergleich der Autokorrelationskoeffizienten der Bildebene	79

4.6	Vergleich der Autokorrelationskoeffizienten der Szenenebene	79
4.7	R/S -Analyse der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen auf Bildebene	80
4.8	R/S -Analyse der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen auf Szenenebene	80
4.9	Varianz-Zeit-Graph der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen	81
4.10	Periodogramm-Analyse der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen	81
4.11	Hierarchisches MPEG-Quellmodell	81
4.12	Modell für die Bildgrößengenerierung	83
4.13	Modell für die Generierung des Szenenaktivitätsniveaus	86
5.1	Modell eines ATM-Multiplexers	88
5.2	Einfluß der Puffergröße einer Bedieneinheit mit konstanter Bediendauer auf die Zellverluste einer VBR MPEG-Quelle	89
5.3	Einfluß der Puffergröße eines Multiplexers auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit von 40 VBR MPEG-Quellen	90
5.4	Verteilungsdichtefunktion der Zellzwischenankunftsabstände des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms	93
5.5	Autokorrelationskoeffizient der Zellzwischenankunftsabstände des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms	93
5.6	Einfluß der Burst-Bitrate auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms	93
5.7	Einfluß der Phasenlage der VBR MPEG-Videodatenströme auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit eines Multiplexers	94
5.8	Einfluß der Puffergröße einer Bedieneinheit mit konstanter Bediendauer auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit einer VBR MPEG-Quelle bei verschiedenen Hurst-Parametern	95
5.9	Einfluß der Puffergröße eines Multiplexers auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit von VBR MPEG-Quellen mit verschiedenen Hurst-Parametern	96
6.1	Systemarchitektur des Video-On-Demand-Systems	99
6.2	Schematischer Aufbau der Bedienstation	101
6.3	Generierung eines RAID-Auftrags	102
6.4	Anforderung, Zwischenspeicherung und Ausspielen der Videodaten	103
6.5	Aufbau eines RAID-Speichersystems	105
6.6	Hardware-Architektur der RAID-Steuerung	106

6.7	Beispiel für die Anordnung der Sektoren, Blöcke und Streifeneinheiten eines RAID-Systems	107
6.8	Abbildung der logischen Festplattenadressen auf die physikalischen Festplatten eines RAID-Systems	108
6.9	Abbildung der Blockadressen in logische Festplatten- und Sektoradressen . .	109
6.10	Aufspaltung eines RAID-Auftrags in Festplattenaufträge	111
6.11	Erwartungswert der Anzahl der Festplattenaufträge je RAID-Auftrag	112
6.12	Erwartungswert der Größe eines Festplattenauftrags	112
6.13	Modellierungsrelevante Festplattenkomponenten	114
6.14	Beispiel für das Layout der Sektoren einer Festplatte	116
6.15	Einstellprofil einer Festplatte	118
6.16	Protokoll des Simulationsmodells	123
6.17	Realer Meldungsablauf RAID-Steuerung ↔ Festplatte	124
6.18	Architektur der Modellkomponenten des Videoservers	125
6.19	Modell einer Bedienstation	127
6.20	Modell eines Koppelnetzes	129
6.21	Modell einer RAID-Steuerung	130
6.22	Modell eines Peripheriebusses	132
6.23	Modell einer Festplatte	134
6.24	Einfluß der Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die mittlere Antwortzeit einer Festplatte	141
6.25	Einfluß der Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die maximale Antwortzeit einer Festplatte	141
6.26	Einfluß der Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die mittlere Cache-Trefferrate einer Festplatte	142
6.27	Einfluß der Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die Festplattenauslastung	142
6.28	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme, der minimalen Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die Cache-Trefferrate bei Bedienstrategie FIFO .	144
6.29	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme, der minimalen Auftragsgröße und der Read-Ahead-Größe auf die Cache-Trefferrate bei Bedienstrategie SCAN .	144
6.30	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme und der Bedienstrategie auf die mittlere Antwortzeit einer Festplatte	145

6.31	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme und der Bedienstrategie auf die mittlere Antwortzeit einer Festplatte	145
6.32	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme und der Bedienstrategie auf die maximale Antwortzeit bei einer Read-Ahead-Größe von 100 kbyte	146
6.33	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme und der Bedienstrategie auf die maximale Antwortzeit bei einer Read-Ahead-Größe von 50 kbyte	146
6.34	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Auslastung einer Festplatte unter der Bedienstrategie FIFO	146
6.35	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Auslastung einer Festplatte unter der Bedienstrategie SCAN	146
6.36	Einfluß der Größe der Streifeneinheit und der minimalen Größe der RAID-Aufträge auf die mittlere Auslastung der Festplatten (10 Videodatenströme)	148
6.37	Einfluß der Größe der Streifeneinheit und der minimalen Größe der RAID-Aufträge auf die mittlere Auslastung der Peripheriebusse (10 Ströme)	148
6.38	Einfluß der Größe der Streifeneinheit und der Größe der RAID-Aufträge auf die Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags (10 Videodatenströme)	149
6.39	Einfluß der Größe der Streifeneinheit und der minimalen Größe der RAID-Aufträge auf die Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags (10 Ströme)	149
6.40	95%-Quantil der Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags (10 Ströme)	150
6.41	95%-Quantil der Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags (10 Ströme)	150
6.42	Mittlerer Speicherbedarf des RAID-Systems (10 Videodatenströme)	151
6.43	95%-Quantil des Speicherbedarfs des RAID-Systems (10 Videodatenströme)	151
6.44	Maximaler Speicherbedarf des RAID-Systems (10 Videodatenströme)	151
6.45	Auslastung der Festplatten (70 Videodatenströme)	152
6.46	Auslastung der Peripheriebusse (70 Videodatenströme)	152
6.47	Mittlere Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags (70 Videodatenströme)	153
6.48	Mittlere Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags (70 Videodatenströme)	153
6.49	95%-Quantil der Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags (70 Ströme)	153
6.50	95%-Quantil der Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags (70 Ströme)	153
6.51	Maximale Bearbeitungszeit eines Festplatten- oder RAID-Auftrags (70 Videodatenströme)	154
6.52	Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Festplattenaufträge in der Warteschlange des Festplatten-Controllers (70 Videodatenströme)	154
6.53	Komplementäre Verteilungsfunktion der Anzahl wartender Festplattenaufträge des Festplatten-Controllers (70 Videodatenströme)	155

6.54	Mittlerer Speicherbedarf des RAID-Systems (70 Videodatenströme)	155
6.55	95%-Quantil des Speicherbedarfs des RAID-Systems (70 Videodatenströme)	155
6.56	Max. notwendiger Speicherbedarf des RAID-Systems (70 Videodatenströme)	155
6.57	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Auslastung der Festplatten und der Peripheriebusse	157
6.58	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die mittlere Cache-Trefferrate der Festplatten	157
6.59	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Bearbeitungszeiten der RAID- und Festplattenaufträge	158
6.60	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf den Speicherbedarf des RAID- Systems	158
6.61	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Bearbeitungszeit	159
6.62	Einfluß der Anzahl der Videodatenströme auf die Verteilungsdichtefunktion der Bearbeitungszeit der RAID-Aufträge	159
6.63	Einfluß der Ausspielverzögerung und der Anzahl der Videodatenströme auf die Bildverlustwahrscheinlichkeit	160
6.64	Einfluß der Ausspielverzögerung und der Anzahl der Videodatenströme auf den Speicherbedarf der Videodatenströme in der Bedienstation	160
B.1	PP-Plot der transformierten B-Bildgrößen	189
B.2	QQ-Plot der transformierten B-Bildgrößen	189
B.3	PP-Plot der transformierten P-Bildgrößen	189
B.4	QQ-Plot der transformierten P-Bildgrößen	189
B.5	PP-Plot der transformierten I-Bildgrößen	190
B.6	QQ-Plot der transformierten I-Bildgrößen	190
C.1	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,5$.	191
C.2	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,6$.	191
C.3	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,7$.	192
C.4	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,8$.	192
C.5	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,856$	192
C.6	R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,95$	192

Tabellenverzeichnis

2.1	Übertragungsreihenfolge der MPEG-Bilder	11
2.2	Funktionen der Schichten des Protokoll-Referenzmodells	18
2.3	Dienstklassen der ATM-Anpassungsschicht	20
2.4	Dienstgüteeanforderungen verschiedener Darstellungsmedien	23
2.5	Standardisierte Formate analoger und digitaler Fernsehbilder	24
3.1	Lineare Merkmaltransformation	40
3.2	Exponentielle Merkmaltransformation	41
3.3	Strukturkomponenten für die Modellierung technischer Systeme	64
4.1	Parameter der „Krieg der Sterne“-Sequenz	76
4.2	Statistische Kennwerte der „Krieg der Sterne“-Sequenz	77
4.3	Autokorrelationskoeffizienten der Bildebene für ein Modell mit iid Prozeß auf Szenenebene	85
5.1	Vergleich der Angebote der theoretischen Quellmodelle und der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen	91
6.1	Parameter des ffGn-Zufallszahlengenerators	136
6.2	Statistische Kenngrößen der Videofilme	136
6.3	Parameter der Videofilmarchive	137
6.4	Parameter des Koppelnetzes	137
6.5	Parameter der RAID-Steuerung	138
6.6	Parameter des Peripheriebusses	138
6.7	Parameter der Festplatte	139
6.8	Abhängigkeit der Leistung des RAID-Systems von der minimalen Größe der RAID-Aufträge	156

Abkürzungen

AAL	<i>ATM Adaptation Layer</i>
ACM	<i>Association for Computing Machinery</i>
ADSL	<i>Asymmetric Digital Subscriber Line</i>
ARIMA	<i>autoregressive integrated moving average</i>
ARMA	<i>autoregressive moving average</i>
ATDM	<i>asynchronous time-division multiplexing</i>
ATM	<i>Asynchroner Transfer-Modus (Asynchronous Transfer Mode)</i>
B-ISDN	<i>Broadband Integrated Services Digital Network</i>
CBR	<i>constant bit rate</i>
CCIR	<i>Comité Consultatif International des Radiocommunications</i>
CD	<i>Compact Disc</i>
CIF	<i>common interchange format</i>
CLP	<i>cell loss priority</i>
CPE	<i>Customer Premises Equipment</i>
CPS	<i>Content Provider System</i>
CPU	<i>central processing unit</i>
CS	<i>convergence sublayer</i>
CSCAN	<i>circular SCAN</i>
CSCW	<i>computer supported cooperative work</i>
DAT	<i>Digital Audio Tape</i>
DAVIC	<i>Digital Audio-Visual Council</i>
DCT	<i>discrete cosine transform (Diskrete Kosinustransformation)</i>
dfG _n	<i>discrete time fractional Gaussian noise</i>
EDF	<i>Earliest Deadline First</i>
fB _m	<i>fractional Brownian motion</i>
FEC	<i>forward error correction</i>
ffG _n	<i>fast fractional Gaussian noise</i>
fG _n	<i>fractional Gaussian noise</i>
FIFO	<i>First In First Out</i>
FITL	<i>Fiber in the Loop</i>
FTTB	<i>Fiber to the Building</i>
FTTC	<i>Fiber to the Curb</i>

FTTH	<i>Fiber to the Home</i>
Gbyte	2^{30} byte
GFC	<i>generic flow control</i>
GI	Gesellschaft für Informatik
GLOBECOM	<i>Global Telecommunications Conference</i>
GOP	Abfolge der Bildtypen in einer Gruppe von Bildern (group of pictures)
HDTV	<i>High Definition Television</i>
HEC	<i>header error control</i>
HFC	<i>hybrid fiber/coax</i>
ICC	<i>International Conference on Communications</i>
ICCC	<i>International Conference on Computer Communications</i>
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i>
iid	<i>independent identically distributed</i> (Folge von unabhängigen und gleichverteilten Zufallsvariablen)
IND	Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung
INFOCOM	<i>The Conference on Computer Communications</i>
ISDN	<i>Integrated Services Digital Network</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISS	<i>International Switching Symposium</i>
ITG	Informationstechnische Gesellschaft im VDE
ITC	<i>International Teletraffic Congress</i>
ITU	<i>International Telecommunication Union</i>
ITU-T	<i>Telecommunication Standardization Sector of ITU</i>
it+ti	Informationstechnik und Technische Informatik
IVOD	<i>Interactive Video On Demand</i>
JSAC	<i>Journal of Selected Areas in Communications</i>
kbit	10^3 bit
kbyte	2^{10} byte
LFU	<i>Least Frequently Used</i>
LRD	<i>long-range dependence</i>
LRU	<i>Least Recently Used</i>
Mbit	10^6 bit
Mbyte	2^{20} byte
MMPP	<i>Markov Modulated Poisson Process</i>
MPEG	<i>Moving Picture Experts Group</i>
NNI	<i>network-node interface</i>
NTG	Nachrichtentechnische Gesellschaft
NTSC	<i>National Television Systems Committee</i>
ntz	Nachrichtentechnische Zeitschrift
NVOD	<i>Near Video On Demand</i>

OAM	<i>operation and maintenance</i>
ONU	<i>optical network unit</i>
OSI	<i>open systems interconnection</i>
PAL	<i>Phase Alternating Line</i>
PC	<i>Personal Computer</i>
PDH	<i>Plesiochronous Digital Hierarchy</i>
PDU	<i>protocol data unit</i>
PES	<i>Packetized Elementary Stream</i>
PHY	<i>Physical Layer (Bitübertragungsschicht)</i>
PM	<i>physical medium</i>
PON	<i>passive optical network</i>
PS	<i>Program Stream</i>
PT	<i>payload type</i>
PTI	<i>payload type identifier</i>
Q-CIF	<i>quarter-common interchange format</i>
QOS	<i>quality of service</i>
RAID	<i>Redundant Array of Inexpensive (Independent) Disks</i>
RAM	<i>Random Access Memory</i>
RISC	<i>Reduced Instruction Set Computer</i>
ROM	<i>Read Only Memory</i>
RR	<i>Random Replacement</i>
SAP	<i>service access point</i>
SAR	<i>segmentation and reassembly</i>
SCAN	Bedienstrategie der Festplatte, bei der die wartenden Anforderungen nach dem Fahrstuhlprinzip bedient werden
SCS	<i>Service Consumer System</i>
SCSI	<i>Small Computer Systems Interface</i>
SDH	<i>Synchronous Digital Hierarchy</i>
SDU	<i>service data unit</i>
SIF	<i>source input format</i>
SONET	<i>Synchronous Optical Network</i>
SPIE	<i>The International Society for Optical Engineering</i>
SPS	<i>Service Provider System</i>
SSTF	<i>Shortest Seek Time First</i>
STB	Set-Top-Box
STDM	<i>synchronous time-division multiplexing</i>
SVB	<i>Switched Video Broadcast</i>
SVOD	<i>Staggered Video-On-Demand</i>
Tbyte	2 ⁴⁰ byte
TC	<i>transmission convergence</i>
TES	<i>Transform-Expand-Sample</i>

TS	<i>Transport Stream</i>
TSS	<i>Telecommunication Standardization Sector</i>
UNI	<i>user-network interface</i>
VBR	<i>variable bit rate</i>
VC	<i>virtual channel</i>
VCI	<i>virtual channel identifier</i>
VDE	Verband Deutscher Elektrotechniker e. V.
VOD	Video-On-Demand
VP	<i>virtual path</i>
VPI	<i>virtual path identifier</i>
ZBR	<i>zone bit recording</i>

Formelzeichen

Allgemeines

$\lfloor x \rfloor$	Größte ganze Zahl kleiner oder gleich x
$\lceil x \rceil$	Kleinste ganze Zahl größer oder gleich x
$]x_u, x_o[$	Offenes Intervall ($x_u < x < x_o$)
$[x_u, x_o]$	Geschlossenes Intervall ($x_u \leq x \leq x_o$)
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
\emptyset	Leere Menge
$\bar{\mathcal{X}}$	Komplementäre Menge von \mathcal{X}
$\mathcal{X} \times \mathcal{Y}$	Produktmenge der Mengen \mathcal{X} und \mathcal{Y}
$\mathbf{P}(\mathcal{X})$	Potenzmenge der Menge \mathcal{X}
$*$	Faltungsoperator
∇	Differenzenoperator ($\nabla X_t = X_t - X_{t-1}$)
ϕ	Schiebeoperator ($\phi X_t = X_{t-1}$)

Quellmodelle und Wahrscheinlichkeitsrechnung

$AR(n)$	Autoregressiver Prozeß n -ter Ordnung
B	Parameter des ffGn-Prozesses (Basis)
$B(t)$	Brownscher Bewegungsprozeß (Bachelier-Prozeß, Wiener-Prozeß, <i>Brownian motion random process</i>)
$B_H(t)$	Fraktaler Brownscher Bewegungsprozeß (fraktaler Gauß-Prozeß, <i>fractional Brownian motion</i>)
$\Delta B_H(t)$	Diskretes fraktales weißes Rauschen (<i>discrete time fractional Gaussian noise</i> , dfGn)
\hat{C}_k	Empirische Autokovarianz einer Stichprobe für eine Distanz von k Beobachtungen
$C_{XX}(t_1, t_2)$	Autokovarianz eines stochastischen Prozesses $X(t)$ zu den Zeitpunkten t_1 und t_2
$\text{Exp}(\beta)$	Negativ-exponentielle Verteilung mit Erwartungswert β und Varianz β^2

$F_X(x)$	Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen X
$F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n)$	n -dimensionale Verteilungsfunktion eines stochastischen Prozesses $X(t)$
$F_X^c(x)$	Komplementäre Verteilungsfunktion der Zufallsvariablen X
$\hat{F}(x)$	Summenlinie einer empirischen Verteilungsfunktion
$\hat{F}_n(x_{(i)})$	Empirische Verteilungsfunktion einer Stichprobe mit Umfang n
$\bar{F}(x)$	Empirische Verteilungsfunktion einer Stichprobe mit Klassenbildung
$\bar{F}^c(x)$	Komplementäre empirische Verteilungsfunktion einer Stichprobe mit Klassenbildung
$\{G_t\}, G(t)$	Zeitserie aus unabhängigen standardnormalverteilten Zufallsvariablen
$G(\alpha, \beta)$	Gamma-Verteilung mit Mittelwert $\alpha\beta$ und Varianz $\alpha\beta^2$
$G(X)$ oder $G[X(t)]$	Reelle Funktion der Zufallsvariablen X oder eines stochastischen Prozesses $X(t)$
$\text{Geo}(p)$	Geometrische Verteilung mit Erwartungswert $(1-p)/p$ und Varianz $(1-p)/p^2$
$I_{n, \{x_i\}}(\omega_k)$	Periodogramm einer Stichprobe $\{x_i\}$ mit Umfang n
$LN(\mu, \sigma^2)$	Logarithmische Normalverteilung mit Mittelwert $e^{\mu+\sigma^2/2}$ und Standardabweichung $e^{2\mu+\sigma^2}(e^{\sigma^2}-1)$
$N(\mu, \sigma^2)$	Normalverteilung mit Mittelwert μ und Standardabweichung σ
$N(n_{\text{ffGn}})$	Anzahl der Markoff-Gauß-Prozesse eines ffGn-Prozesses
$\text{Pareto}(\alpha, x_0)$	Paretoverteilung mit Minimalwert x_0 und Parameter α
$P\{X \leq x\}$	Wahrscheinlichkeit, daß die Zufallsvariable X eine Realisierung kleiner oder gleich x annimmt
$P(\mathcal{X})$	Wahrscheinlichkeit, daß das Ereignis \mathcal{X} eintritt
Q	Parameter des ffGn-Prozesses (Qualität)
$R(t, s)$	<i>Sample sequential range</i> einer Stichprobe $\{x_i\}$ für die Beobachtungen x_{t+1} bis x_{t+s}
$R(t, s)/S(t, s)$	<i>rescaled adjusted range</i>
\hat{R}_k	Empirische Autokorrelation einer Stichprobe für eine Distanz von k Beobachtungen
$R_X(t, s)$	<i>Population cumulative range</i> des stochastischen Prozesses X zur Zeit t mit der Intervallänge s
$R_{XX}(t_1, t_2)$	Autokorrelation eines stochastischen Prozesses $X(t)$ zu den Zeitpunkten t_1 und t_2
$S(t, s)$	Sequentielle Standardabweichung einer Stichprobe $\{x_i\}$ für die Beobachtungen x_{t+1} bis x_{t+s}
$T_{\text{on}}(t), T_{\text{off}}(t)$	Dauer der On- und Off-Phasen bei der Videodatenübertragung im Blockmodus
\mathbf{T}	Transformationsoperator auf einen stochastischen Prozeß

$U(a, b)$	Gleichverteilung auf dem Intervall $[a, b]$
Weibull(α, β)	Weibull-Verteilung mit Parameter α und β
$X(\xi)$	Reelle eindimensionale Zufallsvariable
$X(t, \xi), X(t)$	Stochastischer Prozeß
$X_f(t, H)$	ffGn-Prozeß mit Hurst-Parameter H
$X_f^{**}(t, H)$	Mittelwertprozeß des ffGn-Prozesses $X_f(t, H)$
$X_h(t, H)$	Hochfrequenter Anteil eines ffGn-Prozesses mit Hurst-Parameter H
$X_l(t, H)$	Niederfrequenter Anteil eines ffGn-Prozesses mit Hurst-Parameter H
$X_{MG}(t, r)$	Markoff-Gauß-Prozeß mit Korrelationsparameter r
$\{X_t\} = \{X_1, X_2, \dots\}$	Stochastischer Prozeß mit diskreter Zeit (Folge von Zufallsvariablen, Zeitserie)
$\{X_t^{(m)}\}$	Aggregierter Prozeß über m Zufallsvariablen des diskreten stochastischen Prozesses $\{X_t\}$
$\{X_t^{**}\}$	Summenprozeß über t Zufallsvariablen des diskreten stochastischen Prozesses $\{X_t\}$
$\{X_t^{**}\}$	Mittelwertprozeß über t Zufallsvariablen des diskreten stochastischen Prozesses $\{X_t\}$
$E[X], E[X(t)], \overline{X(t)}$	Mittelwert (1. gewöhnliches Moment) der Zufallsvariablen X oder des stochastischen Prozesses $X(t)$
$\text{VAR}[X], \text{VAR}[X(t)]$	Varianz (2. zentrales Moment) der Zufallsvariablen X oder des stochastischen Prozesses $X(t)$
W_k	Summationskoeffizient des ffGn-Prozesses
c_X	Variationskoeffizient der Zufallsvariablen X
f_i	Mittlere relative Häufigkeitsdichte der Klasse i einer Stichprobe
$f_X(x)$	Verteilungsdichtefunktion der Zufallsvariablen X
$f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n)$	n -dimensionale Verteilungsdichtefunktion eines stochastischen Prozesses $X(t)$
$\tilde{f}(x)$	Empirische Verteilungsdichtefunktion einer Stichprobe
h_i	Relative Häufigkeit der Klasse i einer Stichprobe
k	Zählindex
m_k	k -tes gewöhnliches Moment der Zufallsvariablen X
n	Anzahl der Beobachtungen einer Stichprobe (Umfang der Stichprobe)
n_{ffGn}	Anzahl der gewünschten Zufallszahlen des ffGn-Prozesses
$p_X(x)$	Verteilung der diskreten Zufallsvariablen X
$p_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n)$	n -dimensionale Verteilung eines stochastischen Prozesses $X(t)$
q_i	Wahrscheinlichkeit für das Auftreten der i kleinsten Beobachtungen einer Stichprobe

r	Autokovarianz aufeinanderfolgender Zufallsvariablen eines Markoff-Gauß-Prozesses
\hat{r}_k	Empirischer Autokorrelationskoeffizient (empirische Autokorrelationsfunktion) einer Stichprobe oder Musterfunktion eines stochastischen Prozesses für eine Distanz von k Beobachtungen
$r_{XX}(t_1, t_2)$	Autokorrelationskoeffizient eines stochastischen Prozesses $X(t)$ zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 (Autokorrelationsfunktion)
$r_{XX}(\tau)$	Autokorrelationskoeffizient eines kovarianzstationären stochastischen Prozesses $X(t)$ für ein Intervall der Länge τ (Autokorrelationsfunktion)
t	Beliebiger Zeitpunkt
t_i	Fester oder spezieller Zeitpunkt ($i \in N$)
$\{x_i\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$	Menge der Beobachtungen eines stochastischen Prozesses $X(t, \xi_0)$ oder einer empirischen Meßreihe zu den Zeitpunkten $t_i, i = 1, 2, \dots, n$ (Stichprobe)
$\{x_{(i)}\} = \{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}\}$	Menge der nach der Größe sortierten Beobachtungen eines stochastischen Prozesses $X(t, \xi_0)$ oder einer empirischen Meßreihe vom Umfang n mit $x_{(i)} \leq x_{(i+1)}$ für alle Zeitpunkte $t_i, i = 1, 2, \dots, n - 1$
$\{x_i^{(m)}\}$	Menge der Mittelwerte über m Beobachtungen eines stochastischen Prozesses $X(t, \xi_0)$ oder einer empirischen Meßreihe zu den Zeitpunkten $t_i, i = 1, 2, \dots, n$ (Mittelwertstichprobe)
$x^*(t)$	Summe der ersten t Beobachtungen einer Stichprobe
\hat{x}	Empirischer Mittelwert einer Stichprobe
x_{q_i}	q_i -Quantil einer Verteilung
Δx	Intervalllänge (Klassenbreite) einer Stichprobe
$\Gamma(\alpha)$	Gamma-Funktion
α	Schrägekoeffizient der normalisierten geometrischen Verteilung
γ	Konfidenzniveau
$\zeta_x(\omega_k)$	Diskrete Fouriertransformation der Stichprobe $\{x_i\}$
μ_k	k -tes zentrales Moment der Zufallsvariablen X
ξ	Ergebnis eines Zufallsexperiments
$\hat{\sigma}$	Empirische Standardabweichung einer Stichprobe (zur Vermeidung von Mehrdeutigkeiten kennzeichnet ein Index die Stichprobe)
$\hat{\sigma}_{iid}$	Empirische Standardabweichung einer unkorrelierten Stichprobe
σ_X	Standardabweichung der Zufallsvariablen X
τ	Zeitintervall
\mathcal{F}	Auswahl von Teilmengen eines Zufallsexperiments
\mathcal{S}	Menge aller Ergebnisse ξ eines Zufallsexperiments

\mathcal{T}	Menge der Zeitpunkte, auf der ein stochastischer Prozeß definiert ist
\mathcal{W}	Wertebereich einer Zufallsvariablen oder eines stochastischen Prozesses

Multiplexer

A	Angebot
$L_Z = 424$ bit	Größe einer ATM-Zelle
L_{NL}	Nutzlast einer ATM-Zelle
N_{Mux}	Anzahl der Quellen eines statistischen Multiplexers
R_L	Linkbitrate
S	Puffergröße eines statistischen Multiplexers
$T_{A,z}$	Zellzwischenankunftsabstand
V_z	Zellverlustwahrscheinlichkeit
Δt	Übertragungsdauer einer ATM-Zelle

Videodatenströme

N_{MPEG}	Abstand der I-Bilder eines MPEG-Videodatenstroms (Länge der GOP-Folge)
M_{MPEG}	Abstand der I- und P-Bilder eines MPEG-Videodatenstroms
$X_b(t)$	Stochastischer Prozeß für die Beschreibung der Größe eines codierten Videobilds
$X_s(t)$	Stochastischer Prozeß für die Beschreibung der Größe eines auf Szenenebene transformierten Videobilds
$X_z(t)$	Stochastischer Prozeß für die Beschreibung der ATM-Zellzwischenankunftsabstände eines Videodatenstroms
R	Bitrate eines Videodatenstroms
$R_z(t)$	Mittlere Bitrate eines Videodaten-Zellstroms für das Bild t im deterministischen Modus
$R_{z,on}$	Blockbitrate eines Videodaten-Zellstroms im Blockmodus
$T_{off}(t), T_{on}(t)$	Dauer der On- und Off-Phasen für die Übermittlung des Bildes t im Blockmodus
f_b	Bildfrequenz
n_k	Umfang der Stichprobe der Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ vom Typ $k \in \{I, P, B\}$
n_{sw}	Umfang der Stichprobe der Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“
p_B, p_I, p_P	Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten eines B-, I- oder P-Bildes innerhalb der GOP-Folge

$p_{ij}^{(\tau)}$	Wahrscheinlichkeit, daß ein Bild des Typs i in der Distanz von τ Bildern ein Bild des Typs j als Nachfolger hat mit $i, j \in \{I, P, B\}$
$\{x_{sw,b,i}\}$	Stichprobe der empirischen Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ (<i>Star Wars</i>) mit $i \in \{1, 2, \dots, n_{sw}\}$
$\{x_{sw,s,i}\}$	Stichprobe der empirischen, auf Szenenebene transformierten Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ mit $i \in \{1, 2, \dots, n_{sw}\}$
$\{x_{I,b,i}\}, \{x_{P,b,i}\}, \{x_{B,b,i}\}$	Menge der empirischen Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ vom Typ k mit $i \in \{1, 2, \dots, n_k\}, k \in \{I, P, B\}$
$\{x_{I,s,i}\}, \{x_{P,s,i}\}, \{x_{B,s,i}\}$	Menge der empirischen, auf Szenenebene transformierten Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ vom Typ k mit $i \in \{1, 2, \dots, n_k\}, k \in \{I, P, B\}$
ΔT	Darstellungsdauer eines Videobilds

Videoserver

Allgemeines

L_V	Länge eines Videofilms
N_A	Größe des Videoarchivs, über das eine Bedienstation verfügt
N_{AB}	Anzahl der Videobilder im Videoarchiv, über das eine Bedienstation verfügt
N_B	Anzahl der Bedienstationen des Videoservers
N_{Bl}	Größe eines Blocks
N_S	Anzahl der Speicher-Systeme des Videoservers
N_R	Anzahl der RAID-Systeme des Videoservers
N_{Sk}	Größe eines Sektors
N_{SPB}	Anzahl der Sektoren pro Block

Bedienstation

N_{BM}	Größe des Videospeichers (RAM) in Blöcken
N_{BV}	Anzahl der Videoströme, die durch eine Bedienstation parallel bedient werden
N_{BF}	Anzahl der Videofilme, die für eine Bedienstation verfügbar sind
T_{BAV}	Zeitkonstante zwischen einem RAID-Auftrag und dem Beginn der Übertragung des ersten Videobildes dieser Anforderung über das ATM-Netz (Ausspielverzögerung)
T_{BMC}	Zeitspanne für die Überprüfung, ob die vom RAID-System bereitgestellten Daten im Videodatenspeicher der Bedienstation Platz haben

T_{BR}	Zeitspanne zwischen aufeinanderfolgenden Videodatenanforderungen an ein RAID-System für einen Videodatenstrom der Bedienstation
T_{BRA}	Zeitspanne vom Abschicken eines RAID-Auftrags bis zum Bereitstellen aller Daten des RAID-Auftrags im Video-RAM der Bedienstation (Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags durch den Videoserver)
T_{BW}	Wartezeit einer Daten bereit-Anforderung
V_B	Bildverlustwahrscheinlichkeit durch zu spät eintreffende Videodaten der RAID-Aufträge
n_{BM}	Gespeicherte Anzahl der Blöcke aller Videodatenströme einer Bedienstation in deren Video-RAM
n_{BMV}	Gespeicherte Anzahl der Blöcke eines Videodatenstroms in einer Bedienstation
n_{BV}	Anzahl der Blöcke im Videodatenpeicher, die nach der Übertragung eines Videobildes nicht mehr benötigt werden
n_{BVB}	Anzahl der Videobilder, die durch einen RAID-Auftrag vom RAID-System zur Bedienstation übertragen werden
$p_{BF}(i)$	Wahrscheinlichkeit, daß durch einen Benutzer der Videofilm mit der Nummer i ausgewählt wird

Koppelnetz

C_{KB}	Burst-Bitrate zur Übertragung der Daten eines Videodatenstroms
C_{KV}	Nutzbitrate der Verbindung zwischen einer Bedienstation und einem RAID-System
N_{KA}	Maximale Anzahl gleichzeitiger Verbindungen zwischen einer Bedienstation und einem RAID-System
T_{KD}	Ende-zu-Ende Verzögerung einer Verbindung
T_{KT}	Übertragungszeit eines Auftrags
T_{KW}	Wartezeit eines Verbindungsauftrags

RAID-System

N_{RB}	Gesamtzahl der Blöcke aller Festplatten des RAID-Systems
N_{RBS}	Anzahl der Blöcke pro Streifeneinheit
N_{RF}	Anzahl der Festplatten des Raid-Systems
N_{RM}	Größe des Videodatenpeichers (Video-RAM) in Sektoren
N_{RP}	Anzahl der Peripheriebusse eines RAID-Systems
N_{RS}	Gesamte Anzahl der Streifeneinheiten aller Festplatten eines RAID-Systems
N_{RSF}	Anzahl der Streifeneinheiten pro Festplatte = Anzahl der Streifen des RAID-Systems

N_{RSS}	Anzahl der Sektoren pro Streifeneinheit
N_{RV}	Anzahl der Videodatenströme eines RAID-Systems
T_{RA}	Zeitspanne für die Bearbeitung einer RAID-Anforderung
T_{RMC}	Zeitspanne für die Überprüfung, ob die von einer Festplatte bereitgestellten Daten im Speicher des RAID-Systems Platz haben
T_{RD}	Zeitspanne für die Bearbeitung einer Datenübertragung aus dem Speicher des RAID-Controllers
T_{RFA}	Zeitdauer vom Abschicken der Meldung Busauftrag RAID-Steuerung bis zum Bereitstellen der Daten von der entsprechenden Festplatte im Video-RAM des RAID-Systems (Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags)
T_{RRA}	Zeitspanne zwischen dem Abschicken der Meldung Busauftrag RAID-Steuerung und dem Zeitpunkt, zu dem alle Daten des RAID-Auftrags im Video-RAM des RAID-Systems bereitliegen (Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags durch das RAID-System)
T_{RW}	Wartezeit eines Daten bereit-Auftrags
X_{RB}	Adresse eines Blocks ($X_B \in \{1, 2, \dots, N_{RB}\}$)
X_{RBS}	Blocknummer innerhalb einer Streifeneinheit mit $X_{RBS} \in \{1, 2, \dots, N_{RBS}\}$
X_{RF}	Logische Festplattenadresse ($X_{RF} \in \{1, 2, \dots, N_{RF}\}$)
X_{RP}	Adresse eines Peripheriebusses eines RAID-Systems mit $X_{RP} \in \{1, 2, \dots, N_{RP}\}$
X_{RS}	Nummer einer Streifeneinheit ($X_{RS} \in \{1, 2, \dots, N_{RS}\}$)
X_{RSF}	Nummer der Streifeneinheit einer Festplatte = Nummer des entsprechenden Streifens des RAID-Systems
n_{RA}	Anzahl der Blöcke einer RAID-Anforderung
$n_{RA,min}$	Minimalzahl der Blöcke einer RAID-Anforderung
n_{RF}	Anzahl der Festplattenaufträge, die durch <i>striping</i> aus einem RAID-Auftrag durch die RAID-Steuerung erzeugt werden
n_{RM}	Anzahl der Sektoren im Video-RAM mit $0 \leq n_{RM} \leq N_{RM}$

Peripheriebus

N_{PF}	Anzahl der Festplatten eines Peripheriebusses
T_{PR}	Zeitspanne für die Reservierung des freien Busses (Reservierungszeit)
T_{PT}	Übertragungszeit einer Anforderung
T_{PW}	Wartezeit eines Busauftrags
X_{PF}	Adresse der Festplatte eines Peripheriebusses mit $X_{PF} \in \{1, 2, \dots, N_{PF}\}$
λ_P	Datenübertragungsrate des Peripheriebusses
ρ_P	Mittlere Auslastung des Peripheriebusses

Festplatte

N_{FC}	Größe des Festplatten-Caches
N_{FP}	Anzahl der Platten der Festplatte
N_{FS}	Gesamtzahl der Sektoren der Festplatte
$N_{FSS,i}$	Anzahl der Sektoren einer Spur der innersten Zone
N_{FSS}	Anzahl der Sektoren pro Spur
$N_{FSS,a}$	Anzahl der Sektoren einer Spur der äußersten Zone
N_{FZ}	Anzahl der Zylinder der Festplatte
N_{FZo}	Anzahl der Zonen der Festplatte
T_{FA}	Antwortzeit der Festplatte
T_{FBF}	Zeit, die der Festplatten-Controller benötigt, bis er den Peripheriebus nach einer Festplattenanforderung wieder freigibt (Busfreigabezeit)
T_{FCO}	Bearbeitungszeit des Festplatten-Controllers für eine Festplattenanforderung
T_{FD}	Datenlesezeit des Magnetplattenspeichers für das Lesen der gewünschten n_{FD} Sektoren
T_{FE}	Einstellzeit des Arms des Magnetplattenspeichers
$T_{FE,min}$	Minimale Einstellzeit des Arms des Magnetplattenspeichers (<i>track switch time</i>)
$T_{FE,max}$	Maximale Einstellzeit des Arms des Magnetplattenspeichers (<i>full stroke time</i>)
T_{FKW}	Zeitspanne zum Wechseln von einem Lese-Schreibkopf auf den nächsten (Kopfwechselzeit)
T_{FL}	Latenzzeit des Magnetplattenspeichers
T_{FRA}	Lesezeit des Festplattenmechanismus für die Sektoren des Read-Ahead
T_{FSW}	Zeitspanne eines Spurwechsels (Spurwechselzeit)
T_{FU}	Umdrehungszeit des Magnetplattenspeichers
T_{FW}	Wartezeit eines Festplattenauftrags
X_{FS}	Adresse eines Sektors ($X_{FS} \in \{1, 2, \dots, N_{FS}\}$)
f_{Zo}	Zonenfaktor der Festplatte
n_F	Drehzahl des Magnetplattenspeichers
n_{FA}	Anzahl der Sektoren eines Festplattenauftrags
$n_{FA,i}$	Anzahl der Sektoren des Festplattenauftrags Nummer i ($i \in \{1, 2, \dots, n_{RF}\}$)
n_{FC}	Anzahl der Sektoren eines Festplattenauftrags, die im Festplatten-Cache vorrätig sind
n_{FD}	Anzahl der Sektoren eines Festplattenauftrags, die nicht im Festplatten-Cache vorrätig sind, also vom Magnetplattenspeicher gelesen werden müssen
n_{FE}	Einstelldistanz in Zylindern, die bei einem Positioniervorgang durch den Lese-Schreibarm zurückgelegt werden muß

n_{FRA}	Anzahl der Sektoren, die bei einem Read-Ahead in den Festplatten-Cache geschrieben werden (Read-Ahead-Größe)
n_{FW}	Anzahl belegter Warteschlangenplätze des Festplatten-Controllers beim Eintreffen eines Festplattenauftrags
τ_{FC}	Cache-Trefferrate
α_{FKW}	Winkel, der bei einem Wechsel des Lese-Schreibkopfes durch diesen überstrichen wird
α_{FSW}	Winkel, der bei einem Spurwechsel durch die Lese-Schreibköpfe überstrichen wird
λ_F	Datenübertragungsrate des Magnetplattenspeichers
$\lambda_{F,a}$	Datenübertragungsrate der äußersten Zone
$\lambda_{F,i}$	Datenübertragungsrate der innersten Zone
ω_F	Winkelgeschwindigkeit der Festplatte
ρ_F	Mittlere Auslastung der Festplatte

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Multimedia und Breitband-Kommunikation

In modernen Gesellschaftsformen gewinnt die schnelle Erzeugung, Verbreitung und Verarbeitung von Informationen als Produktionsfaktor für die Industrie und den Dienstleistungssektor, aber auch für die Freizeitgestaltung, eine zunehmende Bedeutung. Man spricht vom Übergang der Industriegesellschaft zur Informationsgesellschaft, der geprägt ist durch den technischen Fortschritt in den Bereichen Computertechnik, Telekommunikation und Unterhaltungselektronik.

Die Entwicklung der letzten Jahre ist gekennzeichnet durch immer leistungsfähigere magnetische und optische Bauelemente sowie die fortschreitende Integration in der Halbleitertechnik. Dadurch ist es möglich, immer mehr digitale Informationen auf magnetischen oder optischen Medien (z. B. Festplatte oder Compact Disc) und in Halbleitern zu speichern, durch leistungsfähige Computersysteme zu verarbeiten und über Glasfasernetze zu übermitteln. Zudem wurden Bild-, Audio- und Videocodierverfahren zur Komprimierung der Datenmengen dieser Medien entwickelt, die deren ökonomische Speicherung und Übermittlung gestatten.

Insbesondere die MPEG-Codierung, benannt nach der *Moving Picture Experts Group*, die für die Standardisierung verantwortlich ist, hat sich mehr und mehr durchgesetzt, seit das MPEG-1-Verfahren 1993 [128] durch die ISO (*International Organization for Standardization*) standardisiert wurde.

Die Summe der Entwicklungen ermöglicht die digitale Erstellung, Verarbeitung, Übermittlung und Präsentation von Informationen unter Verwendung einer Kombination beliebiger Darstellungsmedien, wie z. B. Text, Grafik, Audio und Video. Die Möglichkeit der integrierten digitalen Video- und Audiodatenverarbeitung kann für viele Anwendungszwecke genutzt werden, unter anderem für Videotelefonie-, Videokonferenz-, Videoverteil- und Video-On-Demand-Dienste.

Der Erfolg eines Video-On-Demand-Dienstes (VOD-Dienst), d. h. die Akzeptanz durch die Benutzer, ist von vielerlei Faktoren abhängig [76]. Besondere Bedeutung kommt der bequemen und einfachen Nutzung des Dienstes zu. Dazu gehört das Design der Benutzerschnittstelle, die einfache Auswahl des gewünschten Videoinhalts sowie die schnelle und die von der Tageszeit unabhängige Verfügbarkeit des Dienstes. Die Benutzerführung sollte sich an den menschlichen Gewohnheiten orientieren und individuell einstellbar sein. Der Benutzer muß sicher sein, daß die Bestimmungen des Datenschutzes eingehalten werden und bestimmte Dienste nur nach der Identifizierung eines autorisierten Benutzers zugänglich sind. Wichtig ist natürlich eine attraktive, vielfältige Programmauswahl, die neben gängigen Angeboten für die meisten Benutzer auch spezielle Nischen-Angebote bereithalten sollte. Entscheidend ist auch eine leicht durchschaubare Preispolitik. Der Preis selbst muß sich am Preis-Leistungsverhältnis für das konventionelle Ausleihen eines Videofilms aus einer Videothek orientieren, wobei auch die erzielbaren Werbeeinnahmen in der Kalkulation von Bedeutung sind.

Neben den soziologischen und ökonomischen Aspekten der Vermarktung ist das Design einer effizienten und kostengünstigen Infrastruktur ein wesentlicher Erfolgsfaktor, da die Verarbeitung der Datenmengen zeitkontinuierlicher Medien unter Echtzeitbedingungen eine Herausforderung für heutige Datenverarbeitungssysteme und Kommunikationsnetze bedeutet. Die Infrastruktur für einen Video-On-Demand-Dienst besteht neben Systemen für die Erstellung der Videodatenströme aus Video-On-Demand-Systemen, die den Dienst für die Benutzer bereitstellen, den Teilnehmerendgeräten und einem Kommunikationsnetz, das diese Komponenten verbindet.

Die Übermittlung verschiedener Medien stellt an ein Kommunikationsnetz sehr unterschiedliche Anforderungen bezüglich der zu erfüllenden Dienstgüte (*quality of service*, QOS). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde das diensteintegrierende digitale Breitbandnetz (*Broadband Integrated Services Digital Network*, B-ISDN) entwickelt und als Übermittlungs-, Multiplex- und Vermittlungsprinzip der Asynchrone Transfer-Modus (*Asynchronous Transfer Mode*, ATM) standardisiert. Die ATM-Technik basiert auf der asynchronen Zeitmultiplextechnik und verwendet Pakete mit konstanter Länge (Zellen). Die Vermittlung der Zellen erfolgt mit Hilfe von virtuellen Verbindungen, die für jede Kommunikationsbeziehung den Weg der Zellen durch das Netz festlegen.

Durch die asynchrone Zeitmultiplextechnik und das Verwenden relativ kleiner Zellen kann die Zuweisung von Übertragungskapazität an einzelne virtuelle Verbindungen sehr flexibel erfolgen, und auch die Unterstützung von Diensten mit zeitlich schwankendem Bitratenbedarf ist möglich. Dies ist für die Übermittlung von codierten Videodatenströmen von besonderem Interesse, da die Reduktion der zeitlichen und räumlichen Redundanz durch die Verwendung eines Codierverfahrens bei einem vorgegebenen festen Qualitätsniveau Videodatenströme mit variabler Bitrate (*variable bit rate*, VBR) erzeugt.

Werden mehrere VBR-Dienste auf einem physikalischen Verbindungsabschnitt überlagert, ist ein statistischer Ausgleich der einzelnen Bitratenanforderungen möglich (statistisches Multiplexen). Dies erlaubt die kostengünstige Nutzung des Netzes, da die für eine gewisse Anzahl von Verbindungen benötigte Bitrate unter der Summe der Spitzenbitraten liegt. Die statistischen Schwankungen des Verkehrsaufkommens können jedoch zur Überlastung einzelner Netzelemente führen, was aufwendige Verkehrssteuerungsmechanismen notwendig macht [157].

Im Rahmen dieser Arbeit werden die stochastischen Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme am Beispiel des Spielfilms „Krieg der Sterne“ untersucht. Basierend auf diesen Eigenschaften wird eine hierarchische Modellierung vorgestellt, die es ermöglicht, das Verhalten der Videodatenströme mathematisch nachzubilden. Durch die Implementierung des Modells auf einer Rechenanlage können synthetische Ströme erzeugt und für die Simulationen zur Bewertung und Leistungsuntersuchung der Infrastrukturkomponenten eines zukünftigen Video-On-Demand-Dienstes eingesetzt werden. Es wird die Leistungsfähigkeit eines verteilten Video-On-Demand-Systems, das VBR MPEG-codierte Videodatenströme bereitstellt, untersucht und die Überlagerung mehrerer solcher Ströme im ATM-Netz betrachtet. Eine Übersicht über die Arbeit ist im nächsten Unterkapitel zusammengestellt.

1.2 Übersicht über die Arbeit

Das Kapitel 2 beschreibt die Grundlagen der Videokommunikation über das B-ISDN, soweit sie für das Verständnis der Arbeit notwendig sind. Dazu werden zuerst die wesentlichen Schritte der Bildcodierung zur Komprimierung der Videodatenmenge erläutert, wobei besonders auf die Charakteristika des MPEG-Verfahrens eingegangen wird, das sowohl die räumliche wie auch die zeitliche Redundanz verringert. Danach werden die Eigenschaften der ATM-Technik aufgezeigt, die B-ISDN-Protokollarchitektur für die unteren drei Schichten beschrieben und die Charakteristika und Anforderungen zukünftiger Dienste zusammengestellt. Anschließend werden die Infrastrukturkomponenten eines Video-On-Demand-Dienstes mittels eines Referenzmodells aufgezeigt. Die Anforderungen an ein Video-On-Demand-System werden diskutiert, und es wird eine mögliche Realisierung eines solchen Systems durch eine verteilte Architektur präsentiert. Schließlich wird der Aufbau und die Funktionsweise von RAID-Systemen (*Redundant Array of Independent Disks*) beschrieben, die eine zentrale Rolle in der Speicherhierarchie eines Video-On-Demand-Systems spielen.

In Kapitel 3 werden im ersten Teil die mathematischen Methoden erläutert, die für die stochastische Modellierung der VBR MPEG-codierten Videodatenströme und des Video-On-Demand-Systems nötig sind. Zuerst werden Zufallsvariable und stochastische Prozesse eingeführt und deren Eigenschaften vorgestellt. Von speziellem Interesse sind die selbstähn-

lichen (fraktalen) Prozesse, da durch diese die Modellierung der Langzeitkorrelationseigenschaften von VBR-codierten Videodatenströmen möglich ist. Die fraktalen Gauß-Prozesse werden genauer betrachtet, da diese für die Modellierung eingesetzt werden. Der zweite Teil des Kapitels enthält die Konzepte für die Verkehrsmodellierung und die Modellierung technischer Systeme sowie eine Einführung in die ereignisgesteuerte Simulationstechnik. Dabei wird besonders auf die Konvergenz der Simulationsergebnisse bei der Verwendung fraktaler Prozesse eingegangen, die maßgeblich von der Konvergenz der Mittelwerte der fraktalen Prozesse abhängt. Bei der hierarchischen Verkehrsmodellierung wird das Verhalten einer Verkehrsquelle auf verschiedenen Zeitebenen betrachtet, und es werden Teilmodelle für die relevanten Ebenen erstellt. Die Teilmodelle ergeben zusammen das Gesamtmodell der Quelle. Für die Systemmodellierung werden Strukturkomponenten aus der Verkehrstheorie und der Theorie der Petri-Netze verwendet.

Kapitel 4 beginnt mit einem Überblick über Modellierungsmöglichkeiten für VBR-codierte Videodatenströme. Da die exakte Modellierung der Eigenschaften der Videodatenströme von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft der in den Kapiteln 5 und 6 folgenden Leistungsuntersuchungen ist, werden als nächstes die Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme am Beispiel des Spielfilms „Krieg der Sterne“ untersucht. Daraufhin wird ein hierarchisches Modell entworfen, das das Verhalten VBR MPEG-codierter Videodatenströme auf der Zell-, Bild- und Szenenebene nachbildet und durch wenige Parameter an verschiedene Codierparameter und Videofilminhalte angepaßt werden kann.

Die Überlagerung mehrerer VBR MPEG-codierter Videodatenströme im ATM-Netz wird in Kapitel 5 betrachtet. Dazu wird exemplarisch das Modell eines statistischen Multiplexers verwendet, und es werden die Einflüsse der Parameter der drei Ebenen des Quellmodells auf die Multiplexeigenschaften der Videodatenströme untersucht.

In Kapitel 6 wird die Leistung eines Video-On-Demand-Systems untersucht. Dazu wird zuerst die zugrunde gelegte Systemarchitektur vorgestellt und die Funktionalität der Systemkomponenten beschrieben. Dann wird das für die Kommunikation der Komponenten und die Übertragung der Videodatenströme verwendete, stark vereinfachte Protokoll erläutert. Darauf folgt die detaillierte Beschreibung der Systemkomponenten mit den in Kapitel 3 eingeführten Strukturkomponenten, die die Basis für die Simulation des Verhaltens des Video-On-Demand-Systems bilden. Die Untersuchungen geben Aufschluß über die günstige Wahl verschiedener Designparameter, die eine optimale Leistung eines solchen VOD-Systems erwarten lassen.

Die Arbeit schließt mit einer Zusammenfassung der Ergebnisse und einem Ausblick auf weitere Arbeiten, die sich hieraus ergeben.

Kapitel 2

Videokommunikation über das Breitband-ISDN

In diesem Kapitel werden die für diese Arbeit wichtigen Aspekte der Videokommunikation über das Breitband-ISDN erörtert. Nach einer kurzen Einführung der Grundlagen der Bildcodierung und der Anforderungen an einen Videocodieralgorithmus werden die Grundprinzipien des MPEG-Verfahrens erläutert, die für das Verständnis der Eigenschaften der VBR-codierten Videodatenströme, die in Kapitel 4 verwendet werden, notwendig sind. Danach werden der Asynchrone Transfer-Modus (ATM) und das Protokoll-Referenzmodell für das B-ISDN vorgestellt sowie eine Klassifizierung möglicher Dienste erläutert, da das B-ISDN im Rahmen dieser Arbeit als Kommunikationsnetz für die Übermittlung der Videodatenströme betrachtet wird. Eine ausführliche Beschreibung der ATM-Technik und des B-ISDN findet sich beispielsweise in [14, 103, 51, 173]. Schließlich werden die Systemkomponenten beschrieben, die man für die Einrichtung eines Video-On-Demand-Dienstes über das B-ISDN benötigt.

2.1 Video-Datenkompression

Ein Videofilm besteht aus einer Folge von Bildern, die mit einer festen Bildwiederholfrequenz auf einem Bildschirm dargestellt werden. Jedes Bild besteht wiederum aus einer zweidimensionalen Anordnung von Bildpunkten (Pixel). Die digitale Speicherung und Übermittlung von Videofilmen ist durch die Verarbeitung von sehr großen Datenmengen gekennzeichnet. So wird bei einer Auflösung von 640×480 Pixel für die Schwarz-Weiß-Darstellung einer Textseite, bei der jeder Buchstabe eine Fläche von 8×8 Pixel einnimmt und durch 2 byte charakterisiert wird, ein Datenvolumen von 9,6 kbyte benötigt. Ein Videobild, bei dem jeder Bildpunkt durch 24 bit beschrieben wird, beansprucht dagegen bereits 922 kbyte. Damit

erhält man bei einer Bildwiederholfrequenz von 25 Hz, wie sie in Europa üblich ist, einen Videodatenstrom mit einer Bitrate von 184,32 Mbit/s, und die Speicherung eines zweistündigen Spielfilms erfordert eine Kapazität von etwa 166 Gbyte.

Trotz der andauernden Entwicklung immer leistungsfähigerer Kommunikationsnetze mit zunehmend höheren Übertragungsbitraten und höherintegrierter Speichermedien für digitale Informationen ist es in absehbarer Zukunft nicht möglich, diese Datenmengen wirtschaftlich zu handhaben. Deshalb ist die Verwendung von Kompressionsverfahren zur Verringerung des Datenvolumens kontinuierlicher Medien zwingend notwendig. In den letzten Jahren wurden verschiedene Kompressionsverfahren für Videodaten (Bildcodierung) entwickelt [6, 209, 249, 252], die eine Kompression der Datenmenge auf weniger als 1 % der uncodierten Menge ermöglichen [204]. Dadurch wird die Verarbeitung zeitkontinuierlicher Medien mit heutigen digitalen Rechenanlagen und die Übertragung der Datenströme über Breitband-Kommunikationsnetze ermöglicht.

2.1.1 Grundlagen der Bildcodierung

Durch die Kompression von Videodaten durch spezielle Codierverfahren wird die im uncodierten Videodatenstrom enthaltene redundante Informationsmenge reduziert. Man unterscheidet zeitliche Redundanz (der gleiche Bildausschnitt in aufeinanderfolgenden Videobildern) und räumliche Redundanz (sich wiederholende Bildausschnitte oder gleichfarbige Flächen in einem Bild). Eine zusätzliche Reduktion der Datenmenge wird durch das Entfernen von Informationen erzielt, die für das menschliche Auge irrelevant sind oder den subjektiven Eindruck nur unwesentlich beeinflussen. Die Codierung eines Videofilms geschieht Bild für Bild in mehreren Schritten (siehe Abbildung 2.1).

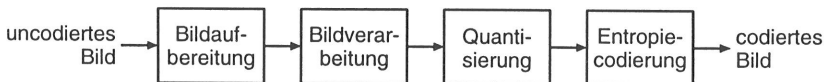


Bild 2.1: Schritte der Bildcodierung [260]

Durch die Bildaufbereitung wird die Information der Videobilder in eine für die Bildverarbeitung geeignete digitale Darstellung umgewandelt. Liegt das Bildmaterial in analoger Form vor, ist der erste Schritt die Abtastung des Bildes mit anschließender Analog-Digital-Wandlung. Dabei werden für die Darstellung eines Bildpunktes drei Komponenten benötigt, für deren Beschreibung z. B. jeweils 8 bit verwendet werden. Eine Möglichkeit ist die Verwendung der drei Primärfarben Rot, Grün und Blau (RGB-Signal), aus denen sich durch die additive Farbmischung jeder beliebige Farbton gewinnen läßt. Alternativ läßt sich jeder Bildpunkt durch die Leuchtdichte (Luminanz) und zwei Farbinformationskomponenten

(Chrominanz) beschreiben. Diese Darstellung hat den Vorteil, daß sich durch die Verwendung der Luminanz-Komponente ohne die Chrominanz-Information in einfacher Weise ein schwarz-weißes Bild gewinnen läßt. Man unterscheidet das YUV-Signal und das YIQ-Signal. Die verschiedenen Darstellungsformen lassen sich durch die Gleichungen

$$Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (2.1) \qquad Y = 0,30R + 0,59G + 0,11B \quad (2.4)$$

$$U = 0,493(B - Y) \qquad (2.2) \quad \text{und} \quad I = 0,60R - 0,28G - 0,32B \quad (2.5)$$

$$V = 0,877(R - Y) \qquad (2.3) \qquad Q = 0,21R - 0,52G + 0,31B \quad (2.6)$$

ineinander überführen [260]. Für viele Codierverfahren werden benachbarte Pixel zu 8×8 -Blöcken zusammengefaßt. Da das menschliche Auge sensibler auf Helligkeitsunterschiede reagiert als auf Farbabweichungen, ist es möglich, die Chrominanz-Komponenten unterabzutasten und beispielsweise für ein Quadrat mit vier Luminanz-Blöcken jeweils nur einen oder zwei Blöcke für die Chrominanz-Komponenten zu verwenden. Durch Unterabtastung kann die Datenrate bereits um ein Drittel bzw. die Hälfte gesenkt werden, ohne daß wesentliche, sichtbare Qualitätseinbußen in Kauf genommen werden müssen.

Die Bildverarbeitung leistet den ersten Schritt der Kompression, indem z. B. die Blöcke durch die diskrete Kosinustransformation (*discrete cosine transform*, DCT) in den Frequenzbereich transformiert werden (*transform domain coding*). Durch Prädiktionsverfahren kann ein Block aus einem ähnlichen benachbarten Block desselben Bildes, eines vorhergehenden Bildes (*predictive coding*, *motion compensated prediction*) oder eines vorhergehenden und eines nachfolgenden Bildes (*interpolative coding*) abgeleitet werden, so daß nur die „Differenz“ der Blöcke codiert werden muß. Dies ist wesentlich effektiver, da die zu codierenden Schätzfehler gering sind.

Durch die Quantisierung werden die durch die Bildverarbeitung berechneten Werte nach vorgegebenen Kennlinien auf eng begrenzte diskrete Bildbereiche abgebildet. Die Wahl der Kennlinien macht es möglich, die Werte gemäß ihrer Wichtigkeit unterschiedlich zu behandeln. So sind die niederfrequenten DCT-Koeffizienten für den subjektiven Eindruck eines Videobildes wichtiger als die hochfrequenten und sollten deshalb entsprechend feiner quantisiert werden. Durch die Wahl der Quantisierungskennlinie werden die Bildqualität und der Kompressionsfaktor stark beeinflusst.

Die quantisierten Werte werden schließlich entropiecodiert (*variable word-length coding*, *entropy coding*). Dabei werden häufig auftretenden Werten kurze Codeworte zugeordnet und selten auftretenden lange. Dadurch wird eine Reduktion der Datenmenge ohne Verluste in der Bildqualität erreicht. Ein in fast allen standardisierten Codierverfahren verwendetes Entropiecodierverfahren ist die Huffman-Codierung. Alternativ oder zusätzlich zur Entropiecodierung ist die Verwendung der Lauflängencodierung (*run-length coding*) möglich, durch

die aufeinanderfolgende identische Codeelemente nur durch ein solches Element und die Angabe der Anzahl gleicher Elemente codiert werden.

Die Anforderungen, die an ein Videocodierverfahren gestellt werden, sind von verschiedenen Faktoren abhängig. Eine grundsätzliche Einteilung kann nach der Anwendung in symmetrische und asymmetrische Verfahren erfolgen. Bei symmetrischen Verfahren ist der Aufwand für die Codierung und Decodierung ähnlich, bei asymmetrischen Verfahren ist die Codierung wesentlich aufwendiger als die Decodierung. Daher eignen sich symmetrische Verfahren besonders für Dialoganwendungen und asymmetrische Verfahren für Abrufdienste, für die die Videodaten einmal sehr effektiv und aufwendig codiert, aber vielfach abgerufen und mit wenig Aufwand decodiert werden. Ein universell einsetzbares Codierverfahren zur Erzeugung komprimierter Audio- und Videodatenströme sollte die folgenden Anforderungen erfüllen [82]:

- Hoher Kompressionsfaktor,
- Flexibilität des Formats der Videobilder,
- wahlfreier Zugriff auf einzelne Videobilder,
- Editierbarkeit der codierten Bilder,
- abspielen in Zeitraffer oder Zeitlupe vorwärts und rückwärts,
- Möglichkeit der Synchronisation mehrerer Audio- und Videoströme in einem Datenstrom,
- Robustheit des Datenstroms gegen Übertragungsfehler,
- Zeitdauer des Codier- und Decodiervorgangs für Echtzeitanwendung unter 150 ms,
- geringe Kosten einer Hardware-Implementierung.

Im nächsten Abschnitt wird das MPEG-1-Codierverfahren vorgestellt, das für die Codierung der in dieser Arbeit verwendeten Videodatenströme verwendet wurde, und aufgezeigt, wie die zum Teil gegensätzlichen Anforderungen durch verschiedene Mechanismen berücksichtigt werden.

2.1.2 MPEG-Codierung

Im Rahmen des *Joint ISO/IEC Technical Committee (JTC 1) on Information Technology* wurde 1988 die *Moving Picture Experts Group (MPEG)* eingerichtet mit dem Mandat, Standards für die codierte Darstellung von Videobildern, des zugehörigen Tones und deren Kombination zu erarbeiten, die sich für digitale Speichermedien eignen. Im April 1990 wurde daraus die *Working Group 11* des JTC 1/SC 2 und im November 1991 die WG 11 des JTC 1/SC 29 [31]. Durch diese Arbeitsgruppen wurden bisher die Standards ISO/IEC 11172

(MPEG-1) [128] und ISO/IEC 13818 (MPEG-2) [129] verabschiedet, und weitere Standards sind im Entstehen. Eine zusammenfassende Beschreibung des MPEG-Videocodierverfahrens findet sich beispielsweise in [31, 82, 204, 260]; der Audio-Teil der Standards wird in [219, 267] erläutert. Nachdem zu Beginn nur Software-Codecs verfügbar waren, gibt es mittlerweile integrierte Hardware-Lösungen, die eine MPEG-Codierung und -Decodierung in Echtzeit ermöglichen [110, 206, 269].

Die MPEG-Standards sind generisch und unabhängig von einer bestimmten Anwendung, es wurden jedoch bei der Definition der Standards verschiedene Anwendungen berücksichtigt. Die Standards definieren eine für alle Anwendungen einheitliche Datenstromsyntax, die jeder konforme Codierer erzeugen und jeder Decodierer entschlüsseln können muß. Um genügend Raum für technische Weiterentwicklungen zu lassen, wird aber keine bestimmte Implementierung oder Ausführung der Codierer oder Decodierer standardisiert. Durch die Wahl verschiedener Parameter ist der Standard an die Anforderungen verschiedener Anwendungen anpaßbar.

Die durch den MPEG-1-Standard anvisierten Bitraten der codierten Videodatenströme von etwa 1–1,5 Mbit/s sind geeignet für verschiedene digitale Speichermedien wie CD-ROM, DAT, Festplatten und beschreibbare optische Platten sowie für die Übermittlung der Datenströme über Computer- und Telekommunikationsnetze. Bei diesen Bitraten wird etwa die Bildqualität heutiger analoger Videorekorder erreicht. MPEG-2 wurde für höhere Bitraten entwickelt und erlaubt bei verschiedenen höheren Auflösungen mit einem Seitenverhältnis von 4:3 oder 16:9 eine bessere Bildqualität.

Die Auflösung eines MPEG-1-konformen Videodatenstroms darf 768×576 Pixel betragen. Für MPEG-2 sind durch vier sogenannte *Level* Auflösungen von 352×288 bis 1920×1152 Pixel möglich. MPEG-1 erlaubt nur die Verwendung von Vollbildern, MPEG-2 dagegen bietet spezielle Mechanismen für die Codierung von Halbbildern an (*interlaced video formats*). Zudem ist eine hierarchische Codierung (*hierarchical coding*) eines Videofilms möglich durch Skalierung in einen *Base Layer* und mehrere *Enhancement Layer*. Dadurch kann ein MPEG-Videodatenstrom mit verschiedenen Auflösungen, Bildqualitäten oder Bildwiederholffrequenzen decodiert werden.

MPEG-2 ermöglicht eine im Vergleich zu MPEG-1 erhöhte Tonqualität mit Mehrkanal-Raumklang (*surroundsound*) durch fünf Audio-Kanäle. Daneben stehen noch zwei Kanäle mit schmaler Bandbreite und bis zu sieben Kanäle für Kommentare sowie Algorithmen für die qualitativ hochwertige Codierung von Mono- und Stereo-Kanälen mit Bitraten von weniger als 64 kbit/s zur Verfügung. Einen Vergleich MPEG-1- und MPEG-2-codierter Videodatenströme findet sich in [25]. Die folgenden Abschnitte geben einen Überblick über die grundlegenden Mechanismen der MPEG-Videocodierung.

Da an ein universell einsetzbares Codierverfahren viele unterschiedliche, zum Teil widersprüchliche Anforderungen gestellt werden, verwendet MPEG ein hybrides Codierverfahren,

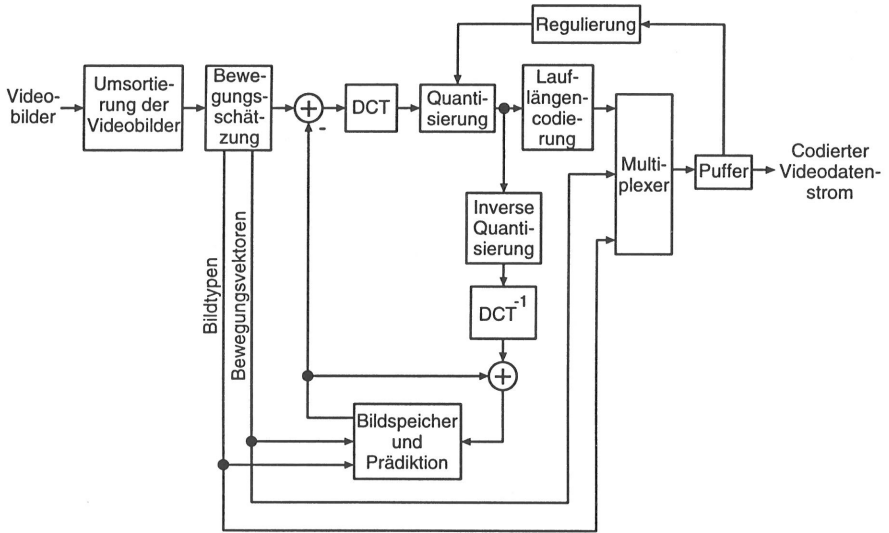


Bild 2.2: Vereinfachtes Blockdiagramm eines MPEG-Codierers [128]

das mehrere Techniken in sich vereinigt. Das vereinfachte Blockdiagramm eines MPEG-Codierers zeigt Abbildung 2.2. Der MPEG-Videocodieralgorithmus basiert auf der Verwendung der DCT und der Quantisierung der DCT-Koeffizienten zur Reduktion der räumlichen Redundanz und der blockbasierten Bewegungsschätzung. Die quantisierten DCT-Koeffizienten und die Bewegungsvektoren werden schließlich lauffängencodiert.

Um den einfachen wahlfreien Zugriff auf die codierten Videobilder zu ermöglichen, ist es am besten, die zeitliche Redundanz des Videofilms nicht auszunutzen und jedes Bild unabhängig zu codieren (*intraframe coding*). Durch die zusätzliche Reduktion der zeitlichen Redundanz, d. h. der Codierung eines Videobildes unter Berücksichtigung der benachbarten Bilder (*interframe coding*), ist jedoch ein wesentlich höherer Kompressionsfaktor erreichbar. Durch den MPEG-Standard werden deshalb drei verschiedene Bildtypen, die I-Bilder (*intra-coded pictures*), P-Bilder (*predictive-coded pictures*) und B-Bilder (*bidirectionally predictive-coded pictures*), unterschieden, durch die eine Balance zwischen Intraframe-Codierung und Interframe-Codierung erzielt wird.

Ein Videobild wird für die Codierung in 8×8 Pixel große Blöcke unterteilt, die zu 16×16 Pixel großen Makroblöcken gruppiert werden, wobei die Chrominanz-Komponenten unterabgetastet werden. Ein Makroblock enthält bei MPEG-1 vier Luminanz-Blöcke und einen Block für jede Chrominanz-Komponente. MPEG-2 erlaubt für jede Chrominanz-Komponente auch zwei oder vier Blöcke. Die Blöcke eines I-Bildes werden unabhängig DCT-transformiert und die Koeffizienten quantisiert. Bei einem P-Bild wird entschieden, ob es günstiger ist, die

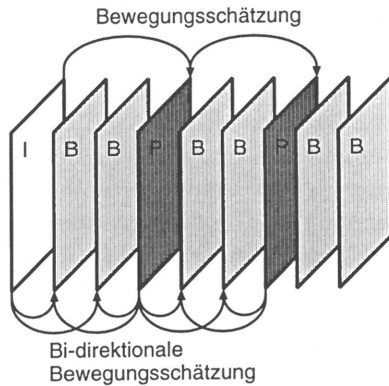


Bild 2.3: Verwendete GOP-Folge

Makroblöcke aus dem vorangegangenen I- oder P-Bild durch Bewegungsschätzung zu ermitteln und nur die DCT-transformierten quantisierten Schätzfehler zusammen mit dem Bewegungsvektor zu codieren oder aber die Blöcke unabhängig zu codieren. B-Bilder können am effektivsten komprimiert werden. Hier können die Makroblöcke entweder aus dem vorhergehenden oder nachfolgenden I- oder P-Bild geschätzt werden. Auch die Interpolation unter Verwendung sowohl des vorhergehenden als auch des nachfolgenden Bildes ist möglich.

Die Reihenfolge der verschiedenen Bildtypen ist i. allg. periodisch und wird durch die *Group of Pictures* (GOP) festgelegt, wie in Abbildung 2.3 dargestellt. Die GOP-Folge ist durch die zwei Parameter N_{MPEG} und M_{MPEG} bestimmt, die den Abstand zwischen den I-Bildern und den I- und P-Bildern angeben. Im obigen Beispiel und in den in dieser Arbeit verwendeten Videodatenströmen ist generell $N_{MPEG} = 9$ und $M_{MPEG} = 3$, so daß sich die periodische Bilderfolge IBBPBBPB ergibt.

Darstellungsreihenfolge	I	B	B	P	B	B	P	B	B	I	B	B	P	B	B	P	B	...
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	...
MPEG-Reihenfolge	1	4	2	3	7	5	6	10	8	9	13	11	12	16	14	15	18	...
	I	P	B	B	P	B	B	I	B	B	P	B	B	P	B	B	I	...

Tabelle 2.1: Übertragungsreihenfolge der MPEG-Bilder

Da man für die Codierung und Decodierung der B-Bilder I- oder P-Bilder benötigt, die erst zu einem späteren Zeitpunkt dargestellt werden, muß die Bildfolge beim Codieren umsortiert werden (vgl. Abbildung 2.2). Einen Vergleich der Darstellungsreihenfolge der Videobilder und der Reihenfolge innerhalb des MPEG-Videodatenstroms für die in dieser Arbeit verwendete GOP-Folge zeigt Tabelle 2.1. Nach dem ersten GOP des Videodatenstroms ist auch die zu

übertragende Bildfolge periodisch. Die Abfolge der Bildtypen entspricht derjenigen, die für die Darstellungsreihenfolge gewählt wurde.

Durch die unterschiedliche Codierung und den schwankenden Informationsinhalt der einzelnen Bilder erhält man einen codierten Datenstrom mit variabler Bitrate. Um die Übertragung der Videodatenströme mit konstanter Bitrate zu ermöglichen, wird sowohl am Ausgang des Codierers als auch am Eingang des Decodierers (siehe Abbildung 2.4) ein Pufferspeicher benötigt. Über den Füllstand des Puffers des Codierers kann zudem über einen Regelmechanismus Einfluß auf die Quantisierung genommen werden. Durch eine grobere oder feinere Quantisierung kann so das Über- oder Leerlaufen des Puffers vermieden werden. Der Nachteil der Veränderung der Quantisierung sind Schwankungen in der Bildqualität. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur VBR-Videodatenströme verwendet, für deren Codierung die Quantisierungsparameter konstant gehalten wurden.

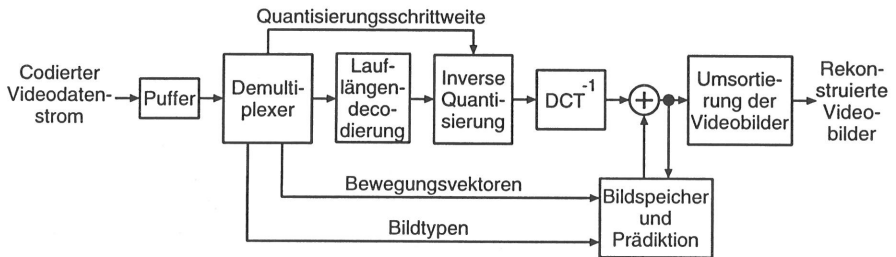


Bild 2.4: Vereinfachtes Blockdiagramm eines MPEG-Decodierers [128]

Ein MPEG-Datenstrom enthält synchronisierte Audio- und Videodatenströme (*Elementary Streams*). Die Syntax des MPEG-Videodatenstroms ist hierarchisch aufgebaut und untergliedert sich in sechs Schichten. Jeder Schicht ist entweder eine Systemfunktion oder eine Signalverarbeitungsfunktion zugeordnet. Die oberste Ebene bildet die Sequenz-Ebene (*Sequence Layer*). Im Kopffeld der Sequenz-Ebene wird die Bitrate und die für die Decodierung des Stroms notwendige Puffergröße spezifiziert. Darunter befindet sich die GOP-Schicht (*group of pictures Layer*), die die codierten Daten eines GOP enthält und durch den Beginn mit einem I-Bild den wahlfreien Zugriffspunkt auf einzelne Videobilder bietet. Die nächste Ebene bildet die Bild-Ebene (*Picture Layer*) mit den codierten Daten eines Videobildes. Darunter befindet sich die Scheiben-Ebene (*Slice Layer*), die Resynchronisationsmechanismen zur Verfügung stellt. Als Scheibe bezeichnet man eine bestimmte Anzahl von Makroblöcken, deren Beschreibung die Aufgabe der Makroblock-Ebene (*Macroblock Layer*) ist. Auf Makroblock-Ebene wird die Bewegungsschätzung durchgeführt. Die unterste Ebene bildet schließlich die Block-Ebene (*Block Layer*), die die grundlegenden Codierfunktionen wie DCT und Quantisierung enthält.

In der MPEG-2-Syntax bilden codierte Video- oder Audiodatenströme zusammen mit Sy-

steminformationen einen paketierte Elementarstrom (*Packetized Elementary Stream*, PES). Durch Multiplexen können mehrere PES in einem MPEG-2-Systemstrom (*Systems Stream*) zusammengefaßt werden (z. B. Videosequenz mit den dazugehörigen Audiodaten). Dabei unterscheidet man zwei Formate, den Programmstrom (*Program Stream*, PS) und den Transportstrom (*Transport Stream*, TS). Der Programmstrom wird verwendet, wenn keine Übertragungsfehler auftreten können. Der Transportstrom ist geeignet für Übermittlungssysteme, in denen Übertragungsfehler möglich sind. Der Transportstrom besteht aus Paketen mit einer Länge von 188 byte, die eine Nutzlast von 184 byte beinhalten.

2.2 Grundlagen des Breitband-ISDN

In diesem Unterkapitel werden die wichtigsten Grundlagen des Breitband-ISDN erläutert. Zuerst wird der Asynchrone Transfer-Modus erläutert, der die Basis für die Datenübermittlung bildet. Danach wird die B-ISDN-Protokollarchitektur für die unteren Schichten vorgestellt. Schließlich werden die Charakteristika und Anforderungen zukünftiger Dienste diskutiert, die durch das B-ISDN unterstützt werden sollen.

2.2.1 Asynchroner Transfer-Modus

Das grundlegende Ziel, das durch die Einführung des Breitband-ISDN erreicht werden soll, ist die Integration aller Telekommunikationsdienste für die digitale Übermittlung beliebiger Darstellungsmedien in einem universellen Kommunikationsnetz. Das zu integrierende Spektrum an Diensten stellt sehr heterogene Anforderungen an die breitbandige Übertragungs- und Vermittlungstechnik eines solchen Kommunikationsnetzes. Dies macht die Verwendung eines allgemeinen Übertragungsmechanismus notwendig, der flexibel genug ist, alle Dienste zu integrieren, und eine effiziente Übertragung ermöglicht.

Ein solcher Übertragungsmechanismus sollte sowohl vom zu übertragenden Dienst als auch vom verwendeten physikalischen Übertragungsmedium unabhängig sein. Für diese Aufgabe wurde durch die ITU-T Empfehlung I.121 [133] der Asynchrone Transfer-Modus (ATM) standardisiert. Die ATM-Technik bildet die Daten der verschiedenen Dienste auf ein gemeinsames einheitliches Übertragungsformat, die ATM-Zelle, ab. ATM-Zellen sind Pakete konstanter Länge. Das Format dieser Zellen wird im nächsten Abschnitt näher erläutert.

Das ATM-Prinzip umfaßt jedoch nicht nur die Standardisierung des Übertragungsformats, sondern legt auch als Vermittlungsprinzip die verbindungsorientierte Paketvermittlung unter Verwendung der asynchronen Zeitmultiplextechnik und eines virtuellen Kanalkonzepts fest, durch die die einheitliche Vermittlung der Zellen und eine dynamische, variable und feingranulare Bitratenzuteilung ermöglicht wird. Die asynchrone Zeitmultiplextechnik wird in Abschnitt 2.2.1.2 beschrieben.

2.2.1.1 Zellformat

Die Struktur der ATM-Zelle wird durch die ITU-T Empfehlung I.361 [137] festgelegt. Jede Zelle besitzt ein 5 byte großes Kopffeld (*header*) und ein Informationsfeld (*information field*) mit 48 byte für die Übertragung der Nutzdaten. Die Zellgröße ist ein Kompromiß für die Anforderungen, die sich aus der Übermittlung verschiedener Darstellungsmedien, den Randbedingungen der Netzbetreiber und der ATM-Technik selbst ergeben [14]. Die Zellgröße wurde konstant gewählt, obwohl durch eine variable Paketlänge eine höhere Übertragungseffizienz erzielt würde, weil Pakete mit konstanter Länge einfacher und damit schneller zu vermitteln sind.

Möglichst kleine Zellen sind günstig für die Übermittlung schmalbandiger Sprache (Telefonqualität mit 64 kbit/s), weil bei kleinen Zellen die Verzögerung durch das Paketieren und Depaketieren der Daten klein ist. Dazu benötigt die Verarbeitung kleiner Zellen in den Vermittlungseinrichtungen weniger Zeit, und die Datenmenge, die im Falle eines Fehlers (Zellverlust oder Bitfehler) erneut übertragen werden muß, wird reduziert. Für die Übertragung großer Datenmengen ist die Wahl einer großen Zelle günstiger, da für große Zellen der Protokollanteile (*overhead*) niedriger ist. Zudem sollte die Zellgröße so gewählt werden, daß sie in bestehende digitale Übertragungsverfahren (z. B. SONET, SDH oder PDH) eingebunden werden kann.

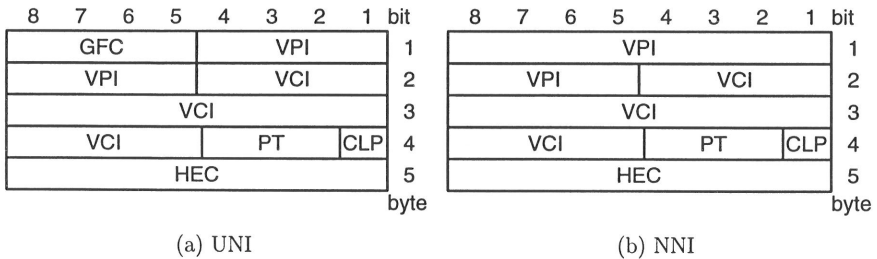


Bild 2.5: Struktur des ATM-Zellkopfes [137]

Die Felder des Zellkopfes zeigt Abbildung 2.5. Sie unterscheiden sich für Zellen an der Benutzer-Netz-Schnittstelle (*user-network interface*, UNI) und an netzinternen Schnittstellen (*network-node interface*, NNI) durch das GFC-Feld (*generic flow control*). GFC-Mechanismen können zur Regelung des Verkehrsflusses mehrerer ATM-Verbindungen mit verschiedenen QOS-Anforderungen an der Benutzer-Netz-Schnittstelle verwendet werden. Durch die Regelung des Verkehrsflusses werden z. B. eventuell auftretende kurzzeitige Überlastsituationen im privaten Netz des Benutzers ausgeglichen [134].

ATM ist eine verbindungsorientierte Technik [134], die auf virtuellen Verbindungen basiert. Durch den Aufbau einer virtuellen Verbindung wird für alle Zellen dieser Verbindung der

Weg durch das ATM-Netz festgelegt, die Übertragungs- und vermittlungstechnischen Betriebsmittel werden aber jeder zu übermittelnden Zelle dynamisch zugeteilt. Einer virtuellen Verbindung wird für jeden Übertragungsabschnitt eine logische Kanalnummer zugeteilt, d. h. eine virtuelle Verbindung ergibt sich aus der Verkettung ihrer logischen Kanalnummern. Jeder Vermittlungsknoten besitzt für die bestehenden virtuellen Verbindungen eine Tabelle, die die Zuordnung der logischen Kanalnummern der eintreffenden Zellen zu den logischen Kanalnummern für den nächsten Abschnitt und zum zu verwendenden physikalischen Kanal enthält.

Die logische Kanalnummer bildet den wichtigsten Teil des Kopffeldes einer ATM-Zelle. Sie ist zweigeteilt in eine virtuelle Kanalnummer (*virtual channel identifier*, VCI) und eine virtuelle Pfadnummer (*virtual path identifier*, VPI) zur Bezeichnung virtueller Kanäle (*virtual channel*, VC) und virtueller Pfade (*virtual path*, VP). Durch einen virtuellen Pfad werden mehrere virtuelle Kanäle zusammengefaßt, deren Zellströme einheitlich behandelt werden. Durch virtuelle Verbindungen oder Pfade können permanente und semi-permanente Punkt-zu-Punkt- und Punkt-zu-Mehrpunkt-Verbindungen eingerichtet und solche Verbindungen dynamisch auf- und abgebaut werden.

Über das PT-Feld (*payload type*) wird jeder Zelle ein *payload type identifier* (PTI) zugeordnet, durch den verschiedene Zelltypen unterschieden werden können. Man unterscheidet Zellen mit Benutzerdaten, OAM-Zellen (*operation and maintenance*) und Zellen für das Ressourcen-Management. Weitere Zelltypen können durch die Reservierung bestimmter VPI/VCI-Kombinationen unterschieden werden.

Durch das CLP-Bit (*cell loss priority*) sind durch die Endgeräte Zellen markierbar, die in einer Überlastsituation bevorzugt verworfen werden. Damit ist es z. B. möglich, einen Videodatenstrom durch geeignete Codierverfahren (*layered coding*) in einen hochpriorien und niederpriorien Strom aufzuteilen und durch den hochpriorien Strom eine akzeptable Bildgüte zu gewährleisten.

Die ersten 4 Byte des Zellkopfes werden durch das Einfügen einer 8 bit langen Prüfsequenz (*header error control*, HEC) gegen Übertragungsfehler geschützt. Die Prüfsequenz wird durch einen zyklischen Binärcode mit dem Generatorpolynom $x^8 + x^2 + x + 1$ erzeugt. Das HEC-Feld wird zudem für die Erkennung der Zellgrenzen verwendet. Dabei wird von einem Synchronisationsverlust des Empfängers ausgegangen, wenn die Prüfsequenzberechnung von sieben aufeinanderfolgenden Zellen einen Fehler ergibt. Um die Synchronisation wiederzuerlangen, wird Bit für Bit die Prüfsequenz berechnet, bis ein gültiger Zellkopf gefunden wird. Ergeben sich auch für die sechs folgenden Zellen gültige Zellköpfe, wird von der korrekten Wiederherstellung der Synchronisation zwischen Sender und Empfänger ausgegangen [141].

2.2.1.2 Asynchrone Zeitmultiplextechnik

Durch Verwenden von Multiplextechniken ist es möglich, daß die Übertragungskapazität eines physikalischen Kanals auf mehrere gleichzeitig bestehende Verbindungen aufgeteilt wird. Für die Übermittlung digitaler Signale ist die Zeitmultiplextechnik von besonderer Bedeutung, durch die jeder Verbindung einzelne Zeitschlitze für die Übertragung ihrer Daten zugewiesen werden. Man unterscheidet synchronen (*synchronous time-division multiplexing*, STDM) und asynchronen Zeitmultiplex (*asynchronous time-division multiplexing*, ATDM). Bei der synchronen Zeitmultiplextechnik werden die Daten in Rahmen übertragen, in denen die Daten einer Verbindung immer denselben Platz einnehmen und die Übertragung damit synchron mit dem Systemtakt erfolgt.

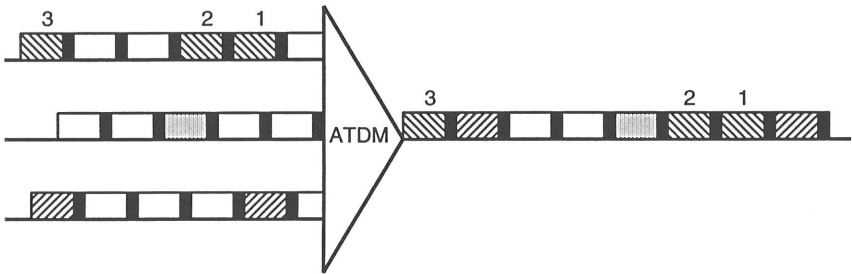


Bild 2.6: Asynchrone Zeitmultiplextechnik

Die Funktionsweise der asynchronen Zeitmultiplextechnik, die für die Vermittlung der ATM-Zellen verwendet wird, zeigt Abbildung 2.6 am Beispiel von drei Verbindungen, die sich einen Kanal teilen. Die im Systemtakt der Eingangsleitungen ankommenden ATM-Zellen werden im Multiplexer zwischengespeichert, wobei leere Zellen (*idle cells*), die in der Abbildung weiß gezeichnet sind, entfernt werden. Die gespeicherten Zellen werden nach einer vorgegebenen Strategie, z. B. FIFO (*First In First Out*), aus dem Puffer ausgelesen und in die Zeitschlitze des Ausgangskanals eingesetzt. Dabei muß garantiert werden, daß die Reihenfolge der Zellen einer Verbindung erhalten bleibt. Steht keine zu übertragende Zelle bereit, wird eine Leerzelle eingefügt.

Im Gegensatz zum STDM-Verfahren können die Zellen der einzelnen Verbindungen in beliebigen Zeitschlitzen der Eingangskanäle eintreffen und werden auf die nächsten zur Verfügung stehenden Zeitschlitze des Ausgangskanals umgesetzt, so daß sie ein asynchrones Verhalten bezüglich eines festen Systemtaktes zeigen, obwohl die Übertragung der Zellen auf einem Verbindungsabschnitt zwischen Sender und Empfänger synchron geschieht.

Da prinzipiell alle Zeitschlitze durch alle Verbindungen benutzt werden können, ist durch die ATDM-Technik eine höhere Kanalauslastung möglich als bei der STDM-Technik, bei

der die Zeitslitze von Verbindungen, die momentan keine Daten übertragen, nicht durch andere Verbindungen mitbenutzt werden können. Die ATDM-Technik bietet für die Bitratenzuteilung eine sehr große Flexibilität (die Granularität ist durch die Nutzlast einer Zelle bestimmt), sie hat jedoch gegenüber STDM den Nachteil, daß die Verbindungen gegenseitig ihre Dienstgüte beeinflussen. Um eine faire Bitratenzuteilung an alle Verbindungen zu gewährleisten, sind aufwendige Verkehrssteuerungsverfahren notwendig [140, 157].

2.2.2 B-ISDN-Protokollarchitektur

2.2.2.1 Protokoll-Referenzmodell des B-ISDN

Die Protokollfunktionen moderner Kommunikationssysteme sind hierarchisch gegliedert und werden in sogenannten Schichten strukturiert. Die Funktionen der Schichten und die Beziehungen zwischen den Schichten werden durch Protokoll-Referenzmodelle beschrieben. Die Grundlage für die Gliederung der Protokoll-Referenzmodelle der ITU-T bildet die ITU-T Empfehlung X.200 [142] (*OSI Reference Model*), in der die Protokollfunktionen sieben Schichten zugeordnet werden. Das Protokoll-Referenzmodell dient als Rahmen für die Definition von Diensten und Protokollen. Kommunikationssysteme, die die standardisierten Kommunikationsmethoden verwenden, werden als offene Systeme (*open systems*) bezeichnet.

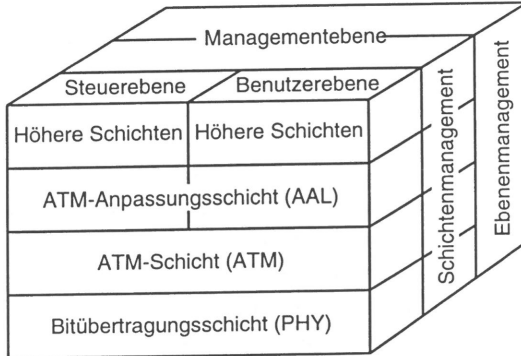


Bild 2.7: Protokoll-Referenzmodell des B-ISDN [136]

Das Protokoll-Referenzmodell für das B-ISDN aus der ITU-T Empfehlung I.321 zeigt Abbildung 2.7. Es ist im wesentlichen in drei Schichten unterteilt. Die ATM-Schicht stellt, zusammen mit der Bitübertragungsschicht, für alle Dienste der höheren Schichten die Grundmechanismen für die Vermittlung und Übertragung der ATM-Zellen zur Verfügung. Die ATM-Anpassungsschicht enthält Anpassungsfunktionen, die spezifisch für die Dienste der höheren Ebenen sind. Zusätzlich zur geschichteten Architektur ist das Referenzmodell in drei Ebenen unterteilt:

- Benutzerebene,
- Steuerebene und
- Managementebene.

Die Benutzerebene enthält alle Funktionen, die für die Übermittlung der Benutzerdaten benötigt werden, einschließlich der notwendigen Flußkontroll- und Fehlerbehandlungsmechanismen. Die Steuerebene enthält die Signalisierprotokolle für den Auf- und Abbau sowie die Überwachung von virtuellen Verbindungen. Die Managementebene ist nochmals unterteilt in Ebenen für das Schichtenmanagement und das Ebenenmanagement. Managementfunktionen, die das gesamte System betreffen, sind dem Ebenenmanagement zugeordnet, das für die Koordination der Ebenen sorgt. Das Schichtenmanagement dient der Verwaltung der Ressourcen und Parameter der Protokollinstanzen sowie der OAM-Informationsflüsse der einzelnen Schichten. Eine Übersicht über die weitere Unterteilung der drei untersten Schichten des B-ISDN Protokoll-Referenzmodells in Subschichten und die diesen zugeordneten Funktionen nach der ITU-T Empfehlung I.321 zeigt Tabelle 2.2.

Schicht	Subschicht	Funktionen
AAL	CS	Dienstspezifische Funktionen
	SAR	Paketierung und Depaketierung der PDUs höherer Schichten in Zellen
ATM		Erzeugung und Entfernung des Zellkopfes Multiplexen und Demultiplexen von VP- und VC-Verbindungen VPI- und VCI-Übersetzung Generische Flußkontrolle
PHY	TC	Einfügen und Entfernen von Leerzellen Erzeugung bzw. Überprüfung der Fehlersicherung des Zellkopfes Erkennung der Zellgrenzen Rahmenanpassung Rahmenerzeugung bzw. -rückgewinnung
	PM	Elektrisch-optische Wandlung Bitsynchronisation Leitungscodierung

Tabelle 2.2: Funktionen der Schichten des Protokoll-Referenzmodells [136]

2.2.2.2 Bitübertragungsschicht

Die Bitübertragungsschicht besteht aus der PM-Subschicht (*physical medium sublayer*) und der TC-Subschicht (*transmission convergence sublayer*). Die PM-Subschicht enthält nur

Funktionen, die direkt vom verwendeten Übertragungsmedium abhängen. Die TC-Subschicht setzt den von der ATM-Schicht angelieferten Zellstrom in einen Bitstrom um, der von der PM-Subschicht übertragen werden kann. Nach der Übertragung wird der Zellstrom aus dem Bitstrom durch die TC-Subschicht wiedergewonnen.

Für die Benutzer-Netz-Schnittstelle werden in der ITU-T Empfehlung I.432 [141] zwei mögliche Übertragungssysteme mit einem Zell-orientierten Format und einem Rahmen-basierten Format auf Basis der synchronen digitalen Hierarchie (*Synchronous Digital Hierarchy*, SDH) standardisiert. Die Formate basieren auf den Übertragungsraten der PM-Subschicht von 155,52 Mbit/s oder 622,08 Mbit/s. Weitere Übertragungsbiraten, z. B. 25,6 Mbit/s oder 34,386 Mbit/s, sind in [8, 9, 10, 11, 131, 132] standardisiert.

Die Bitrate des Übertragungsmediums wird vom Zellstrom der ATM-Schicht durch das Einfügen von Leerzellen (*idle cells*) entkoppelt (*rate decoupling*), die nach der Übertragung wieder entfernt werden. Zudem erzeugt die sendende TC-Instanz eine Prüfsequenz für den Zellkopf (HEC), die auch dazu verwendet wird, die Zellgrenzen innerhalb eines Bitstroms zu erkennen (*cell delineation*).

2.2.2.3 ATM-Schicht

Die Funktionen der ATM-Schicht sind unabhängig vom verwendeten physikalischen Medium und vom verwendeten Dienst. Alle Funktionen beziehen sich auf den Inhalt des Zellkopfes. Am Start- und Endpunkt der ATM-Schicht muß der Zellkopf erzeugt und entfernt werden, da mit der ATM-Anpassungsschicht nur das Informationsfeld der Zellen ausgetauscht wird. In Senderichtung werden durch Multiplexen die Zellen mehrerer VPs und VCs zu einem diskontinuierlichen zusammengesetzten Zellstrom zusammengefaßt. In Empfangsrichtung wird der ankommende Zellstrom wieder in die Zellflüsse der einzelnen VPs und VCs aufgespalten. In den Netzknoten werden zusätzlich die VPI- und VCI-Werte der virtuellen Verbindungen und Pfade umgesetzt. Schließlich enthält die ATM-Schicht Steuermechanismen für die Überwachung der Zellströme am Netzzugang und an Netzübergängen, wie die generische Flußkontrolle und Mechanismen zur Verkehrssteuerung [140].

2.2.2.4 ATM-Anpassungsschicht

Die ATM-Anpassungsschicht (*ATM Adaptation Layer*, AAL) untergliedert sich in die SAR-Subschicht (*segmentation and reassembly*) und die CS-Subschicht (*convergence sublayer*). Die Hauptaufgabe der SAR-Subschicht ist die Segmentierung (Paketierung) der Protokoll-dateneinheiten (*protocol data units*, PDUs) der höheren Schichten in die Informationsfelder der Zellen (48 byte) und das Extrahieren der Protokoll-dateneinheiten aus den Informationsfeldern. Durch die CS-Subschicht wird die Funktionalität der ATM-Schicht erweitert und

	Klasse A	Klasse B	Klasse C	Klasse D
Zeitbezug zwischen Quelle und Senke	notwendig		nicht notwendig	
Bitrate	konstant	variabel		
Verbindungstyp	verbindungsorientiert			verbindungslos

Tabelle 2.3: Dienstklassen der ATM-Anpassungsschicht [138]

Anpassungsfunktionen, wie z. B. die Behandlung von Zellverlusten oder von Verzögerungsschwankungen, werden für die Dienste der höheren Schichten zur Verfügung gestellt. Um die Anzahl der AAL-Protokolle für die Vielzahl der Anwendungen zu begrenzen, wird in der ITU-T Empfehlung I.362 [138] eine Klassifizierung vorgenommen, die in Tabelle 2.3 wiedergegeben ist. Beispiele für die Verwendung der Dienstklassen sind:

- Klasse A: Video- und Audiodienste mit konstanter Bitrate oder Emulation durchschalteter Kanäle
- Klasse B: Video- und Audiodienste mit variabler Bitrate
- Klasse C: Verbindungsorientierte Datenkommunikation
- Klasse D: Verbindungslose Datenkommunikation

Durch die ITU-T Empfehlung I.363 wurden vorerst für die vier Dienstklassen fünf Protokollvarianten, sogenannte AAL-Typen, standardisiert, die durch unterschiedliche Funktionen in der SAR- und CS-Subschicht für die nächsthöhere Schicht verschiedene Dienstzugangspunkte (*service access points*, SAPs) zur Verfügung stellen. Für Dienste mit konstanter Bitrate (Klasse A) ist der AAL Typ 1 definiert. Er bietet der nächsthöheren Schicht eine Nutzlast von 47 byte pro Zelle. Für Dienste der Klasse B ist der AAL Typ 2 vorgesehen, aber auch eine Erweiterung des Typs 1 wäre möglich. Die Dienstklassen C und D werden durch den AAL Typ 3/4 unterstützt. Für VBR-Dienste, die keinen Zeitbezug zwischen Quelle und Senke benötigen, wurde schließlich der AAL Typ 5 definiert. Er besitzt im Vergleich zum Typ-3/4 einen geringeren Overhead. Durch den AAL Typ 5 können Benutzerdaten mit einer Länge von 1 bis 65535 byte zu einer AAL-SDU zusammengefaßt werden.

Für die Übermittlung MPEG-codierter Videodatenströme ist die wesentliche Funktion der CS-Subschicht die Erkennung von Zellverlusten. Für die Übermittlung mit konstanter Bitrate werden momentan die AAL-Typen 1 oder 5 verwendet [34, 234]. Die Behandlung der Zellverluste durch FEC-Mechanismen kann entweder in der AAL [151] oder einer höheren Schicht erfolgen. Makroblöcke, die durch nicht behebbare Zellverluste fehlen, können schließlich im Decodierer ersetzt werden [119]. Da auch der Decodierer zeitliche Schwankungen von

Paketankünften ausgleichen kann, ist die Behandlung von Übertragungszeitschwankungen durch die AAL nicht zwingend notwendig [150]. Da der AAL Typ 2 für die Übermittlung von VBR-codierten Videodaten nie spezifiziert wurde, wird auch hierfür momentan die Verwendung der Typen 1 und 5 diskutiert [150]. Speziell für die Übermittlung von MPEG-2 TS-Paketen werden in [2] mehrere AAL-Protokollvarianten vorgeschlagen. Zwei Verfahren für die direkte Paketierung der codierten Makroblöcke eines H.261-Codierers werden in [93] untersucht. Eine systematische Einordnung verschiedener Fehlerkorrekturmethode für die Übertragung paketierter Videodaten in das ATM-Protokollmodell findet sich in [216].

2.2.3 Charakteristika und Anforderungen zukünftiger Dienste

Das Ziel des Breitband-ISDN ist die Integration aller Dienste (auch der Schmalbanddienste) für die Übermittlung von verschiedenen Darstellungsmedien in einem universellen Netzwerk, vom einfachen heutigen Telefondienst bis zum HDTV-Verteildienst (*High Definition Television*). Dabei ist auch die Übermittlung einer beliebigen Kombination mehrerer Medien möglich (Multimedia-Dienste). Eine Klassifizierung der Dienste kann nach verschiedenen Kriterien erfolgen. Im folgenden wird ein Klassifizierungsschema vorgestellt, das die Einordnung des im Rahmen dieser Arbeit untersuchten Video-On-Demand-Dienstes erlaubt. Anschließend werden die Dienstgüteanforderungen diskutiert, die verschiedene Darstellungsmedien an ein integrierendes Kommunikationsnetz stellen, wobei besonders auf die Anforderungen für die Übermittlung codierter Videodatenströme eingegangen wird.

2.2.3.1 Dienstklassifikation für das B-ISDN

In [135, 291] wird eine Einteilung der Dienste aus Netzsicht vorgestellt. Die Dienste werden unterteilt in interaktive Dienste und Verteildienste. Die interaktiven Dienste unterteilen sich in Dialogdienste, Nachrichtendienste und Abrufdienste. Bei den Verteildiensten wird unterschieden zwischen Verteildiensten mit und ohne individuelle Darstellungskontrolle durch den Benutzer.

Dialogdienste erlauben die bidirektionale symmetrische oder asymmetrische Kommunikation zwischen verschiedenen Benutzern in Echtzeit. Dabei wird die zu übertragende Information von einem der Benutzer erzeugt und an einen oder mehrere andere Teilnehmer übermittelt. Durch Nachrichtendienste werden Botschaften zwischen individuellen Benutzern übermittelt, wobei die Botschaften zwischengespeichert werden können und keine Echtzeitbedingungen zu erfüllen sind. Durch einen Abrufdienst können Informationen von einem Informationszentrum abgerufen werden, die ein Dienstanbieter zur Verfügung stellt.

Bei Verteildiensten ohne individuelle Darstellungskontrolle wird von einem Dienstanbieter ein kontinuierlicher Informationsfluß erzeugt, der einer unbegrenzten Anzahl von autorisierten

Benutzern zur Verfügung steht. Die Benutzer haben keinen Einfluß auf die zeitliche Darstellung der Informationen. Bei Verteildiensten mit individueller Darstellungskontrolle werden die Informationen in Einheiten unterteilt, die zyklisch wiederholt werden, und der Benutzer kann eine oder mehrere Einheiten auswählen. In [103, 135, 173] befinden sich Übersichten mit Beispielen für die verschiedenen Dienstklassen.

Dienste, deren Schwerpunkt auf dem Medium Video liegt, lassen sich in drei Kategorien einteilen [204]:

- Videoverteildienste (*video distribution services*),
- Videoarchiv- und Abrufdienste (*video-on-demand services*) und
- Videodialogdienste (*video communication services*).

Durch Videoverteildienste können digitale Fernsehkanäle angeboten werden. Der Konsument hat dabei, wie beim heutigen analogen Fernsehempfang, keine Möglichkeit, das Programm auf den einzelnen Kanälen zu beeinflussen. Jedoch ist über die Kanalwahl der Benutzer eine Steuerung der Videodatenströme durch den Dienstanbieter möglich (*Switched Video Broadcast*, SVB). Dagegen liegt die Präsentationskontrolle bei Videoarchiv- und Abrufdiensten beim Benutzer, der entscheiden kann, wann er welches Videomaterial abrufen will, das der Dienstanbieter auf magnetischen oder optischen Speichermedien bereitstellt.

Bei beiden Diensten werden vom Benutzer hohe Anforderungen an die Dienstqualität gestellt, die, auch im Preis-Leistungsverhältnis, mindestens das Niveau heutiger analoger Fernseherteildienste erreichen müssen. Dazu müssen Vorkehrungen getroffen werden, um Bitfehler bei der Übertragung oder Zellverluste im ATM-Netz auf der Empfängerseite, z. B. durch Vorwärtsfehlerkorrektur, auszugleichen. Video-on-Demand-Dienste müssen die Funktionalität heutiger Videorekorder bieten, wie etwa schnellen Vor- und Rücklauf oder Pause und Start an einer beliebigen Stelle. Bei Videoverteildiensten muß es das Codierverfahren erlauben, innerhalb einer akzeptablen Zeitspanne den Kanal zu wechseln. Die Bitrate, die hier vom Dienstanbieter zum Endteilnehmer benötigt wird, ist um ein Vielfaches größer als die Bitrate in Rückrichtung, da der Rückkanal nur für die Signalisierung benötigt wird.

Die Videodaten können entweder off-line (z. B. Spielfilme) oder on-line in Echtzeit (z. B. Nachrichtensendungen oder Live-Übertragungen) codiert werden. In jedem Fall muß die Videoinformation vom Dienstanbieter nur einmal codiert werden, sie muß aber von jedem Teilnehmerendgerät decodierbar sein. Dies legt den Einsatz eines asymmetrischen Codierverfahrens nahe, das durch einen hohen Berechnungsaufwand bei der Codierung einen hohen Kompressionsfaktor und eine gute Bildqualität erzielt, bei dem die Decodierung jedoch nur einen geringen Berechnungsaufwand erfordert und deshalb eine kostengünstige Implementierung in den Teilnehmerendgeräten (Set-Top-Box (STB) oder Personal Computer (PC)) erlaubt.

Zu den Videokommunikationsdiensten zählen Videokonferenzdienste oder Videotelefonie-dienste, im weiteren Sinne auch CSCW-Dienste (*computer supported cooperative work*), wenn dabei der Anteil der Videodaten am Gesamtdatenvolumen überwiegt. Für diese Dienste ist entscheidend, daß die Videocodierung und -decodierung in Echtzeit ohne große Verzögerungen durchgeführt wird, wodurch die mögliche Komplexität der verwendbaren Codierverfahren eingeschränkt wird und eher symmetrische Codierverfahren eingesetzt werden können. Die Anforderungen an die Videoqualität sind jedoch i. allg. geringer als bei Verteildiensten.

2.2.3.2 Dienstgüteanforderungen verschiedener Darstellungsmedien

Die Dienstgüteanforderungen, die durch zukünftige multimediale Kommunikationsdienste an ein diensteintegrierendes Kommunikationsnetz gestellt werden, sind von einer Vielzahl von Parametern und Verfahren (z. B. Codierverfahren¹) abhängig, die eine detaillierte Übersicht nahezu unmöglich machen und zudem die Aussagekraft einer solchen Übersicht zweifelhaft erscheinen lassen. In Tabelle 2.4 sind deshalb für die drei Kategorien Audio, Video und Daten Richtwerte zusammengefaßt. Der Bereich der Richtwerte deckt jeweils ein breites Spektrum verschiedener Anwendungen und möglicher Verfahren für die Übermittlung der einzelnen Medien ab.

Medium	mittlere Bitrate [Mbit/s]	maximal zulässige Verzögerung [s]	max. zulässige Verzögerungs- schwankung [ms]	maximale Bitfehler- wahrschein- lichkeit	maximale Zellverlust- wahrschein- lichkeit
Audio	0,032–1,4112	0,025–0,4	10	10^{-1}	10^{-1}
Video (uncodiert)	140–270	0,25	10	10^{-2}	10^{-3}
Video (codiert)	0,1–60	0,25	1	10^{-6}	10^{-9}
Daten	0,01–100	10^{-5} – 10^3	—	—	—

Tabelle 2.4: Dienstgüteanforderungen für die Datenübertragung bei verschiedenen Darstellungsmedien nach [109, 130, 204, 51, 260]

Die Kategorie Audio umfaßt die Anforderungen von Sprache in heutiger Telefonqualität bis hin zu Musik in Zweikanal-CD-Qualität. Für die unkomprimierte digitale Übertragung von Sprache in Telefonqualität (maximal 3,4 kHz) ist eine konstante Bitrate von 32 kbit/s oder 64 kbit/s ausreichend. In der ITU-T Empfehlung G.114 [130] wird eine Verzögerungszeit für internationale Telefongespräche von bis zu 0,4 s als akzeptabel betrachtet, wenn

¹Der Begriff Codierung wird im Rahmen dieser Arbeit immer im Sinne einer redundanzmindernden komprimierenden Codierung verstanden

Echo-Unterdrückung verwendet wird. Verzögerungen über 0,4 s sollten demnach nur in Ausnahmesituationen auftreten. Nach dem MPEG-1 Standard codierte Audiodaten erfordern eine mittlere Bitrate von 32–384 kbit/s. Dabei sind Abtastfrequenzen von 32 kHz, 44,1 kHz oder 48 kHz möglich. Die unkomprimierte Übermittlung von digitalen Stereo-Audiosignalen in CD-Qualität erfordert eine Bitrate von etwa 1,4 Mbit/s.

Unter der Kategorie Daten sind die Anforderungen zusammengefaßt, die an ein Kommunikationsnetz durch die Datenübertragung zwischen Rechenanlagen gestellt werden. Diese sind überaus vielfältig [178]. Die notwendige Bitrate reicht von mehreren kbit/s bis über 100 Mbit/s, und die zulässige Verzögerung schwankt in einem weiten Bereich, je nach Anwendung. Der Datenaustausch zwischen Großrechenanlagen ist gekennzeichnet durch umfangreiche Datenmengen, stellt aber keine hohen Anforderungen an die maximal zulässige Verzögerung der Übertragung. Der Betrieb mehrerer herkömmlicher Datenendgeräte (*terminals*) an einem Großrechner erfordert Antwortzeiten im Millisekundenbereich. Die zu übertragenden Datenmengen sind stark vom verwendeten Datenendgerät (Text oder Grafik) abhängig.

Moderne Rechnersysteme, die nach dem *Client-Server*-Paradigma betrieben werden, stellen wesentlich höhere Anforderungen an die benötigten Bitraten. Bei der Bearbeitung und Visualisierung von Grafiken müssen sehr große Datenmengen übertragen werden, und die Verwendung von entfernten Aufrufen (*remote procedure calls*) in verteilten Anwendungen erfordert sehr kleine Antwortzeiten. Das Verkehrsaufkommen bei diesen Architekturen ist sehr sporadisch. Auf der Anwendungsschicht können bei Datenübertragungen keine Informationsverluste toleriert werden. Zellverluste oder Bitfehler in den unteren Schichten können durch wiederholte Übertragung ausgeglichen werden.

Format / Standard	gesamte Bildgröße [Breite × Höhe]	sichtbare Bildgröße [Breite × Höhe]	Bildwiederhol- frequenz [Hz]	Bildtyp
CCIR 601	858 × 525	720 × 480	60	Halbbild
	k. A.	720 × 576	50	
PAL	910 × 525	768 × 483	60	
	864 × 625	533 × 400	50	
NTSC	910 × 525	768 × 483	60	
HDTV	2304 × 1250	1920 × 1100	50	
CIF	—	360 × 288	30	Vollbild
Q-CIF	—	180 × 144	30	
SIF	—	360 × 240	30	
	—	360 × 288	25	

Tabelle 2.5: Standardisierte Formate analoger und digitaler Fernsehbilder nach [128, 204, 260] in Bildpunkten

Die Dienstgüteanforderungen für die Übermittlung digitaler Videodaten sind von vielen Faktoren abhängig. Generell unterschiedliche Anforderungen ergeben sich für codierte und uncodierte Videodatenströme. Die Bitrate, die für die Übermittlung von uncodierten Videodatenströmen in Fernsehqualität benötigt wird, beträgt etwa 140–270 Mbit/s; die Bitrate für HDTV liegt noch weit darüber. Die benötigte Bitrate ist stark abhängig von der Größe des verwendeten Bildformats. Eine Übersicht gängiger Bildformate zeigt Tabelle 2.5. Durch die Verwendung von Codierv Verfahren läßt sich der Bitratenbedarf erheblich senken. Eine genauere Auflistung der Datenraten verschiedener standardisierter oder stark verbreiteter Kompressionsalgorithmen zusammen mit den erzielbaren Kompressionsfaktoren findet sich in [204, S. 188]. Die Charakteristika verschiedener experimenteller Videocodierer werden in [107, 185] beschrieben.

Die maximal zulässige Bitfehlerwahrscheinlichkeit und Zellverlustwahrscheinlichkeit für die uncodierte Übermittlung ist relativ hoch, da hier nur Verfälschungen der Bildpunkte in einem kleinen Bereich eines Videobildes auftreten, die durch das menschliche Auge nur schwer wahrgenommen werden. Bei der Verwendung von Codierv Verfahren können sich Übertragungsfehler, z. B. beim Verlust eines Bewegungsvektors, auf einen größeren Bildbereich auswirken. Die maximal zulässigen Wahrscheinlichkeiten sind stark abhängig von den durch das Codierv Verfahren verwendeten Fehlerkorrekturmechanismen. So können auf der Empfängerseite verlorengegangene Zellen durch Vorwärtsfehlerkorrektur-Mechanismen aus den korrekt übertragenen Zellen wiedergewonnen werden. So wurden z. B. in [151] die Fehlerkorrekturmechanismen des AAL Typ 1 für die CBR-Übertragung von MPEG-2-TS-Paketen untersucht. Durch die gemeinsame Fehlersicherung von 194 Zellen, die in einer Matrix angeordnet werden, können bis zu 4 verlorene Zellen einer Matrix korrigiert werden. Die im MPEG-2-Standard vorgesehenen Fehlerkorrekturmechanismen sind nach [186] ausreichend für Zellverlustwahrscheinlichkeiten kleiner als 10^{-5} . Für nicht zu korrigierende Übertragungsfehler besteht schließlich die Möglichkeit, die fehlenden Makroblöcke durch zeitliche oder räumliche Interpolation benachbarter Blöcke zu schätzen. Dafür werden z. B. in [119] mehrere Möglichkeiten vorgestellt und verglichen.

2.3 Video-On-Demand

Mit dem Schlagwort Video-On-Demand (VOD) werden Breitband-Abrufdienste und -Verteilungsdienste bezeichnet, bei denen die kontinuierlichen Medien Video und Audio einen prägenden Anteil besitzen und die Präsentationskontrolle mehr oder weniger beim Benutzer des Dienstes liegt. Nach dem Grad des Einflusses des Benutzers auf die Präsentation des Videomaterials können drei Typen von VOD unterschieden werden [228]:

- *Near* VOD (NVOD),

- *Staggered VOD* (SVOD) und
- *Real* oder *Interactive VOD* (IVOD).

NVOD ist die digitale Variante bereits heute üblicher analoger Fernsehverteilendienste, bei denen im Tages- oder Wochenrhythmus Sendungen wiederholt werden. Bei SVOD werden die Programme in regelmäßigen kurzen Zeitintervallen (z. B. 5–10 Minuten) gestartet, so daß der Benutzer nur eine geringe Wartezeit vor dem Start der gewünschten Sendung in Kauf nehmen muß. Den höchsten Grad an Individualität bietet IVOD. Hier kann der Benutzer zu jeder beliebigen Zeit seine Sendung aus einem umfangreichen Katalog auswählen, die ihm dann durch das VOD-System zur Verfügung gestellt wird. Zusätzlich kann der Benutzer die Präsentation des Programms jederzeit beeinflussen. Dafür stehen ihm Funktionen ähnlich denen eines Videorekorders zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wird speziell ein Video-On-Demand-System für *interactive VOD* untersucht, und im weiteren ist mit VOD immer IVOD gemeint.

2.3.1 Referenzmodell

Eine sehr allgemeine Systemarchitektur für die Bereitstellung eines Video-On-Demand-Dienstes über das B-ISDN zeigt Abbildung 2.8. Die für die Realisierung eines solchen Dienstes benötigten Systemkomponenten sind in Anlehnung an die DAVIC-Spezifikation 1.0 (*Digital Audio-Visual Council*) [48] gewählt.

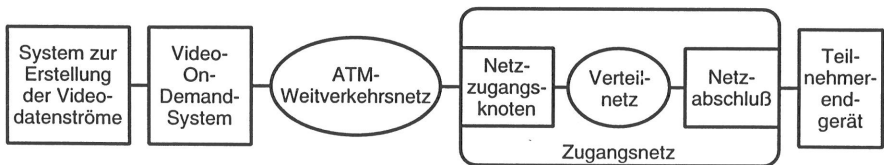


Bild 2.8: Allgemeine Systemarchitektur für einen Video-On-Demand-Dienst

Für die Bereitstellung des codierten Videodatenmaterials durch einen Inhaltsanbieter (*content provider*) wird ein System benötigt (*Content Provider System, CPS*), das die Digitalisierung, Bearbeitung und Codierung von Bild- und Tonmaterial ermöglicht. Videoinhalte können z. B. von Nachrichtenagenturen, Fernsehgesellschaften, Filmgesellschaften und deren Verleihorganisationen sowie von Kaufhausketten oder Videospielherstellern bereitgestellt werden.

Das Video-On-Demand-System (*Service Provider System, SPS*) wird vom eigentlichen Anbieter (*service provider*) des Video-On-Demand-Dienstes betrieben. Er stellt den Speicherplatz für die Videodatenströme zur Verfügung, ist für das Benutzerinterface und die Kommunikation mit den Dienstnutzern (*consumers*) zuständig und erstellt die Abrechnung für die

Nutzungsgebühren. Video-On-Demand-Anbieter können u. a. Verlage, Fernseh- und Filmgesellschaften sowie Netzbetreiber sein, die ihre Geschäftsfelder dadurch um neue Dienstleistungen ergänzen können. Als Teilnehmerendgerät (*Customer Premises Equipment*, CPE oder *Service Consumer System*, SCS) kann entweder ein PC oder eine STB in Verbindung mit einem Fernsehgerät verwendet werden.

Für die Übermittlung der Videodatenströme und der Signalisier Nachrichten zwischen dem VOD-System und dem Teilnehmerendgerät wird ein Kommunikationsnetz benötigt (*SPS-SCS Delivery System*), das von einem Netzbetreiber (*network provider*) zur Verfügung gestellt wird. Das Kommunikationsnetz unterteilt sich in das ATM-Weitverkehrsnetz (*core network*) und das Zugangsnetz (*access network*).

Das Zugangsnetz beinhaltet den Netzzugangsknoten (*access node*), das Verteilnetz (*distribution network*) und die Netzabschlüsse (*network terminations*) für die Teilnehmer. Die Verkabelung der Teilnehmeranschlüsse verursacht sehr hohe Kosten [230], weshalb man bestrebt ist, für das Zugangsnetz vorhandene Infrastrukturen zu nutzen. Daraus ergeben sich mehrere Alternativen [22, 105, 146].

Bei *hybrid fiber/coax*-Lösungen (HFC) wird ein vorhandenes baumförmiges Kabelfernsehverteilstrecknetz mit Kupfer-Koaxkabeln verwendet. Die Signale des Video-On-Demand-Dienstes werden in Frequenzbändern übertragen, die den konventionellen Kabelfernsehempfang nicht beeinflussen. Alternativ kann auch ein passives optisches Zugangsnetz (*passive optical network*, PON) verwendet werden. Das optische Zugangsnetz wird durch eine *optical network unit* (ONU) abgeschlossen, die die optischen Signale in elektrische umwandelt und die einzelnen Verbindungen multiplext und demultiplext. Nach deren Lage unterscheidet man *Fiber in the Loop*- (FITL), *Fiber to the Curb*- (FTTC), *Fiber to the Building*- (FTTB) und *Fiber to the Home*-Systeme (FTTH).

ADSL-Systeme (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) basieren auf einer sternförmigen Verkabelung mit Zweidrahtleitungen (*twisted pairs*), die durch das Telefonnetz nahezu flächendeckend vorhanden sind. ADSL-Systeme ermöglichen eine asymmetrische Verbindung zwischen dem Netzzugangsknoten und dem Teilnehmerendgerät, bei der die Bitrate, die in der Hinrichtung, d. h. vom Netzzugangsknoten zum Teilnehmerendgerät, zur Verfügung steht, wesentlich höher ist als die in der Rückrichtung. Die Zweidrahtleitungen werden über Zugangsadapter und Multiplexer mit dem Netzzugangsknoten verbunden.

Um eine günstige Auslastung der Netzressourcen zu erreichen und gleichzeitig den interaktiven Charakter des VOD-Dienstes für den Benutzer zu gewährleisten, müssen die Standorte der VOD-Systeme und die durch sie angebotenen Videofilme sorgfältig ausgewählt werden. Dadurch können unnötig lange Übertragungswege und Filmduplikate vermieden werden. Als Lösung bietet sich ein hierarchisches System mit lokalen und zentralen VOD-Systemen an [50, 81, 88, 228], das durch schnellen Datenaustausch auf Nachfrageschwankungen reagieren kann, um häufig benötigte Videodatenströme möglichst lokal vorrätig zu haben.

2.3.2 Video-On-Demand-System

2.3.2.1 Architektur

Die wesentlichen Leistungsmerkmale eines Video-On-Demand-Systems sind die Anzahl der Videodatenströme, die es gleichzeitig bearbeiten kann, und die Anzahl der Videofilme, die dem Benutzer zur Auswahl stehen [271]. Das bedeutet, daß der Videosever über ein ausgesprochen leistungsfähiges Kommunikationssystem verfügen muß, wobei die Trennung von Daten- und Kontrollflüssen erstrebenswert ist [246].

Die für die Speicherung der Videofilme möglichen Systeme lassen sich in drei Kategorien unterteilen. Diese unterscheiden sich stark sowohl in ihrer Speicherkapazität und in ihrer Bitrate zum Lesen der Daten als auch in ihrem Preis, bezogen auf die Speicherkapazität oder die Bitrate. Die teuerste und schnellste Speichermöglichkeit bieten RAM-Module (primärer Speicher, *primary storage*). Diese bieten einen wahlfreien Zugriff auf die Daten und begrenzen selbst kaum die Bitrate, mit der die Daten gelesen werden können. Diese wird hauptsächlich durch die Leistungsfähigkeit des Systembusses begrenzt, über den auf die RAM-Module zugegriffen wird. Ein günstigeres Verhältnis von Preis zu Speicherkapazität bieten Festplatten (sekundärer Speicher, *secondary storage*). Durch physikalische Grenzen wird aber die maximale Leserate heutiger Festplatten auf etwa 5–10 Mbyte/s begrenzt. Festplattenspeichersysteme können nach dem Grad der Synchronisation und Nebenläufigkeit der Betriebsweise der einzelnen Festplatten unterteilt werden [236]. Zunehmende Verbreitung finden hier sogenannte RAID-Systeme mit mehreren unabhängigen Festplatten. Da RAID-Systemen eine wichtige Rolle innerhalb der Architektur eines VOD-Systems zukommt, werden die verschiedenen Varianten im nächsten Unterabschnitt beschrieben, und in Kapitel 6 wird die Leistungsfähigkeit einer Variante detailliert untersucht. Das günstigste Preis-Kapazitätsverhältnis bieten Bandlaufwerke und Bandlaufwerke mit Roboter-Bandwechselsystemen (tertiärer Speicher, *tertiary storage*). Sie haben aber den Nachteil, daß die Zugriffszeit durch das Einlegen des Bandes und das sequentielle Durchsuchen des Bandes nach den gewünschten Daten mehrere Sekunden betragen kann. Die Datenleserate selbst liegt bei wenigen Mbyte/s.

Eine Möglichkeit, die Zugriffszeit der Bandlaufwerke zu überbrücken, ist der Einsatz von *Staging*-Festplatten [56], die den Beginn der Videofilme abgespeichert haben, die sich auf den ihnen zugeordneten Bändern befinden. Während also das gewünschte Band eingelegt und auf den Beginn des gewünschten Videofilms positioniert wird, kann bereits der Beginn des Videofilms von der *Staging*-Festplatte gelesen werden, so daß die Verzögerung des Starts des Videofilms, die der Benutzer wahrnimmt, stark reduziert wird. Der Rest des Videofilms wird dann vom Bandlaufwerk auf die *Staging*-Festplatte kopiert und von dort zum Benutzer überspielt. Werden die Restdaten des Videofilms auf der *Staging*-Festplatte nicht mehr benötigt, werden sie schließlich wieder gelöscht.

Ein kosteneffektiver Videoserver muß dafür sorgen, daß die Videodaten zur richtigen Zeit am richtigen Ort, d. h. auf dem effizientesten Speichermedium, zu finden sind. Besonders populäre Filme, die viele Benutzer gleichzeitig sehen wollen, müssen im RAM verfügbar sein, weil die anderen Speichermedien durch ihre begrenzte Bandbreite nur eine bestimmte Anzahl paralleler Datenströme für einen bestimmten Speicherbereich zulassen und deswegen Kopien des Films angelegt werden müssen. Filme durchschnittlicher Popularität können auf Festplatten gespeichert sein. Wenig gefragte Filme dagegen werden auf Bändern gespeichert, und der Benutzer muß eventuell eine geringe Wartezeit bei der Auswahl eines solchen Films in Kauf nehmen.

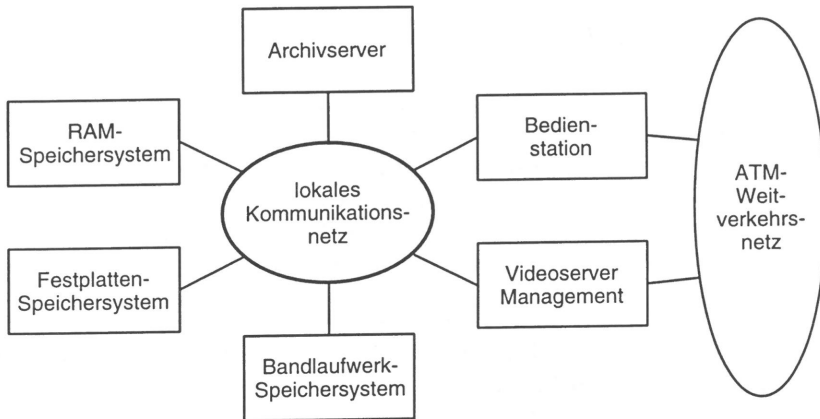


Bild 2.9: Komponenten eines verteilten Video-On-Demand-Systems

Die Architektur eines VOD-Systems sollte skalierbar sein, so daß durch das Hinzufügen von Komponenten sowohl die Speicherkapazität für eine Erweiterung des Programmangebots als auch die Anzahl der parallel aktiven Benutzer unter Beibehaltung einer vorgegebenen Dienstgüte erhöht werden kann. Eine potentiell gute Skalierbarkeit wird durch eine verteilte Realisierung des VOD-Systems erreicht [21, 56, 50, 89, 92, 246]. Die Dateien der Videodatenströme sind in mehreren speziellen Speichersystemen mit RAM, Festplatten und Bandlaufwerken abgelegt.

Die Verwaltung der Metadaten der Dateien übernehmen Archivserver, die die Möglichkeit bieten, Datenbankoperationen auszuführen [182, 203] und damit Managementserver unterstützen, die für die Interaktion mit den Benutzern und das Kontrollflußmanagement zuständig sind. Das Datenflußmanagement für die Videodatenströme der Benutzer ist in mehreren Bediensystemen implementiert. Für die Verbindung zum ATM-Weitverkehrsnetz enthalten die Bedienstationen ATM-Netzadapter. Diese paketieren die MPEG-codierten Videodatenströme in ATM-Zellen unter Verwendung eines geeigneten AAL-Protokolls. Zusätz-

lich können Algorithmen zum Glätten des VBR-Videozellstroms (*spacing*) implementiert werden, um ein günstigeres Verhalten des Zellstroms zu erzielen oder eine Verletzung der mit dem Netzbetreiber vereinbarten Verkehrsparameter zu vermeiden [73, 199].

Die Kommunikation der Komponenten untereinander erfolgt über ein lokales Netz (das natürlich auch ein ATM-Netz sein kann). Eine Übersicht über die Komponenten eines verteilten VOD-Systems gibt Abbildung 2.9, wobei jede gezeigte Komponente mehrfach vorhanden sein kann.

2.3.2.2 RAID-Systeme

Zur Erhöhung der Leistungsfähigkeit und Zuverlässigkeit eines Festplatten-Speichersystems können mehrere Festplatten in einem RAID-System in Form einer Matrix zusammengefaßt werden. Die Organisation der Daten eines RAID-Systems ist bestimmt durch das Datenverteilungsschema (*data distribution scheme*) und den Redundanzmechanismus (*redundancy mechanism*). Durch deren Wahl kann die Leistungsfähigkeit und die Zuverlässigkeit eines RAID-Systems für die jeweilige Anwendung optimiert werden.

Das Datenverteilungsschema definiert die Abbildung der logischen Adressen der Speicherblöcke des RAID-Systems auf die Adressen der Sektoren der einzelnen Festplatten. Dabei können die Festplatten entweder unabhängig adressiert oder zu einer logischen Einheit zusammengefaßt werden, bei der die Daten in sogenannten Streifeneinheiten (*striping units*) über alle Festplatten verteilt werden (*disk striping, disk interleaving*). Eine Streifeneinheit kann einen Bruchteil der Daten eines Speicherblocks enthalten oder auch mehrere ganze Blöcke. Eine Streifeneinheit, die nur Paritätsbits enthält, bezeichnet man als Paritätsstreifeneinheit (*parity stripe unit*). Mehrere Streifeneinheiten werden mit ihrer Paritätsstreifeneinheit zu einem Paritätsstreifen (*parity stripe*) zusammengefaßt [168]. Enthält das RAID-System keine redundanten Daten, können die aufeinanderfolgenden Streifeneinheiten aller Festplatten zu einem Streifen zusammengefaßt werden. Die Anzahl der Streifen entspricht so der Anzahl der Streifeneinheiten pro Platte. Ein Beispiel mit vier Festplatten und zwei Paritätsstreifen zeigt Abbildung 2.10.

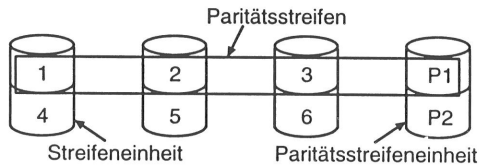


Bild 2.10: Datenverteilungsschema eines RAID-Systems (Beispiel)

Eine Klassifikation der RAID-Systeme kann über die Größe der Streifeneinheiten erfolgen und über die Art und Weise, mit der die redundanten Daten berechnet und über die Festplatten verteilt sind [23, 84, 168, 266]. Durch die Wahl der Größe und Anordnung der Streifeneinheiten wird der Grad der Lastbalancierung, der Parallelität der Datenübertragungen und Nebenläufigkeit mehrerer Zugriffe innerhalb des RAID-Systems bestimmt [83, 84, 120]. So ist es möglich, die Leistungsfähigkeit eines RAID-Systems, besonders den Durchsatz und die Antwortzeit, durch die Wahl der Größe der Streifeneinheit für eine bestimmte Anwendung zu optimieren [29].

Man unterscheidet *fine-grained striping*, durch das jeder adressierbare Speicherblock des RAID-Systems über alle Festplatten verteilt wird, und *coarse-grained striping*, durch das ein adressierbarer Block nicht auf alle Festplatten verteilt wird. Durch *fine-grained striping* erhält man eine optimale Lastbalancierung, kann aber nicht mehrere RAID-Aufträge parallel bearbeiten. Beim *coarse-grained striping* ist die Last eventuell nicht mehr optimal verteilt, es können aber mehrere kleinere RAID-Aufträge durch unterschiedliche Festplatten parallel bearbeitet werden. Die zur Fehlersicherung notwendige Redundanz kann man durch Paritätsbildung oder die Verwendung eines Hamming- oder Reed-Solomon-Codes erzeugen. Bei der Verteilung der redundanten Daten unterscheidet man grob zwischen Schemata, die die redundanten Daten auf wenigen Festplatten konzentriert halten, und Schemata, die die redundanten Daten möglichst gleichmäßig auf alle Platten verteilen. Die Klassifikation der RAID-Systeme erfolgt durch sogenannte *RAID Level* [168]:

- **RAID Level 0 (No Redundancy):** Die Festplatten des RAID-Systems werden zu einem großen logischen Laufwerk zusammengefaßt und die Daten durch *striping* verteilt. Es erfolgt keine Sicherung vor Datenverlust durch redundante Daten.
- **RAID Level 1 (Mirroring):** Alle Daten werden doppelt gespeichert, so daß von jeder Festplatte eine komplette Back-up-Platte existiert. So erhält man ein sehr zuverlässiges System, benötigt aber die doppelte Speicherkapazität.
- **RAID Level 2 (Hamming Coded):** Die Datensicherung erfolgt über einen Hamming-Code, ähnlich wie bei fehlerkorrigierenden Hauptspeichern. Mehrere Festplatten mit Nutzdaten werden durch mehrere Paritätsplatten ergänzt. *Striping* und Codierung geschehen bitweise.
- **RAID Level 3 (Bit-Interleaved Parity):** Die Festplatten mit Nutzdaten werden durch eine Paritätsplatte ergänzt. Damit bietet das System Datensicherheit beim Ausfall einer einzelnen Festplatte. Die Streifeneinheiten enthalten nur ein Bit. Ein Paritätsstreifen enthält jeweils ein Nutzbit aller Festplatten und das dazugehörige Paritätsbit der Paritätsplatte.
- **RAID Level 4 (Block-Interleaved Parity):** RAID Level 4 ist ähnlich wie RAID Level 3, nur daß die Daten nicht bitweise auf die Nutzdatenplatten verteilt sind, son-

dern in größeren Streifeneinheiten. Alle Paritätsstreifeneinheiten befinden sich auf der Paritätsplatte.

- **RAID Level 5 (Block-Interleaved Distributed-Parity):** Bei einem System mit RAID Level 4 muß bei jedem Schreibzugriff auf die Paritätsplatte zugegriffen werden. Um diesen Engpaß zu eliminieren, werden bei RAID Level 5 die Paritätsblöcke gleichförmig auf alle Platten verteilt. Mehrere Möglichkeiten für die Verteilung der Paritätsblöcke wurden z. B. in [169, 170] untersucht.
- **RAID Level 6 (PQ Redundant):** Um die Daten gegen den Ausfall zweier Festplatten zu sichern, werden zusätzlich zu den Nutzdatenplatten zwei weitere Festplatten verwendet. Die Datenverteilung geschieht wie bei RAID Level 5 blockweise. Zusätzlich zu den Paritätsblöcken werden redundante Blöcke verwendet, die durch einen Reed-Solomon-Code erzeugt werden.

2.3.3 Teilnehmerendgeräte

Als Teilnehmerendgerät kann entweder ein PC oder eine Set-Top-Box verwendet werden. Die Set-Top-Box bildet das Bindeglied zwischen dem Netzabschluß und einem analogen Fernsehgerät. Da nahezu jeder private Haushalt über mindestens ein Fernsehgerät verfügt, bietet eine hochintegrierte kostengünstige STB eine einfache Möglichkeit, über das gewohnte Fernsehgerät zusätzliche interaktive Dienste anzubieten [36]. Es kann z. B. der Dienstanbieter dem Benutzer während der Dienstnutzungszeit die STB gegen eine Grundgebühr überlassen. Auf längere Sicht können die Funktionen der Set-Top-Box auch direkt in das Fernsehgerät integriert werden. Die Funktionalität, die eine STB anbietet, kann minimal sein und nur die Programmwahl und den Start eines ausgewählten Videofilms anbieten, sie kann aber auch die Möglichkeiten eines Multimedia-PCs bieten und genügend Speicher und Prozessorleistung besitzen, um z. B. interaktive Spiele zu ermöglichen.

Der Benutzer interagiert mit der Set-Top-Box meist über eine Infrarot-Fernbedienung, mit der er z. B. die Angebote der verschiedenen Video-On-Demand-Dienste vergleichen und ein Programm auswählen kann. Eine übersichtliche Fernbedienung besitzt nur eine begrenzte Anzahl Knöpfe. Die Bedienoberfläche für den VOD-Dienst muß so gestaltet sein, daß es damit einfach möglich ist, durch das Angebot zu navigieren. Für interaktive Spiele kann ein Joystick verwendet werden. Für komplexere Interaktionen ist auch der Anschluß einer Infrarot-Tastatur möglich. Wird ein PC als Endgerät verwendet, kann die Tastatur, eine Maus oder ein Joystick verwendet werden.

Die rechenintensivste Funktion bei der Nutzung eines digitalen VOD-Dienstes ist die Decodierung der Datenströme, die nur durch spezielle Signalprozessoren in Echtzeit möglich ist. Das Decodieren eines MPEG-2-Transportstroms erfordert nach einer eventuell notwendigen

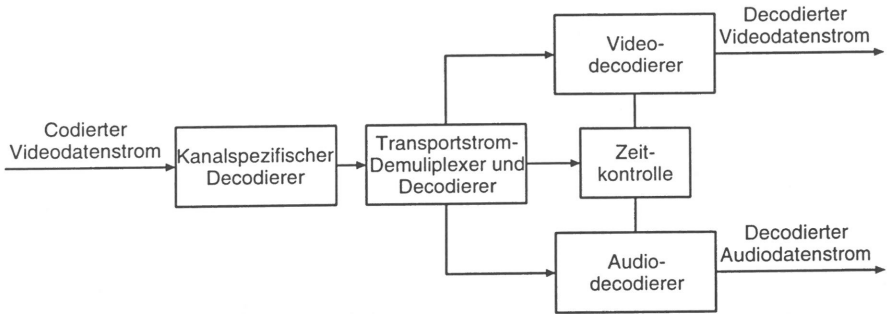


Bild 2.11: Prototypisches Blockdiagramm eines MPEG-2-Transportstrom-Decodierers [129]

kanalspezifischen Decodierung und Fehlerbehebung die Decodierung des Transportstroms (*Transport Stream, TS*) und das Demultiplexen der darin enthaltenen Audio- und Videodatenströme, die dann jeweils decodiert werden (Abbildung 2.11). Die digitalen Datenströme werden durch jeweils einen A/D-Wandler in analoge Signale umgewandelt, die schließlich vom Fernsehgerät präsentiert werden.

Kapitel 3

Methoden der stochastischen Modellierung und Leistungsuntersuchung

Existiert bereits eine Realisierung eines technischen Systems, können Leistungsuntersuchungen direkt durch Messungen am realen System durchgeführt werden. Bei der Entwicklung komplexer technischer Systeme besteht jedoch bereits in der Entwurfsphase die Notwendigkeit, die Leistungsfähigkeit des zukünftigen Systems zu bestimmen, um z. B. vorgegebene Leistungskriterien zu erfüllen. Um Leistungsuntersuchungen bereits während des Entwicklungsprozesses durchführen zu können, muß ein Modell des zukünftigen Systems erstellt werden. Die Interpretation der Leistungsuntersuchungen liefert Erkenntnisse, die zur Dimensionierung und Optimierung des Systems verwendet werden können.

Das Modell eines technischen Systems beschreibt die für dessen Funktion wesentlichen allgemeinen und abstrakten Systemmerkmale. Dabei wird das reale technische System abstrahiert und in geeigneter mathematischer, graphischer oder mehr oder weniger formaler textlicher Form dargestellt. Die Modellierung fördert das Verständnis der Funktionsweise und bildet die Grundlage für die Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Systems [94].

Das Verhalten der in dieser Arbeit untersuchten Datenverarbeitungsanlagen und Kommunikationssysteme ist durch eine Vielzahl sich überlagernder Einflüsse bestimmt. Für die Beschreibung und Untersuchung derartiger Systeme werden häufig verkehrstheoretische Modelle verwendet, da es oft nicht möglich oder notwendig ist, alle Einflüsse getrennt zu modellieren. Ein solches Modell beinhaltet Zufallsvariable und stochastische Prozesse zur Beschreibung der zufallsabhängigen Komponenten, wie z. B. das Eintreffen von Anforderungen, die das System zu bearbeiten hat, eine Beschreibung der Struktur des Systems und dessen Betriebsorganisation. Das Strukturmodell beschreibt die Komponenten des Systems, deren

Anordnung und deren Operationen auf die Anforderungen. Die Betriebsorganisation ist eng mit den Komponenten des Strukturmodells verbunden und beschreibt die Art und Weise, in der die Operationen ausgeführt werden [162, 270]. Daher ist die Beschreibung der Betriebsorganisation oft ein integraler Bestandteil der Modellkomponenten, die zur Beschreibung des Strukturmodells des Systems verwendet werden.

In diesem Kapitel werden die methodischen Grundlagen gelegt, die in den folgenden Kapiteln für die Modellierung der MPEG-codierten Videodatenströme mit variabler Bitrate und die Leistungsuntersuchung der Systeme, die diese Videodatenströme verarbeiten, benötigt werden. Nach der Definition von Zufallsvariablen und stochastischen Prozessen und der Beschreibung von deren charakteristischen Kenngrößen werden die im Rahmen dieser Arbeit benötigten Zufallsvariablen und Prozesse vorgestellt. Von besonderer Bedeutung für die Modellierung VBR-codierter Videodatenströme sind selbstähnliche stochastische Prozesse. Darauf folgt ein Überblick über hierarchische Möglichkeiten der Verkehrsmodellierung und eine Zusammenstellung der später verwendeten Modellkomponenten. Schließlich werden die Grundlagen der Simulationstechnik und deren Anwendung aufgezeigt.

3.1 Zufallsvariable

3.1.1 Definition, Verteilungen und Momente

Zufallsabhängige Einflüsse in technischen Systemen werden durch Zufallsvariable beschrieben. Diese können wie folgt definiert werden: Es sei \mathcal{S} die Menge aller möglichen Elementarereignisse ξ eines Zufallsexperiments. Die Auswahl $\mathcal{F} = \{\mathcal{A}, \mathcal{B}, \dots\} \subseteq \mathcal{P}(\mathcal{S})$ von Teilmengen bilde die möglichen Ereignisse des Zufallsexperiments. Für \mathcal{F} muß gelten $\mathcal{S} \in \mathcal{F}$, $\emptyset \in \mathcal{F}$, $\mathcal{X} \in \mathcal{F} \Rightarrow \overline{\mathcal{X}} \in \mathcal{F}$ und $\mathcal{X}_1, \mathcal{X}_2, \dots, \mathcal{X}_n \in \mathcal{F} \Rightarrow \bigcup_{i=1}^n \mathcal{X}_i \in \mathcal{F} \forall n \in \mathbb{N}$. Dabei ist \emptyset die leere Menge und $\overline{\mathcal{X}}$ die zu \mathcal{X} komplementäre Menge $\mathcal{S} \setminus \mathcal{X}$. Die reellwertige Funktion X , die durch die Abbildung $X: \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$ jedem Elementarereignis $\xi \in \mathcal{S}$ eine reelle Zahl $X(\xi)$ zuordnet, heißt reelle eindimensionale Zufallsvariable, wenn für jedes Intervall $I \in \mathbb{R}$ das Urbild $X^{-1}(I) = \{\xi \in \mathcal{S} \mid X(\xi) \in I\} \in \mathcal{F}$ ist [16, 68, 225].

$X(\xi_0)$ ist die Zahl, die dem speziellen Ergebnis ξ_0 zugeordnet ist und wird als Realisierung (Beobachtung, *observation*) von X bezeichnet. Die Menge aller Zahlen, die eine Realisierung einer Zufallsvariablen X annehmen kann, wird als der Wertebereich \mathcal{W} der Zufallsvariablen X bezeichnet. Enthält der Wertebereich \mathcal{W} nur endlich viele oder abzählbar unendlich viele verschiedene Werte, so heißt die Zufallsvariable X diskret, enthält er unendlich viele Werte, nennt man sie kontinuierlich.

Die Zufallsvariable X nimmt genau dann den Zahlenwert x an, wenn bei der Durchführung des Zufallsexperiments das Ereignis $\mathcal{A}_x = \{\xi \in \mathcal{S} \mid X(\xi) = x\} \in \mathcal{F}$ eintritt. Den Ereignissen

\mathcal{A}_x kann über die Axiome von Kolmogoroff durch die Abbildung P eine Wahrscheinlichkeit $P(\mathcal{A}_x)$ zugeordnet werden. Damit wird auch der Realisierung x eine Wahrscheinlichkeit $P\{X = x\}$ zugeordnet und es gilt

$$P\{X = x\} = P\{\mathcal{A}_x\} = P\{\xi \in \mathcal{S} \mid X(\xi) = x\}. \quad (3.1)$$

Entsprechend gilt für $X \in]a, b]$

$$P\{a < X \leq b\} = P\{\mathcal{A}_{]a,b]}\} = P\{\xi \in \mathcal{S} \mid a < X(\xi) \leq b\}, \quad (3.2)$$

wobei für a auch $-\infty$ zugelassen ist. Das statistische Verhalten einer Zufallsvariablen X wird durch die Verteilungsfunktion

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} = P\{X^{-1}(] - \infty, x])\} = P\{\mathcal{A}_{]-\infty, x]}\} \quad (3.3)$$

beschrieben, die die Wahrscheinlichkeit angibt, daß die Zufallsvariable X den Wert x nicht überschreitet. $F_X^c(x) = 1 - F_X(x)$ heißt komplementäre Verteilungsfunktion. Auf Grund der Kolmogoroffschen Axiome gilt

$$F_X(-\infty) = P\{\emptyset\} = 0 \quad \text{und} \quad \lim_{x \rightarrow \infty} F_X(x) = P\{\mathcal{S}\} = 1. \quad (3.4)$$

Durch die Ableitung der Verteilungsfunktion $F_X(x)$ erhält man die Verteilungsdichtefunktion (Vdf)

$$f_X(x) = \frac{dF_X(x)}{dx}. \quad (3.5)$$

Das Verhalten einer diskreten Zufallsvariablen kann auch durch ihre Verteilung

$$p_X(x_i) = P\{X = x_i\}, \quad x_i \in \mathcal{W}, \quad i \in \mathbb{N} \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^{\infty} p_X(x_i) = 1 \quad (3.6)$$

beschrieben werden. Die Verteilungsfunktion einer diskreten Zufallsvariablen ergibt sich aus deren Verteilung durch die Summe

$$F_X(x) = P\{X \leq x\} = \sum_{x_i \leq x} P\{X = x_i\}. \quad (3.7)$$

Zur Charakterisierung einer Verteilungsfunktion werden deren k -te gewöhnliche Momente m_k und zentrale Momente μ_k verwendet mit

$$m_k = E[X^k] = \int_{-\infty}^{\infty} x^k dF(x) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} x^k f_X(x) dx & X \text{ kont.} \\ \sum_{i=1}^{\infty} x_i^k p_X(x_i) & X \text{ diskret} \end{cases} \quad \text{und} \quad (3.8)$$

$$\mu_k = E[(X - m_1)^k] = \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_1)^k dF(x) = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} (x - m_1)^k f_X(x) dx & X \text{ kont.} \\ \sum_{i=1}^{\infty} (x_i - m_1)^k p_X(x_i) & X \text{ diskret} \end{cases}. \quad (3.9)$$

Die am häufigsten verwendeten Momente sind der Erwartungswert (Mittelwert) $m_1 = E[X]$ und die Varianz $\mu_2 = \text{VAR}[X]$. Anstatt der Varianz wird auch die Standardabweichung $\sigma_X = \sqrt{\text{VAR}[X]}$ oder der Variationskoeffizient $c_X = \sigma_X/E[X]$ verwendet.

Für die Beschreibung der Zufallsprozesse in Rechner- und Kommunikationssystemen werden häufig die folgenden Verteilungen verwendet [42, 71, 167]:

- **Gleichverteilung** $U(a, b)$:

$$\text{Verteilungsdichtefunktion: } f_X(x) = \begin{cases} \frac{1}{b-a} & x \in [a, b] \\ 0 & x \in \mathbb{R} \setminus]a, b[\end{cases} \quad \text{mit } b > a, a, b \in \mathbb{R}$$

$$\text{Verteilungsfunktion: } F_X(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & x \in [a, b] \\ 1 & x > b \end{cases}$$

$$\text{Mittelwert: } E[X] = \frac{a+b}{2}$$

$$\text{Varianz: } \text{VAR}[X] = \frac{(b-a)^2}{12}$$

- **Negativ-exponentielle Verteilung** $\text{Exp}(\beta)$:

$$\text{Verteilungsdichtefunktion: } f_X(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{x}{\beta}} \quad \text{mit } x \in \mathbb{R}_0^+, \beta \in \mathbb{R}^+$$

$$\text{Verteilungsfunktion: } F_X(x) = 1 - e^{-\frac{x}{\beta}}$$

$$\text{Mittelwert: } E[X] = \beta$$

$$\text{Varianz: } \text{VAR}[X] = \beta^2$$

- **Gamma-Verteilung** $\text{Gamma}(\alpha, \beta)$:

$$\text{Verteilungsdichtefunktion: } f_X(x) = \frac{\beta^{-\alpha} x^{\alpha-1} e^{-x/\beta}}{\Gamma(\alpha)} \quad \text{mit } x \in \mathbb{R}^+$$

$$\text{und } \Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} x^{\alpha-1} e^{-x} dx$$

$$\text{Mittelwert: } E[X] = \alpha\beta$$

$$\text{Varianz: } \text{VAR}[X] = \alpha\beta^2$$

- **Normalverteilung** $N(\mu, \sigma^2)$:

$$\text{Verteilungsdichtefunktion: } f_X(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad \text{mit } x, \mu \in \mathbb{R}, \sigma \in \mathbb{R}^+$$

$$\text{Mittelwert: } E[X] = \mu$$

$$\text{Varianz: } \text{VAR}[X] = \sigma^2$$

Bemerkung: Da die Normalverteilung für alle Parameterkombinationen μ und σ auch negative Zufallszahlen liefert, kann sie nicht direkt für die Modellierung von Zeitspannen in Rechner- oder Kommunikationssystemen verwendet werden.

• **Weibull-Verteilung** Weibull(α, β):

Verteilungsdichtefunktion: $f_X(x) = \alpha\beta^{-\alpha}x^{\alpha-1}e^{-(x/\beta)^\alpha}$ mit $x \in \mathbb{R}_0^+$ und $\alpha, \beta \in \mathbb{R}^+$

Verteilungsfunktion: $F_X(x) = 1 - e^{-(x/\beta)^\alpha}$

Mittelwert: $E[X] = \frac{\beta}{\alpha} \Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right)$

Varianz: $\text{VAR}[X] = \frac{\beta^2}{\alpha} \left\{ 2\Gamma\left(\frac{2}{\alpha}\right) - \frac{1}{\alpha} \left[\Gamma\left(\frac{1}{\alpha}\right) \right]^2 \right\}$

• **Pareto-Verteilung** Pareto(α, x_0):

Verteilungsdichtefunktion: $f_X(x) = \frac{\alpha}{x_0} \left(\frac{x_0}{x}\right)^\alpha$ mit $x \in]x_0, \infty[$ und $\alpha > 1$

Verteilungsfunktion: $F_X(x) = 1 - \left(\frac{x_0}{x}\right)^\alpha$

Mittelwert: $E[X] = \frac{\alpha}{\alpha - 1} x_0$

Varianz: $\text{VAR}[X] = \left[\frac{\alpha}{\alpha - 2} - \frac{\alpha^2}{(\alpha - 1)^2} \right] x_0^2$

• **Geometrische Verteilung** Geo(p):

Verteilung: $p_X(x) = p(1 - p)^x$ mit $x \in \mathbb{N}_0, p \in]0, 1[$

Mittelwert: $E[X] = \frac{1 - p}{p}$

Varianz: $\text{VAR}[X] = \frac{1 - p}{p^2}$

• **Negative Binomialverteilung** NegBin(s, p):

Verteilung: $p_X(x) = \binom{s + x - 1}{x} p^s (1 - p)^x$

mit $x \in \mathbb{N}_0, p \in]0, 1[$ und $s \in \mathbb{R}^+$

Mittelwert: $E[X] = \frac{s(1-p)}{p}$

Varianz: $\text{VAR}[X] = \frac{s(1-p)}{p^2}$

Bemerkung: Für reelle Werte von s berechnet sich der Binomialkoeffizient nach Gleichung A.4.

3.1.2 Operationen auf Zufallsvariablen

3.1.2.1 Summen unabhängiger Zufallsvariablen

Häufig setzt sich eine Zufallsvariable X aus der Summe zweier statistisch unabhängiger Zufallsvariablen X_1 und X_2 zusammen. Dann erhält man die Verteilungsdichtefunktion bzw. Verteilung der Zufallsvariablen X durch die Faltung der Verteilungsdichtefunktionen bzw. Verteilungen der Zufallsvariablen X_1 und X_2 durch

$$f_X(x) = f_{X_1}(x) * f_{X_2}(x) \quad \text{bzw.} \quad p_X(x) = p_{X_1}(x) * p_{X_2}(x). \quad (3.10)$$

Der Erwartungswert und die Varianz der Zufallsvariablen X ergibt sich aus

$$E[X] = E[X_1] + E[X_2] \quad \text{und} \quad \text{VAR}[X] = \text{VAR}[X_1] + \text{VAR}[X_2]. \quad (3.11)$$

3.1.2.2 Zufällige Auswahl aus mehreren Zufallsvariablen

Soll die Verteilungsdichtefunktion $f_X(x)$ einer Zufallsvariablen X einen speziellen Verlauf annehmen, kann dies dadurch erreicht werden, daß der Zufallsvariablen X mit der Wahrscheinlichkeit $p_X(i)$ die Zufallsvariable X_i mit der Verteilungsdichtefunktion $f_{X_i}(x)$ mit $i \in \{1, 2, \dots, k\}$ und $k \in \mathbb{N}$ zugewiesen wird. Dann ergibt sich die Verteilungsdichtefunktion $f_X(x)$ aus der mit der diskreten Verteilung $p_X(i)$ gewichteten Summe der Verteilungsdichtefunktionen $f_{X_i}(x)$, d. h. es gilt

$$f_X(x) = \sum_{i=1}^k p_X(i) f_{X_i}(x) \quad \text{mit} \quad \sum_{i=1}^k p_X(i) = 1. \quad (3.12)$$

Der Mittelwert $E[X]$ und die Varianz $\text{VAR}[X]$ der Zufallsvariablen X berechnen sich aus den Mittelwerten $E[X_i]$ und Varianzen $\text{VAR}[X_i]$ nach

$$E[X] = \sum_{i=1}^k p_X(i) E[X_i] \quad \text{und} \quad (3.13)$$

$$\text{VAR}[X] = \sum_{i=1}^k \left[p_X(i) (\text{VAR}[X_i] + E[X_i]^2) \right] - \left[\sum_{i=1}^k p_X(i) E[X_i] \right]^2. \quad (3.14)$$

3.1.2.3 Funktion einer Zufallsvariablen (Merkmaltransformation)

Durch die Anwendung einer reellen Funktion G auf eine kontinuierliche Zufallsvariable X mit Wertevorrat \mathcal{W}_X kann diese durch

$$Y = G(X) \tag{3.15}$$

auf die Zufallsvariable Y mit dem Wertevorrat \mathcal{W}_Y abgebildet werden (Merkmaltransformation) [225, 265]. Für die im weiteren Verlauf der Arbeit benötigten Transformationen ist es ausreichend, Funktionen G zu betrachten, die auf dem Wertevorrat \mathcal{W} streng monoton steigend sind. In diesem Fall ist für alle $x \in \mathcal{W}$ die Ableitung $G'(X) > 0$, und es existiert eine eindeutige Umkehrfunktion $G^{-1}(Y)$. Die Wahrscheinlichkeit, daß die Zufallsvariable X im Bereich $x \leq X \leq x + dx$ liegt, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, daß die Zufallsvariable Y im Bereich $y \leq Y \leq y + dy$ liegt. Deshalb gilt für die Verteilungsdichtefunktionen $f_X(x)$ und $f_Y(y)$ der Zusammenhang

$$f_Y(y) = \frac{f_X(x)}{dy/dx} . \tag{3.16}$$

Für die Verteilungsfunktionen $F_X(x)$ und $F_Y(y)$ gilt die Beziehung

$$F_Y(y) = P\{Y \leq y\} = P\{G(X) \leq y\} = P\{X \leq G^{-1}(y)\} = F_X(G^{-1}(y)) . \tag{3.17}$$

Den Mittelwert $E[Y]$ und die Varianz $\text{VAR}[Y]$ der Zufallsvariablen Y erhält man mit Hilfe der Verteilungsdichtefunktion $f_X(x)$ der Zufallsvariablen X und der Funktion G aus

$$E[Y] = \int_{x \in \mathcal{W}_X} G(x) f_X(x) dx \quad \text{und} \quad \text{VAR}[Y] = \int_{x \in \mathcal{W}_X} G^2(x) f_X(x) dx - E[Y]^2 . \tag{3.18}$$

Für die Modellierung der VBR MPEG-codierten Videodatenströme in Kapitel 4 wird die lineare und exponentielle Merkmaltransformation einer Zufallsvariablen X benötigt. Eine Zusammenstellung der Verteilungsdichtefunktionen, der Verteilungsfunktionen sowie der Mittelwerte und Varianzen der transformierten Zufallsvariablen Y geben die Tabellen 3.1 und 3.2.

Lineare Merkmaltransformation $Y = aX + b$	
Verteilungsdichtefunktion	$f_Y(y) = \frac{1}{a} f_X\left(\frac{y-b}{a}\right)$
Verteilungsfunktion	$F_Y(y) = F_X\left(\frac{y-b}{a}\right)$
Mittelwert	$E[Y] = aE[X] + b$
Varianz	$\text{VAR}[Y] = a^2 \cdot \text{VAR}[X]$

Tabelle 3.1: Lineare Merkmaltransformation

Exponentielle Merkmaltransformation $Y = e^X$	
Verteilungsdichtefunktion	$f_Y(y) = \frac{1}{y} f_X(\ln(y))$
Verteilungsfunktion	$F_Y(y) = F_X(\ln(y))$
Mittelwert	$E[Y] = \int_{x \in \mathcal{W}_X} e^x f_X(x) dx$
Varianz	$\text{VAR}[Y] = \int_{x \in \mathcal{W}_X} e^{2x} f_X(x) dx - E[Y]^2$

Tabelle 3.2: Exponentielle Merkmaltransformation

Ist die Zufallsvariable X $N(\mu, \sigma^2)$ -verteilt, dann ist die linear transformierte Zufallsvariable $Y = aX + b$ ebenfalls normalverteilt mit Erwartungswert $a\mu + b$ und Varianz $a^2\sigma^2$. Durch die gewichtete Addition zweier unabhängiger $N(\mu_1, \sigma_1^2)$ - und $N(\mu_2, \sigma_2^2)$ -verteilter Zufallsvariablen X_1 und X_2 erhält man mit $Y = a_1X_1 + a_2X_2$ eine Zufallsvariable Y , die $N(a_1\mu_1 + a_2\mu_2, a_1^2\sigma_1^2 + a_2^2\sigma_2^2)$ -verteilt ist.

Aus einer $N(\mu, \sigma^2)$ -verteilten Zufallsvariablen X erhält man durch eine exponentielle Merkmaltransformation eine logarithmisch normalverteilte Zufallsvariable $Y = e^X$ (lognormalverteilt, $\text{LN}(\mu, \sigma^2)$). Die Eigenschaften der logarithmischen Normalverteilung und der Zusammenhang der Momente mit denen der unterliegenden $N(\mu, \sigma^2)$ -Verteilung sind im folgenden zusammengefaßt:

- **Logarithmische Normalverteilung (Lognormalverteilung) $\text{LN}(\mu, \sigma^2)$:**

Verteilungsdichtefunktion: $f_Y(y) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \frac{1}{y} e^{-\frac{(\ln(y)-\mu)^2}{2\sigma^2}}$ mit $y \in \mathbb{R}^+$ und $\sigma > 0$

Mittelwert: $E[Y] = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}$

Varianz: $\text{VAR}[Y] = e^{2\mu + \sigma^2} (e^{\sigma^2} - 1)$

3.2 Stochastische Prozesse

3.2.1 Definition und Verteilungen

Mit Hilfe der Theorie der stochastischen Prozesse können technische Systeme beschrieben werden, deren Verhalten Zufallsprozesse bestimmen. Diese können sowohl das zeitliche Verhalten des Systems als auch den Systemzustand zu einem bestimmten Zeitpunkt beeinflussen. Im weiteren wird mit der Variablen t die Zeit bezeichnet, und die Menge \mathcal{T} umfaßt die gesamte Zeitachse.

Jedem Ergebnis ξ eines Zufallsexperiments wird durch die Abbildung $X: \mathcal{T} \times \mathcal{S} \rightarrow \mathbb{R}$ eine reelle Funktion $X(t, \xi)$ zugeordnet mit $t \in \mathcal{T}$ und $\xi \in \mathcal{S}$, der Menge aller Elementarereignisse des Zufallsexperiments. Als stochastischen Prozeß bezeichnet man die Menge (Familie) der reellen Funktionen $X(t, \xi)$, die allen Elementarereignissen ξ zugeordnet werden, d. h. ein stochastischer Prozeß ist eine Funktion von zwei Variablen t und ξ [33, 41, 68, 155, 225, 289]. Für ein spezielles Elementarereignis ξ_i ist die Funktion $X(t, \xi_i)$ eine einzelne Zeitfunktion. Für einen bestimmten Zeitpunkt t_i erhält man die Zufallsvariable $X(t_i, \xi)$ (vergleiche Abschnitt 3.1.1).

Ist die Menge \mathcal{T} abzählbar oder abzählbar unendlich, dann ist $X(t, \xi)$ ein stochastischer Prozeß mit diskreter Zeit; enthält \mathcal{T} unendlich viele Werte, wird $X(t, \xi)$ als stochastischer Prozeß mit kontinuierlicher Zeit bezeichnet. Hat der stochastische Prozeß einen unendlichen Wertebereich \mathcal{W} , so spricht man von einem kontinuierlichen stochastischen Prozeß; ist der Wertebereich \mathcal{W} endlich oder abzählbar unendlich, erhält man einen diskreten stochastischen Prozeß. Vereinfachend wird ein stochastischer Prozeß im folgenden auch mit $X(t)$ bezeichnet und auf den expliziten Hinweis auf dessen Abhängigkeit von ξ verzichtet. Für stochastische Prozesse mit kontinuierlicher Zeit soll gelten $\mathcal{T} = \mathbb{R}_0^+$, für solche mit diskreter Zeit sei $\mathcal{T} = \mathbb{N}$. Ein stochastischer Prozeß mit diskreter Zeit kann auch durch eine unendliche Folge $\{X_k\} = \{X_1, X_2, \dots\}$ von Zufallsvariablen (Zeitreihe, *time series*) beschrieben werden mit $X_k = X(t_k, \xi)$, $t \in \mathbb{N}$, wobei t_k meist äquidistante Zeitpunkte bezeichnet.

Charakteristisch für einen stochastischen Prozeß $X(t, \xi)$ ist die Art und Weise, in der die Zufallsvariablen $X(t_i, \xi)$, $t_i \in \mathcal{T}$ voneinander abhängen. Für die Charakterisierung dieses Zusammenhangs wird die n -dimensionale Verteilungsfunktion (*n-th order distribution*)

$$F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = P\{X(t_1) \leq x_1, \dots, X(t_n) \leq x_n\} \quad (3.19)$$

verwendet. Die Menge der Verteilungsfunktionen $F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n)$, $n \in \mathbb{N}$ wird als die durch den stochastischen Prozeß $X(t, \xi)$ erzeugte Familie der endlich-dimensionalen Verteilungsfunktionen bezeichnet. Durch die partielle Ableitung der endlich-dimensionalen Verteilungsfunktion nach allen x_i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ erhält man die n -dimensionale Verteilungsdichtefunktion (*n-th order density function*)

$$f_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = \frac{\partial^n F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n)}{\partial x_1 \cdot \partial x_2 \cdot \dots \cdot \partial x_n} . \quad (3.20)$$

Ein diskreter stochastischer Prozeß kann wie eine Zufallsvariable auch durch seine n -dimensionale Verteilung

$$p_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = P\{X(t_1) = x_1, \dots, X(t_n) = x_n\} \quad (3.21)$$

charakterisiert werden. Für $n = 1$ erhält man daraus die eindimensionale Verteilung $F_X(x, t)$, die eindimensionale Verteilungsdichtefunktion $f_X(x, t)$ und für diskrete stochastische Prozesse die eindimensionale Verteilung $p_X(x, t)$, jeweils für $x \in \mathcal{W}$ und $t \in \mathcal{T}$.

3.2.2 Momente, Korrelation und Stationarität

Für stochastische Prozesse lassen sich gewöhnliche und zentrale Momente über deren Zufallsvariable definieren. Die wichtigsten sind der Erwartungswert $\overline{X(t)} = E[X(t)]$ und die Varianz $\text{VAR}[X(t)] = E[(X(t) - \overline{X})^2]$, die sich aus dem Erwartungswert und der Varianz der Zufallsvariablen $X(t)$ ergeben, die im allgemeinen von der Zeit t abhängen. Sie berechnen sich nach

$$\overline{X(t)} = E[X(t)] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} x f_X(x, t) dx & X(t) \text{ kontinuierlich} \\ \sum_{x_i \in \mathcal{W}} x_i p_X(x_i, t_i) & X(t) \text{ diskret} \end{cases} \quad \text{und} \quad (3.22)$$

$$\text{VAR}[X(t)] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} (x - \overline{X(t)})^2 f_X(x, t) dx & X(t) \text{ kontinuierlich} \\ \sum_{x_i \in \mathcal{W}} (x_i - \overline{X(t)})^2 p_X(x_i, t_i) & X(t) \text{ diskret} \end{cases} \quad (3.23)$$

Ein gutes Maß für die Zeitabhängigkeit eines stochastischen Prozesses mit endlichen zweiten Momenten liefert die Autokorrelation $R_{XX}(t_1, t_2)$

$$R_{XX}(t_1, t_2) = E[X(t_1)X(t_2)] = \begin{cases} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_1 x_2 f_{X_1, X_2}(x_1, x_2, t_1, t_2) dx_1 dx_2 & X(t) \text{ kont.} \\ \sum_{x_1 \in \mathcal{W}} \sum_{x_2 \in \mathcal{W}} x_1 x_2 p_{X_1, X_2}(x_1, x_2, t_1, t_2) & X(t) \text{ diskret} \end{cases} \quad (3.24)$$

Die Autokovarianz $C_{XX}(t_1, t_2)$ von $X(t)$ ist definiert als die Kovarianz der Zufallsvariablen $X(t_1)$ und $X(t_2)$, also

$$C_{XX}(t_1, t_2) = E[(X(t_1) - \overline{X(t_1)}) (X(t_2) - \overline{X(t_2)})] = R_{XX}(t_1, t_2) - \overline{X(t_1)} \cdot \overline{X(t_2)}. \quad (3.25)$$

Da $\text{VAR}[X(t)] = C_{XX}(t, t)$ ist, wird oft die Autokovarianz auf die Standardabweichungen der Zufallsvariablen $X(t_1)$ und $X(t_2)$ normiert, und man erhält den Autokorrelationskoeffizienten (Autokorrelationsfunktion) $r_{XX}(t_1, t_2) \in [-1, 1]$ durch

$$r_{XX}(t_1, t_2) = \frac{C_{XX}(t_1, t_2)}{\sqrt{\text{VAR}[X(t_1)]} \cdot \sqrt{\text{VAR}[X(t_2)]}}. \quad (3.26)$$

Für die Modellierung von zufallsabhängigen Vorgängen in technischen Systemen sind stationäre stochastische Prozesse von besonderem Interesse. Das Verhalten von stationären Prozessen, beschrieben durch deren endlich-dimensionale Verteilungsfunktionen, ist invariant gegenüber Zeitverschiebungen, es liegt also eine zeitliche Stationarität vor. Dabei wird

hauptsächlich zwischen strenger und schwacher Stationarität unterschieden. Ein stochastischer Prozeß ist streng stationär (*stationary in the strict sense*), wenn für alle $\tau \in \mathcal{T}$ seine n -dimensionale Verteilungsfunktion invariant gegenüber Zeitverschiebungen ist. Es muß dann gelten

$$F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1, \dots, t_n) = F_{X_1 \dots X_n}(x_1, \dots, x_n, t_1 + \tau, \dots, t_n + \tau) \quad (3.27)$$

für alle $n \in \mathbb{N}$ und für alle $\tau, t_1, t_2, \dots, t_n \in \mathcal{T}$. Gilt Gleichung 3.27 nur für $n \leq k$ mit $k \in \mathbb{N}$, dann ist der Prozeß stationär von k -ter Ordnung. Ist ein stochastischer Prozeß mindestens stationär von zweiter Ordnung, dann ist die eindimensionale Verteilungsdichtefunktion unabhängig von t . Die zweidimensionale Verteilungsdichtefunktion ist nur abhängig von der Differenz τ der Zeitpunkte der Zufallsvariablen $X(t)$ und $X(t + \tau)$, und man kann vereinfachend schreiben

$$f_X(x, t) = f_X(x) \quad \text{und} \quad (3.28)$$

$$f_{X_1 X_2}(x_1, x_2, t, t + \tau) = f_X(x_1, x_2, \tau) \quad \text{oder} \quad (3.29)$$

$$p_{X_1 X_2}(x_1, x_2, t, t + \tau) = p_X(x_1, x_2, \tau). \quad (3.30)$$

Da die Bedingung in Gleichung 3.27 sehr einschränkend und schwierig zu überprüfen ist, wird oft nur schwache Stationarität gefordert. Ein stochastischer Prozeß wird als schwach stationär (kovarianzstationär, *weakly stationary, wide sense stationary*) bezeichnet, wenn der Erwartungswert von $X(t)$ zeitinvariant ist und die Autokorrelation nur von der Differenz τ der Zeitpunkte der Zufallsvariablen $X(t)$ und $X(t + \tau)$ abhängt. Formal muß gelten

$$E[X(t)] = \mu = \text{konstant} \quad \text{und} \quad R_{XX}(\tau) = R_{XX}(t, t + \tau) = E[X(t)X(t + \tau)]. \quad (3.31)$$

Aus den Bedingungen der Gleichung 3.31 folgt, daß die Varianz konstant ist und die Autokovarianz und der Autokorrelationskoeffizient nur von der Differenz τ abhängen. Man erhält

$$C_{XX}(\tau) = E[(X(t) - \mu)(X(t + \tau) - \mu)] = R_{XX}(\tau) - \mu^2, \quad (3.32)$$

$$\text{VAR}[X(t)] = C_{XX}(0) = R_{XX}(0) - \mu^2 = \sigma^2 \quad \text{und} \quad (3.33)$$

$$r_{XX}(\tau) = r_{XX}(t, t + \tau) = \frac{C_{XX}(\tau)}{\sigma^2}. \quad (3.34)$$

Für einen stochastischen Prozeß mit diskreter äquidistanter Zeit $\{X_i\}$, $i \in \mathbb{N}$ sind auch die Korrelationsgrößen nur für $\tau \in \mathbb{N}_0$ definiert. Die Zeitspanne τ entspricht dann dem Abstand der Zufallsvariablen, d. h. es gilt

$$R_{XX}(\tau) = E[X(t_i)X(t_{i+\tau})], \quad (3.35)$$

$$C_{XX}(\tau) = E[(X(t_i) - \mu)(X(t_{i+\tau}) - \mu)] = R_{XX}(\tau) - \mu^2 \quad \text{und} \quad (3.36)$$

$$r_{XX}(\tau) = r_{XX}(t_i, t_{i+\tau}) = \frac{C_{XX}(\tau)}{\sigma^2}. \quad (3.37)$$

3.2.3 Transformation eines stochastischen Prozesses

Durch die Anwendung eines Transformationsoperators \mathbf{T} auf einen stochastischen Prozeß $X(t)$ erhält man einen Prozeß $Y(t)$ mit

$$Y(t) = \mathbf{T}[X(t)] . \quad (3.38)$$

Der Prozeß $Y(t)$ kann als das Ausgangssignal eines Systems aufgefaßt werden, das durch die Transformation \mathbf{T} beschrieben wird und als Eingangssignal $X(t)$ besitzt [225]. Im Rahmen dieser Arbeit werden nur deterministische zeitinvariante Systeme ohne Gedächtnis betrachtet. Eine Transformation heißt deterministisch, wenn gilt

$$X(t, \xi_1) = X(t, \xi_2) \Rightarrow Y(t, \xi_1) = Y(t, \xi_2) , \quad (3.39)$$

d. h. identische Eingangszeitfunktionen erzeugen identische Ausgangszeitfunktionen. Läßt sich die Transformation \mathbf{T} durch eine zeitunabhängige Funktion G beschreiben, dann gilt

$$Y(t) = G[X(t)] \Rightarrow Y(t + \tau) = G[X(t + \tau)] , \quad (3.40)$$

und das System wird als zeitinvariant bezeichnet. Das heißt, die Zufallsvariable $Y(t_0, \xi)$ ist eine Funktion der Zufallsvariablen $X(t_0, \xi)$ mit $Y(t_0, \xi) = G[X(t_0, \xi)]$, und die Verteilungsdichtefunktion $f_Y(y, t)$ oder die Verteilungsfunktion $F_Y(y, t)$ erhält man aus $f_X(x, t)$ oder $F_X(x, t)$, wie in Unterabschnitt 3.1.2.3 für reelle Funktionen einer Zufallsvariablen beschrieben. Dieses Konzept läßt sich auch auf mehrere Zufallsvariablen und deren gemeinsame Verteilungsdichtefunktionen anwenden [225], und man erhält z. B. für die Autokorrelation $R_{YY}(t_1, t_2)$ des Prozesses $Y(t)$

$$R_{YY}(t_1, t_2) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} G(x_1)G(x_2)f_{X_1, X_2}(x_1, x_2, t_1, t_2)dx_1dx_2 . \quad (3.41)$$

3.2.4 Schätzung statistischer Parameter

Für die Modellierung der Zufallsprozesse eines technischen Systems ist neben der Auswahl eines geeigneten stochastischen Prozesses die Bestimmung von dessen Parametern von zentraler Bedeutung. Ist der Prozeß ergodisch (siehe z. B. [225]), dann können die Verteilungsfunktion, die Momente und die Korrelationseigenschaften eines Prozesses aus der Menge der Beobachtungen $\{x_k\} = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ einer Musterfunktion $X(t_k, \xi_0)$ zu den äquidistanten Zeitpunkten $t_k, k = 1, 2, \dots, n$ geschätzt werden.

Sortiert man die Beobachtungen x_i in aufsteigender Reihenfolge, so erhält man die Menge der geordneten Beobachtungen (*set of i^{th} order statistics*) $\{x_{(i)}\} = \{x_{(1)}, x_{(2)}, \dots, x_{(n)}\}$, für die gilt $x_{(i)} \leq x_{(i+1)}$ für alle $i = 1, 2, \dots, n-1$. Für große n definiert man die Wahrscheinlichkeiten q_i zu

$$q_i = \frac{i - 0,5}{n} \quad \text{für} \quad i = 1, 2, \dots, n . \quad (3.42)$$

Die Wahrscheinlichkeiten q_i haben durch den Korrekturterm 0,5 einen Wertebereich von $0 < q_i < 1$. Als Summenlinie $\hat{F}(x)$ der Verteilung erhält man die Treppenfunktion

$$\hat{F}(x) = q_i \quad \text{für} \quad x_{(i)} \leq x < x_{(i+1)}. \quad (3.43)$$

Als empirische Verteilungsfunktion $\hat{F}_n(x)$ bezeichnet man

$$\hat{F}_n(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{(1)} \\ \frac{i-1}{n-1} + \frac{x-x_{(i)}}{(n-1)(x_{(i+1)}-x_{(i)})} & x_{(i)} \leq x < x_{(i+1)}, \quad i \in \{1, 2, \dots, n-1\} \\ 1 & x_{(n)} \leq x \end{cases} \quad (3.44)$$

Quantile-quantile (QQ) und *probability-probability* (PP) *plots* sind zwei heuristische graphische Möglichkeiten für die Überprüfung, ob eine empirische Verteilungsfunktion $\hat{F}_n(x_{(i)})$ durch eine kontinuierliche theoretische Verteilungsfunktion $F(x)$ hinreichend genau charakterisiert werden kann. Beim QQ-Plot werden die q_i -Quantile $x_{q_i} = F^{-1}(q_i)$ der theoretischen Verteilungsfunktion über den empirischen q_i -Quantilen $x_{(i)}$ für $i = 1, 2, \dots, n$ aufgetragen. Bei optimaler Anpassung ergibt sich für großes n die erste Winkelhalbierende. Der QQ-Plot ist insbesondere dazu geeignet, die Anpassung der Randwerte der theoretischen Verteilungsfunktion zu beurteilen. Beim PP-Plot werden die theoretischen Wahrscheinlichkeiten $F(x_{(i)})$ über den empirischen Wahrscheinlichkeiten q_i für $i = 1, 2, \dots, n$ aufgetragen. Auch hier ergibt sich für große n und optimale Anpassung die erste Winkelhalbierende. Der PP-Plot ist ein gutes Maß für die Anpassung der Mittellage der theoretischen Verteilungsfunktion. Weitere heuristische Verfahren erhält man durch Vergleiche der Graphen der Verteilungsdichtefunktionen und durch sogenannte *box-plots*, einer graphischen Veranschaulichung der Kenngrößen der Verteilungen. Daneben gibt es noch statistische Hypothesentests, darunter den Chi-Quadrat-Anpassungstest, den Kolmogoroff-Smirnoff-Test und den Anderson-Darling-Test [167], die eine Aussage über die Güte der Approximation der empirischen Verteilungsfunktion durch die gewählte theoretische Verteilungsfunktion ermöglichen.

Oft ist es nicht möglich, alle Beobachtungen einzeln zu erfassen, und der Wertebereich W der Beobachtungen wird in Intervalle (Klassen) der Länge Δx unterteilt. Ein Intervall $](i-1)\Delta x, i\Delta x]$ mit $i \in \{\dots, -1, 0, 1, \dots\}$ enthält $n_i = k - j$ Beobachtungen, wenn gilt $x_{(j)} \leq (i-1)\Delta x$, $x_{(j+1)} > (i-1)\Delta x$, $x_{(k)} \leq i\Delta x$ und $x_{(k+1)} > i\Delta x$. Für die einzelnen Intervalle erhält man die relative Häufigkeit h_i und die mittlere relative Häufigkeitsdichte f_i aus

$$h_i = \frac{n_i}{n} \quad \text{und} \quad f_i = \frac{h_i}{\Delta x}. \quad (3.45)$$

Unter der Annahme, daß die Beobachtungen innerhalb eines Intervalls gleichverteilt sind, erhält man aus den relativen Häufigkeiten für die empirische Verteilungsfunktion $\tilde{F}(x)$ einen Polygonzug mit

$$\tilde{F}(x) = \sum_{k=-\infty}^{i-1} h_k + \frac{x - (i-1)\Delta x}{\Delta x} h_i \quad \text{für} \quad (i-1)\Delta x < x \leq i\Delta x. \quad (3.46)$$

Für die empirische Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}(x)$ erhält man aus den Häufigkeitsdichten f_i eine Treppenfunktion mit

$$\tilde{f}(x) = f_i \quad \text{für} \quad (i-1)\Delta x < x \leq i\Delta x. \quad (3.47)$$

Stammen die Beobachtungen von einem mindestens schwach stationären stochastischen Prozeß, dann können die Erwartungswerte und die Varianz dieses Prozesses durch die folgenden Schätzwerte bestimmt werden [40, 167]. Einen erwartungstreuen Schätzwert (*unbiased estimator*) für den Erwartungswert μ erhält man durch

$$\hat{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i. \quad (3.48)$$

Ist der stochastische Prozeß unkorreliert mit $r(\tau) = 0$ für alle $\tau > 0$, dann ist

$$\hat{\sigma}_{\text{id}}^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x})^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n x_i^2 - \frac{n}{n-1} \hat{x}^2 \quad (3.49)$$

ein erwartungstreuer Schätzwert für die Varianz σ^2 . Sind die Beobachtungen korreliert, so muß dies bei der Schätzung der Varianz durch einen Korrekturterm berücksichtigt werden, der die Schätzwerte der Korrelationskoeffizienten \hat{r}_i (nach Gleichung 3.53 oder 3.56) enthält. Als Schätzwert für σ^2 erhält man in diesem Fall

$$\hat{\sigma}^2 = \hat{\sigma}_{\text{id}}^2 \left[1 - \frac{2}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left(1 - \frac{i}{n} \right) \hat{r}_i \right]^{-1}. \quad (3.50)$$

Einen einfachen Schätzwert für die Autokorrelation $R(\tau)$ für eine Distanz von k Beobachtungen erhält man durch

$$\hat{R}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i x_{i+k}. \quad (3.51)$$

Eine einfache Möglichkeit für die Schätzung der Autokovarianz $C(\tau)$ für eine Distanz von k Beobachtungen erhält man durch

$$\hat{C}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \hat{x})(x_{i+k} - \hat{x}). \quad (3.52)$$

Daraus ergibt sich der Schätzwert \hat{r}_k für den Autokorrelationskoeffizienten $r(\tau)$ nach

$$\hat{r}_k = \frac{\hat{C}_k}{\hat{\sigma}_{\text{id}}^2}. \quad (3.53)$$

Beide Schätzwerte sind jedoch nicht erwartungstreu und sollten nur für große n und $k \ll n$ verwendet werden. Einen für $n \rightarrow \infty$ asymptotisch erwartungstreuen Schätzwert für die Autokovarianz $C(\tau)$ liefert

$$\hat{C}_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \hat{x}'_k)(x_{i+k} - \hat{x}''_k) = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i x_{i+k} - \hat{x}'_k \hat{x}''_k, \quad (3.54)$$

wobei \hat{x}'_k und \hat{x}''_k die erwartungstreuen Schätzwerte für die Mittelwerte der beiden Teilmengen der Beobachtungen sind. Diese berechnen sich zu

$$\hat{x}'_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_i \quad \text{und} \quad \hat{x}''_k = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} x_{i+k}. \quad (3.55)$$

Aus dem asymptotisch erwartungstreuen Schätzwert für die Autokovarianz erhält man durch

$$\hat{r}_k = \frac{\hat{C}_k}{\sqrt{\hat{C}'_{0,k} \cdot \hat{C}''_{0,k}}} \quad (3.56)$$

einen asymptotisch erwartungstreuen Schätzwert für den Autokorrelationskoeffizienten $r(\tau)$ zu den Zeitpunkten t_i . Die benötigten Varianzen $C'_{0,k}$ und $C''_{0,k}$ der beiden Teilmengen der Beobachtungen ergeben sich dabei aus

$$\hat{C}'_{0,k} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_i - \hat{x}'_k)^2 \quad \text{und} \quad \hat{C}''_{0,k} = \frac{1}{n-k} \sum_{i=1}^{n-k} (x_{i+k} - \hat{x}''_k)^2. \quad (3.57)$$

3.3 Selbstähnliche (fraktale) Prozesse und Langzeitkorrelation

Nach der allgemeinen Beschreibung eines stochastischen Prozesses und dessen grundlegenden Eigenschaften in Abschnitt 3.2 werden in diesem Abschnitt spezielle selbstähnliche (fraktale, *self-similar*) stochastische Prozesse betrachtet, die die Eigenschaft der Langzeitkorrelation (*long-range dependence*, LRD, *non-cyclic long run statistical dependence*) besitzen. Zuerst werden die Eigenschaften dieser Prozesse beschrieben, dann werden Untersuchungsmethoden vorgestellt, um den Grad der Langzeitkorrelation eines stochastischen Prozesses quantitativ zu ermitteln. Nach einer kurzen Übersicht über stochastische Prozesse mit LRD-Eigenschaft werden schließlich die fraktalen Gauß-Prozesse (*fractional Gaussian noise*, fGn) näher beschrieben, da diese für die Modellierung von VBR MPEG-codierten Videodatenströmen in Kapitel 4 verwendet werden.

3.3.1 Definitionen

Im allgemeinen wird bei der Modellierung eines Zufallsprozesses in einem technischen System durch stochastische Prozesse angenommen, daß zeitlich weit auseinanderliegende Beobachtungen als voneinander unabhängig betrachtet werden können. Bei vielen empirischen Beobachtungen natürlicher Zeitserien wurde jedoch festgestellt, daß diese Annahme nicht gerechtfertigt ist. Die statistische Eigenschaft eines stochastischen Prozesses, daß auch die Autokorrelation $R_{XX}(\tau)$ zeitlich weit auseinanderliegender Zufallsvariablen $X(t)$ und $X(t + \tau)$

nicht zu vernachlässigen ist, wird als Langzeitkorrelation (*long-range dependence*, LRD, *persistence*, *Hurst effect*) bezeichnet. Sie wurde zuerst in Beobachtungen von Niederschlagsmengen oder Wasserständen von Flüssen durch H. E. Hurst [124] beschrieben. Diese Eigenschaft wird durch den Hurst-Parameter H mit $0 \leq H \leq 1$ quantitativ beschrieben. Messungen an Paketvermittlungsnetzen und VBR-Video-codierern haben ergeben, daß auch das Verkehrsaufkommen in Datennetzen und codierte Videobilder ähnliche Korrelationseigenschaften besitzen [65, 66, 85, 175, 176, 231]. Im weiteren wird ein kovarianzstationärer diskreter stochastischer Prozeß $\{X_t\}$ mit Mittelwert μ und Varianz σ^2 sowie dessen aggregierter Prozeß $\{X_t^{(m)}\}$ mit

$$X_t^{(m)} = (X(tm - m + 1) + \dots + X(tm)) / m \quad \text{mit} \quad m \in \mathbb{N} \quad (3.58)$$

betrachtet. Ist der Prozeß $\{X_t\}$ nur kurzzeitkorreliert, dann besitzt er die folgenden äquivalenten charakteristischen Eigenschaften (die Berechnung der *rescaled adjusted range* und des Periodogramms wird in den Unterabschnitten 3.3.2.2 und 3.3.2.3 erläutert):

1. Die Summe der Autokovarianzen $\sum_{i=0}^n C_{XX}(i)$ ist konvergent für $n \rightarrow \infty$.
2. Für die Varianz des aggregierten Prozesses $\{X_t^{(m)}\}$ gilt $\text{VAR}[\{X_t^{(m)}\}] \approx \sigma^2/m$.
3. Die Autokorrelationsfunktion $r_{XX}^{(m)}(k)$ des aggregierten Prozesses hat die Eigenschaft $\lim_{m \rightarrow \infty} r_{XX}^{(m)}(k) = 0$ für alle $k > 0$, d. h. die Korrelation des aggregierten Prozesses $\{X_t^{(m)}\}$ verschwindet mit steigendem m .
4. Für die *rescaled adjusted range* gilt $R(t, s)/S(t, s) \sim s^{0,5}$ für $s > s_0$, d. h. die *rescaled adjusted range* ist proportional zu $s^{0,5}$.
5. Für das Periodogramm $I_{n, \{X_t\}}(\omega_k)$ der Zeitserie $\{X_t\}$ mit $t = 1, 2, \dots, n$ gilt $I_{n, \{X_t\}}(0)$ ist endlich.

Dagegen hat ein stochastischer Prozeß mit Langzeitkorrelation und Hurst-Parameter H mit $0,5 < H < 1$ folgende Eigenschaften [117, 39]:

1. Die Summe der Autokovarianzen $\sum_{i=0}^n C_{XX}(i)$ ist divergent für $n \rightarrow \infty$.
2. Für die Varianz des aggregierten Prozesses $\{X_t^{(m)}\}$ gilt $\text{VAR}[\{X_t^{(m)}\}] \approx m^{-(2-2H)}\sigma^2$ mit $0,5 < H < 1$.
3. Die Autokorrelationsfunktion $r_{XX}^{(m)}(k)$ des aggregierten Prozesses hat die Eigenschaft $\lim_{m \rightarrow \infty} r_{XX}^{(m)}(k) \neq 0$ für alle $k \in \mathbb{N}$, d. h. die Korrelation des aggregierten Prozesses $\{X_t^{(m)}\}$ verschwindet mit steigendem m nicht.
4. Für die *rescaled adjusted range* gilt $R(t, s)/S(t, s) \sim s^H$ mit $0,5 < H < 1$ für $s > s_0$, d. h. abgesehen von einem Transienten für $s < s_0$ ist die *rescaled adjusted range* proportional zu s^H .

5. Das Periodogramm $I_{n,\{X_t\}}(\omega_k)$ der Zeitserie $\{X_t\}$ mit $t = 1, 2, \dots, n$ hat die Eigenschaft $I_{n,\{X_t\}}(\omega_k) \rightarrow \infty$ für $\omega_k \rightarrow 0$, d. h. die spektrale Dichtefunktion wächst über alle Grenzen, wenn die Frequenz gegen Null geht.

Die Definition eines selbstähnlichen (fraktalen) Prozesses erhält man über die Eigenschaft 3 für stochastische Prozesse mit Langzeitkorrelation [39, 90, 179]. Ein kovarianzstationärer diskreter stochastischer Prozeß mit Autokorrelationsfunktion

$$r_{XX}(\tau) = \frac{1}{2} [(\tau + 1)^{2H} - 2\tau^{2H} + (\tau - 1)^{2H}] \quad (3.59)$$

heißt (exakt) selbstähnlich zweiter Ordnung (*exactly second order self-similar*) mit Hurst-Parameter H , da dann und nur dann für die Autokorrelationsfunktion des diskreten aggregierten Prozesses $\{X_t^{(m)}\}$ für alle $m, \tau \in \mathbb{N}$ gilt

$$r_{XX}^{(m)}(\tau) = r_{XX}(\tau). \quad (3.60)$$

Das bedeutet, daß ein fraktaler stochastischer Prozeß beliebig aggregiert werden kann, ohne seine Korrelationsstruktur zu verändern, und damit über beliebig viele Zeitebenen (μ s, ms, s, ...) stets ein identisches stochastisches Verhalten zeigt. Ein kovarianzstationärer diskreter stochastischer Prozeß heißt asymptotisch selbstähnlich zweiter Ordnung (*asymptotic second order self similar*), wenn für alle $\tau \in \mathbb{N}$ gilt

$$\lim_{m \rightarrow \infty} r_{XX}^{(m)}(\tau) \rightarrow r_{XX}(\tau). \quad (3.61)$$

3.3.2 Untersuchungsmethoden

Dieser Abschnitt enthält drei graphische Methoden für die Untersuchung der Eigenschaften einer Stichprobe eines Zufallsprozesses. Sie sind dazu geeignet, herauszufinden, ob und wie stark die Stichprobe langzeitkorreliert ist. Dazu ist es notwendig, die strukturellen Fluktuationen in den Beobachtungen der Stichprobe zu erfassen und die unbedeutenden Schwankungen zu eliminieren. Die Methoden ergeben sich aus den in Abschnitt 3.3.1 gegebenen Eigenschaften. In [85] wird auch eine analytische Methode für die Schätzung des Hurst-Parameters H für näherungsweise normalverteilte stochastische Prozesse beschrieben, die auf das Periodogramm aufbaut, auf die aber nicht näher eingegangen wird.

3.3.2.1 Varianz-Zeit-Graph

Der Varianz-Zeit-Graph (*variance-time plot*) ist eine graphische Veranschaulichung der Eigenschaft 2 aus Abschnitt 3.3.1 für eine Stichprobe $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ eines diskreten stochastischen Prozesses oder einer Meßreihe. Aus dieser Stichprobe werden für $m = 1, 2, \dots, n$ durch Berechnung der Durchschnittswerte

$$x_i^{(m)} = (X(im - m + 1) + \dots + X(im)) / m \quad (3.62)$$

Mittelwertstichproben $\{x_i^{(m)}\}$, $i = 1, 2, \dots, \lfloor n/m \rfloor$ gebildet. Nach Eigenschaft 2 gilt für die empirischen Varianzen $\hat{\sigma}_{\{x_i^{(m)}\}}^2$ der Mittelwertstichproben bei hinreichend großem m

$$\hat{\sigma}_{\{x_i^{(m)}\}}^2 \approx m^{2H-2} \hat{\sigma}_{\{x_i\}}^2 \quad \text{mit} \quad 0,5 \leq H < 1. \quad (3.63)$$

Durch Anwendung des Logarithmus erhält man daraus den Zusammenhang

$$\log \frac{\hat{\sigma}_{\{x_i^{(m)}\}}^2}{\hat{\sigma}_{\{x_i\}}^2} \approx (2H - 2) \cdot \log m. \quad (3.64)$$

Wird nun die Differenz der Logarithmen der Varianzen über $\log m$ aufgetragen, so erhält man eine Kurve, deren Steigung ein direktes Maß für den Hurst-Parameter H ist. Dieser kann aus der Steigung einer Regressionsgeraden für $m_u \leq m \leq m_o$ ermittelt werden. Dabei werden für die Bestimmung der Regressionsgeraden neben kleinen Werten für m auch sehr große Werte für m nicht verwendet, da für große m die Stichprobe $\{x_i^{(m)}\}$ nur sehr wenige Beobachtungen enthält und deshalb die empirische Varianz ungenügend ist.

Der Varianz-Zeit-Graph wird für die Untersuchung eines empirischen MPEG-codierten Videodatenstroms in Abschnitt 4.2.3 eingesetzt und zur Bestimmung des Hurst-Parameters verwendet.

3.3.2.2 R/S-Analyse

In [191, 194] wird die *rescaled range* $R_X(t, s)/\sigma$ beschrieben und deren Verwendung zur Untersuchung der LRD-Eigenschaften einer Zeitserie $\{X_t\}$ mit Erwartungswert μ und Standardabweichung σ durch die *R/S-Analyse* diskutiert. Diese kann dazu verwendet werden, den Hurst-Parameter H eines stochastischen Prozesses zu berechnen. Daraus abgeleitet ist die *rescaled adjusted range*, die die Schätzung des Hurst-Parameters einer Stichprobe oder empirischen Meßreihe $\{x_i\}$ mit unbekanntem Mittelwert und Standardabweichung ermöglicht [87, 116, 198, 229].

Den Summenprozeß $\{X_t^*\}$ einer Zeitserie $\{X_t\}$ erhält man durch die Addition der aufeinanderfolgenden Zufallsvariablen, d. h. es ist

$$X_t^* = \sum_{i=1}^t X_i. \quad (3.65)$$

Durch die Differenz zweier Summenprozesse $X_{t_j}^* - X_{t_i}^*$, $t_j > t_i$ erhält man die Summe der Zufallsvariablen X_{t_i+1} bis X_{t_j} . Nun werden für Intervalle der Länge s mit $s \geq 2$ die Abweichungen der Summe der Zufallsvariablen im Intervall bezüglich des Mittelwerts der Zeitserie betrachtet. Dazu wird die *population cumulative range* $R_X(t, s)$ mit

$$R_X(t, s) = \max_{0 \leq u \leq s} [X_{t+u}^* - X_t^* - u\mu] - \min_{0 \leq u \leq s} [X_{t+u}^* - X_t^* - u\mu] \quad (3.66)$$

verwendet. Um mehrere Prozesse vergleichen zu können, wird die *population cumulative range* auf die Standardabweichung σ normiert, und man erhält die *rescaled range* $R_X(t, s)/\sigma$.

Soll eine Stichprobe $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ mit unbekanntem Mittelwert und unbekannter Standardabweichung untersucht werden, kann das Konzept der *rescaled range* verwendet werden. Der Mittelwert wird durch den empirischen Mittelwert des betrachteten Intervalls ersetzt. Damit erhält man unter Verwendung der empirischen Summen

$$x^*(t) = \sum_{i=1}^t x_i \quad \text{mit} \quad 1 \leq t \leq n \quad (3.67)$$

die *sample sequential range* $R(t, s)$ der Stichprobe $\{x_i\}$ für das Intervall der Länge s mit $s \geq 2$ zu

$$R(t, s) = \max_{0 \leq u \leq s} \left[x^*(t+u) - x^*(t) - \frac{u}{s} (x^*(t+s) - x^*(t)) \right] - \min_{0 \leq u \leq s} \left[x^*(t+u) - x^*(t) - \frac{u}{s} (x^*(t+s) - x^*(t)) \right]. \quad (3.68)$$

Die Varianz σ^2 des stochastischen Prozesses wird durch die sequentielle Varianz $S^2(t, s)$ der Beobachtungen innerhalb des betrachteten Intervalls ersetzt, d. h.

$$S^2(t, s) = \frac{1}{s} \sum_{u=1}^s \left[x(t+u) - \frac{1}{s} [x^*(t+s) - x^*(t)] \right]^2. \quad (3.69)$$

Damit erhält man schließlich die *rescaled adjusted range* $R(t, s)/S(t, s)$. Hurst hat empirisch nachgewiesen, daß für viele natürliche Zeitserien der Erwartungswert von $R(t, s)/S(t, s)$ für große s einem Potenzgesetz genügt [124], d. h.

$$E[R(t, s)/S(t, s)] \approx s^H \quad \text{für} \quad s \rightarrow \infty \quad \text{für} \quad 0,5 < H < 1. \quad (3.70)$$

Die Abhängigkeit der Erwartungswerte der *rescaled adjusted range* $E[R(t, s)/S(t, s)]$ und der *rescaled range* $E[R_X(t, s)/\sigma]$ von der Intervalllänge s ist ein Maß für die Intensität der Langzeitkorrelation des stochastischen Prozesses oder der Stichprobe [195]. Ein Prozeß heißt R/S -unabhängig (erfüllt das Gesetz $R/S \sim s^{0,5}$ im Mittel), wenn

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s^{-0,5} E[R_X(t, s)/\sigma] = C \quad \text{mit} \quad C \in \mathbb{R} \quad (3.71)$$

gilt. Ein Prozeß heißt R/S -abhängig (erfüllt das Gesetz $R/S \sim s^H$ mit $0,5 < H < 1$ im Mittel), wenn gilt

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s^{-H} E[R_X(t, s)/\sigma] = C \quad \text{mit} \quad C \in \mathbb{R} \quad \text{und} \quad 0,5 < H < 1. \quad (3.72)$$

Für Stichproben mit n Beobachtungen kann ein Grenzwert geschätzt werden, falls sich die Terme der Gleichungen 3.71 oder 3.72 für $s < n$ stabilisieren. Die R/S -Abhängigkeit oder R/S -Unabhängigkeit beschränkt sich dann auf den zeitlichen Umfang der Stichprobe.

Hurst und Feller [70, 124] haben unabhängig voneinander gezeigt, daß für normalverteilte unkorrelierte Zufallsprozesse und für große s

$$E[R(t, s)/S(t, s)] = \sqrt{(s\pi/2)} \quad (3.73)$$

gilt, und daß diese damit R/S -unabhängig sind. Auch kurzzeitkorrelierte Prozesse, wie z. B. Markoff-Prozesse, sind R/S -unabhängig. Die R/S -Abhängigkeit und deren Intensität ist unabhängig von der Addition periodischer Signale, solange der Umfang der Stichprobe wesentlich größer ist als die Periodendauer der Signale. Durch eine stark nichtlineare Transformation T bleibt zwar die R/S -Abhängigkeit erhalten, die Intensität kann sich jedoch verändern.

Eine praktische Anwendung der R/S -Analyse für die Bestimmung des Hurst-Parameters H für empirische Meßreihen mit n Elementen wurde in [191, 282] vorgeschlagen. Die Meßreihe wird in eine Anzahl von Teilsequenzen unterteilt. Dann wird für jede Teilsequenz die *rescaled adjusted range* für verschiedene Werte von s berechnet, die im logarithmischen Maßstab äquidistant gewählt werden. In einem Diagramm werden alle Punkte mit den Koordinaten $(\log[s], \log[R(t, s)/S(t, s)])$ aufgetragen. Durch diese Punktmengen wird eine Regressionsgerade für $s_0 \leq s \leq n$ gelegt, wobei s_0 so gewählt werden muß, daß von der Kurzzeitkorrelationsstruktur der Zeitserie verursachte nichtlineare Einschwingvorgänge eliminiert werden. Die Steigung der Regressionsgeraden ergibt schließlich einen Schätzwert für den Hurst-Parameter H . Diese Methode wird in Abschnitt 4.2.3 zur Bestimmung des Hurst-Parameters eines MPEG-codierten Videodatenstroms auf verschiedenen Zeitebenen eingesetzt.

3.3.2.3 Periodogramm-Analyse

Die Periodogramm-Analyse (*periodogram analysis*) eines stochastischen Prozesses ist eine Analyse im Frequenzbereich, die mit Hilfe der Fouriertransformation durchgeführt wird. Damit ist es möglich, herauszufinden, ob der stochastische Prozeß ein periodisches Verhalten besitzt, das durch zufällige Störeinflüsse verdeckt wird [40, 99]. Zudem bietet das empirische Periodogramm einer Musterfunktion Anhaltspunkte, ob der sie erzeugende stochastische Prozeß selbstständig nach Eigenschaft 5 in Abschnitt 3.3.1 ist.

Das empirische Periodogramm einer Menge zeitdiskreter Beobachtungen (Stichprobe) $\{x_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$ eines stochastischen Prozesses $X(t)$ oder einer Meßreihe kann mit Hilfe der diskreten Fouriertransformation berechnet werden. Zuerst wird eine zentrierte Musterfunktion $\{y_i\}$ mit $\hat{y} = 0$ aus $\{x_i\}$ durch

$$y_i = x_i - \hat{x} \quad \text{für } i = 1, 2, \dots, n \quad (3.74)$$

abgeleitet. Die diskrete Fouriertransformation der Beobachtungen $\{y_i\}$ ist für $i = 1, 2, \dots, n$ durch

$$\zeta_y(\omega_k) = \sum_{i=1}^n y_i e^{-j\omega_k i} \quad \text{für } \omega_k = \frac{2\pi k}{n}, \quad k = 0, \pm 1, \dots, \pm[n/2] \quad (3.75)$$

definiert. Zur Berechnung der diskreten Fouriertransformation kann die schnelle Fouriertransformation benutzt werden [127]. Das Periodogramm (ein Schätzwert für die spektrale Dichtefunktion) der zentrierten Musterfunktion $\{y_i\}$ ist definiert durch

$$I_{n,y}(\omega_k) = \frac{1}{2\pi n} |\zeta_y(\omega_k)|^2. \quad (3.76)$$

Für das Periodogramm der ursprünglichen Musterfunktion $\{x_i\}$ gilt schließlich

$$I_{n,x}(\omega_k) = \begin{cases} \frac{n}{2\pi} \hat{x} & \text{für } \omega_k = 0 \\ I_{n,y}(\omega_k) & \text{für } \omega_k \neq 0 \end{cases}. \quad (3.77)$$

3.3.3 Modellierungsmöglichkeiten langzeitkorrelierter Prozesse

Für die Modellierung natürlicher Phänomene oder technischer Systeme, deren Verhalten Langzeitkorrelationseffekte zeigt, gibt es mehrere Möglichkeiten [39]. Insbesondere haben fraktal differenzierte ARIMA-Prozesse (*autoregressive integrated moving average processes*) und fraktale Gauß-Prozesse universelle Anwendungsmöglichkeiten.

In [67] wird die Anwendung von sogenannten *Deterministic Chaotic Maps* zur Modellierung des Verkehrs in Paketvermittlungsnetzen vorgestellt. Bei dieser Methode wird ausgenutzt, daß der zeitliche Verlauf der Trajektorie des Zustandsvektors bestimmter nichtlinearer Systeme überaus sensitiv auf geringe Änderungen der Anfangsbedingungen reagiert. Da die Anfangsbedingungen in der Regel nur mit endlicher Genauigkeit vorgegeben werden können, zeigen diese Systeme ein chaotisches Verhalten, das, obwohl vollkommen deterministisch, dem Verhalten eines stochastischen Prozesses sehr ähnlich ist. Ein dynamisches System wird als chaotisch bezeichnet, wenn das Verhalten des Zustandsvektors im Gleichgewicht weder durch einen Gleichgewichtspunkt noch durch ein periodisches oder quasiperiodisches Verhalten beschrieben werden kann, der Zustandsraum aber begrenzt ist [226]. Die Grenzzyklen derartiger dynamischer Systeme werden als *strange attractors* bezeichnet, die sich durch ihre fraktale Dimension und sogenannte Lyapunov-Exponenten charakterisieren lassen [12, 13, 69, 98, 118, 183, 207, 286].

Durch die Verwendung eines fraktalen Differenzierungsoperators können die ARIMA-Prozesse auf die Klasse der fraktalen ARIMA-Prozesse erweitert werden [117]. Dadurch wird erreicht, daß die Autokorrelationsfunktion dieser Prozesse näherungsweise dem für langzeitkorrelierte Prozesse notwendigen Verlauf in Gleichung 3.59 entspricht. Die fraktalen ARIMA-Prozesse sind also asymptotisch langzeitkorrelierte Prozesse, die sich durch den in [117] vorgestellten Algorithmus auch für die Anwendung in Systemsimulationen durch Rechenanlagen eignen. Eine kurze Ableitung der Gleichungen der fraktalen ARIMA-Prozesse findet sich in Anhang A.

Die fraktalen Gauß-Prozesse $B_H(t)$ (*fractional Brownian motion random process*, fBm) bilden eine Familie von stochastischen Prozessen, die sich aus einer Verallgemeinerung eines Brownschen Bewegungsprozesses $B(t)$ (Bachelier Prozeß, Wiener Prozeß, *Brownian motion random process*) ergibt. Durch den Parameter H , $H \in]0, 1[$ kann die Korrelation vorgegeben werden. Fraktale Gauß-Prozesse können so theoretisch zur Nachbildung des Verhaltens von empirischen Meßreihen mit beliebigem Hurst-Parameter verwendet werden [212]. Die Grundlagen und Eigenschaften der fraktalen Gauß-Prozesse werden im nächsten Abschnitt diskutiert, soweit sie für die Modellierung der VBR MPEG-codierten Videodatenströme im Rahmen dieser Arbeit benötigt werden.

3.3.4 Fraktale Gauß-Prozesse

3.3.4.1 Definition

Fraktale Gaußsche Bewegungsprozesse und fraktales weißes Rauschen werden ausführlich in [188, 189, 192, 193] beschrieben. Im folgenden werden nur die grundlegenden Zusammenhänge aufgezeigt.

Ein kontinuierlicher Brownscher Bewegungsprozeß (*brownian motion*) $B(t)$ ist dadurch gekennzeichnet, daß für jedes $\epsilon > 0$ die Differenz $B(t + \epsilon) - B(t)$ eine normalverteilte Zufallsvariable mit Erwartungswert $E[B(t + \epsilon) - B(t)] = 0$ und Varianz $\text{VAR}[B(t + \epsilon) - B(t)] = \epsilon$ bildet. Das heißt, ist t ein ganzzahliges Vielfaches von ϵ , dann ergibt sich $B(t)$ mit $t = k\epsilon$, $k \in \mathbb{N}$ aus einer Summe von unabhängigen $N(0, \epsilon)$ -verteilten Zufallsvariablen (zeitdiskretes normalverteiltes weißes Rauschen, *discrete time Gaussian white noise*). Entsprechend erhält man für $t \in \mathbb{N}$ einen diskreten Brownschen Bewegungsprozeß, der sich aus einer Summe von $N(0, 1)$ -verteilten Zufallsvariablen ergibt. Der fraktale Brownsche Bewegungsprozeß $B_H(t)$ wird aus dem kontinuierlichen Prozeß durch die Gleichung

$$B_H(t) - B_H(0) = \int_{-\infty}^0 [(t-u)^{H-0,5} - (-u)^{H-0,5}] dB(u) + \int_0^t (t-u)^{H-0,5} dB(u) \quad (3.78)$$

hergeleitet. Die Funktion $B_H(t) - B_H(0)$ existiert genau dann, wenn $0 < H < 1$ gilt. Für $H = 0,5$ erhält man wieder die kontinuierliche Brownsche Bewegung. Somit kann die fraktale Brownsche Bewegung als eine Verallgemeinerung der kontinuierlichen Brownschen Bewegung betrachtet werden. Der kovarianzstationäre stochastische Prozeß $B_H(t) - B_H(t - \epsilon)$ wird als fraktales weißes Rauschen (*fractional Gaussian noise*, fGn) bezeichnet. Für dessen *population cumulative range* gilt, daß $R_{B_H(t) - B_H(t - \epsilon)}(t, s) s^{-H}$ unabhängig von t und s ist. Auch für die *sample sequential range* gilt mit einer Konstanten $C \in \mathbb{R}^+$

$$E[R(t, s)] = C s^H. \quad (3.79)$$

Fraktales weißes Rauschen ist damit für $0,5 < H < 1$ ein selbstähnlicher stochastischer Prozeß, dessen Parameter H dem Hurst-Parameter entspricht. Die Folge der Werte $\Delta B_H(t) = B_H(t) - B_H(t-1)$, $t \in \mathbb{N}$ bezeichnet man als diskretes fraktales weißes Rauschen (*discrete time fractional Gaussian noise*, dfGn). Es ergibt sich aus dem kontinuierlichen Prozeß durch

$$\Delta B_H(t) = \int_{-\infty}^t K_H(t-u) dB(u) \quad \text{mit} \quad K_H(u) = \begin{cases} u^{H-0,5} & 0 < u < 1 \\ u^{H-0,5} - (u-1)^{H-0,5} & 1 < u \end{cases}. \quad (3.80)$$

Für $H = 0,5$ reduziert sich $\Delta B_H(t)$ zu diskretem weißen Rauschen. $\Delta B_H(t)$ bildet für $t \in \mathbb{N}$ eine Folge von $N(0,1)$ -verteilten Zufallsvariablen. Der Autokorrelationskoeffizient $r_{\Delta B_H \Delta B_H}(\tau)$, $\tau \in \mathbb{N}$ ergibt sich zu

$$r_{\Delta B_H \Delta B_H}(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{für } \tau = 0 \\ \frac{1}{2} [(\tau+1)^{2H} - 2\tau^{2H} + (\tau-1)^{2H}] & \text{für } \tau > 0 \end{cases}. \quad (3.81)$$

3.3.4.2 Näherungsverfahren

Fraktales weißes Rauschen $\{\Delta B_H(t)\}$, $t \in \mathbb{N}$ ist, wie im vorhergehenden Abschnitt beschrieben, ein diskreter stochastischer Prozeß, dessen Korrelation durch den Hurst-Parameter H verändert werden kann und der für $0,5 < H < 1$ langzeitkorreliert ist. Da dieser Prozeß aber durch das Integral in Gleichung 3.80 definiert ist, kann er in dieser Form nicht für die Modellierung der Zufallsprozesse eines technischen Systems und deren Simulation auf einem Computer verwendet werden. Nun gibt es ausgehend von $\{\Delta B_H(t)\}$ zwei Möglichkeiten für die Generierung eines stochastischen Prozesses, der durch einen Computer erzeugt werden kann und näherungsweise die Eigenschaften von $\{\Delta B_H(t)\}$ besitzt:

1. Diskretisierung und näherungsweise Berechnung des Integrals in Gleichung 3.80 [190, fGn Typ 1 und 2].
2. Erzeugung eines $N(0,1)$ -verteilten stochastischen Prozesses, der näherungsweise die Autokorrelationsfunktion nach Gleichung 3.81 besitzt [188, ffGn].

In [255] wurden beide Möglichkeiten auf die Genauigkeit der Verteilungsfunktionen und der Korrelationseigenschaften untersucht. Es hat sich gezeigt, daß die zweite Möglichkeit für die Simulation langzeitkorrelierter stochastischer Prozesse besser geeignet ist. Deswegen wird als nächstes nur der ffGn-Prozeß (*fast fractional Gaussian noise*) $X_f(t, H)$ näher beschrieben (adaptiert von [188]). Dies ist ein normalverteilter kovarianzstationärer stochastischer Prozeß, dessen Autokorrelationsfunktion näherungsweise der des diskreten fraktalen weißen Rauschens entspricht. Dieser Prozeß wird in Kapitel 4 für die Modellierung der VBR MPEG-codierten Videodatenströme auf Szenenebene verwendet.

Der ffGn-Prozeß $X_f(t, H)$ besteht aus der gewichteten Summe vieler Markoff-Gauß-Prozesse, die zusammen die Langzeitkorrelation des diskreten fraktalen weißen Rauschens über ein

endliches Zeitintervall nachbilden. Im folgenden werden nur ffGn-Prozesse mit Standardnormalverteilung betrachtet, da diese später im VBR MPEG-Quellmodell verwendet werden.

Der ffGn-Prozeß $X_f(t, H)$ wird aus der Summe eines niederfrequenten Anteils $X_l(t, H)$ und eines hochfrequenten Anteils $X_h(t, H)$ gebildet. Neben den Parametern t und H werden noch die Basis B und der Qualitätsfaktor Q für die Definition der Güte der Approximation benötigt, wobei für $B \rightarrow 1$ und $Q \rightarrow \infty$ die Güte der Näherung, aber auch der Berechnungsaufwand zunimmt. Eine günstige Wahl der Parameter ist $1,1 \leq B \leq 2$ und $10 \leq Q \leq 20$. Der niederfrequente Anteil ergibt sich aus der Summe von $N(n_{\text{ffGn}})$ unabhängigen Markoff-Gauß-Prozessen $X_{\text{MG}}(t, r_k)$ zu

$$X_l(t, H) = \sum_{k=1}^{N(n_{\text{ffGn}})} W_k X_{\text{MG}}(t, r_k). \quad (3.82)$$

Dabei sind die Markoff-Gauß Prozesse $X_{\text{MG}}(t, r_k)$ definiert als

$$X_{\text{MG}}(t, r_k) = \begin{cases} G_k(1) & \text{für } t = 1 \\ r_k X_{\text{MG}}(t-1, r_k) + \sqrt{1-r_k^2} G_k(t) & \text{für } t > 1 \end{cases}, \quad (3.83)$$

wobei $G_k(t)$, $k = 1, \dots, N(n)$, $t \in \mathbb{N}$ Folgen von unabhängigen standardnormalverteilten Zufallsvariablen sind (diskretes weißes Rauschen). Der Parameter r_k , die Kovarianz aufeinanderfolgender Zufallszahlen, hängt von der Basis B ab und berechnet sich zu

$$r_k = e^{-B^{-k}}. \quad (3.84)$$

Die Markoff-Gauß-Prozesse $X_{\text{MG}}(t, r_k)$ besitzen alle den Erwartungswert Null und die Varianz Eins. Sie unterscheiden sich jedoch in ihren Autokorrelationsfunktionen, die durch den Parameter r_k bestimmt werden, d. h. für die Markoff-Gauß-Prozesse gilt

$$E[X_{\text{MG}}(t, r_k)] = 0, \quad (3.85)$$

$$\text{VAR}[X_{\text{MG}}(t, r_k)] = 1 \text{ und} \quad (3.86)$$

$$C_{X_{\text{MG}}X_{\text{MG}}}(\tau) = r_{X_{\text{MG}}X_{\text{MG}}}(\tau) = (r_k)^\tau. \quad (3.87)$$

Die Gewichtungsfaktoren W_k werden so gewählt, daß die Autokorrelationsfunktion von $X_l(t, H)$ möglichst gut mit der des diskreten fraktalen weißen Rauschens $\Delta B_H(t)$ übereinstimmt. Sie berechnen sich nach

$$W_k^2 = \frac{H(2H-1)(B^{1-H} - B^{H-1})}{\Gamma(3-2H)} B^{-2k(1-H)}. \quad (3.88)$$

Die Anzahl $N(n_{\text{ffGn}})$ der benötigten Markoff-Gauß Prozesse ist abhängig von der Anzahl der Zufallsvariablen n_{ffGn} , über die der ffGn-Prozeß ein Langzeitkorrelationsverhalten aufweisen

soll, und von der Güte, die die Approximation der Autokorrelationsfunktion besitzen soll (beschrieben durch den Qualitätsfaktor Q und die Basis B). Sie berechnet sich zu

$$N(n_{\text{ffGn}}) = \lceil \ln(Qn_{\text{ffGn}}) / \ln(B) \rceil . \quad (3.89)$$

Dadurch, daß sich der niederfrequente Anteil $X_l(t, H)$ des ffGn-Prozesses aus der Summe von Markoff-Gauß-Prozessen mit Mittelwert Null ergibt, ist gewährleistet, daß auch für den Erwartungswert von $X_l(t, H)$ gilt

$$E[X_l(t, H)] = 0 . \quad (3.90)$$

Die Varianz von $X_l(t, H)$ ist jedoch abhängig von den Gewichtungsfaktoren W_k und der Anzahl der Markoff-Gauß-Prozesse $N(n_{\text{ffGn}})$, wobei gilt

$$\lim_{N(n_{\text{ffGn}}) \rightarrow \infty} \text{VAR}[X_l(t, H)] = \frac{H(2H - 1)B^{H-1}}{\Gamma(3 - 2H)} . \quad (3.91)$$

Auch die Autokorrelation von aufeinanderfolgenden Zufallsvariablen von $X_l(t, H)$ stimmt nicht exakt mit $r_{\Delta B_H \Delta B_H}(1) = 2^{2H-1} - 1$ überein. Wird als hochfrequenter Anteil $X_h(t, H)$ ein Markoff-Gauß-Prozeß verwendet, kann erreicht werden, daß sowohl die Varianz als auch die Autokorrelation $r_{X_f X_f}(1)$ mit $r_{\Delta B_H \Delta B_H}(1)$ übereinstimmt. Da die Kurzzeitkorrelation der zu modellierenden Videodatenströme aber stark durch den MPEG-Codierungsalgorithmus beeinflusst wird, ist es unnötig, die Kurzzeitkorrelation exakt der des diskreten fraktalen Rauschens anzupassen. Der hochfrequente Anteil $X_h(t, H)$ muß dann nur dafür sorgen, daß für die Varianz von $X_f(t, H)$ gilt

$$\text{VAR}[X_f(t, H)] = 1 . \quad (3.92)$$

Dies wird durch eine Folge von unabhängigen normalverteilten Zufallsvariablen mit

$$X_h(t, H) = \sqrt{1 - \frac{H(2H - 1)B^{H-1}}{\Gamma(3 - 2H)}} G(t) \quad (3.93)$$

erreicht, wobei $G(t)$ eine Sequenz von unabhängigen standardnormalverteilten Zufallsvariablen ist.

3.4 Hierarchische Verkehrsmodellierung

Die realistische und detaillierte Nachbildung des Verhaltens der Verkehrsquellen eines Kommunikations- oder Rechnersystems bezeichnet man als Quellmodellierung. Diese ist von entscheidender Bedeutung für die Aussagekraft und Genauigkeit der Leistungsuntersuchungen an den Modellen dieser Systeme.

Die Verkehrsquellen eines ATM-Systems und damit die statistischen Eigenschaften der durch sie erzeugten Verkehrsströme sind von einer Vielzahl von Faktoren abhängig. Eine wesentliche Rolle spielt das menschliche Teilnehmerverhalten, die Art des in Anspruch genommenen Kommunikationsdienstes, die hierbei verwendeten Protokolle sowie spezielle technische Realisierungen, wie die Verwendung von Verfahren zur Reduzierung der Datenmenge (Kompressionsverfahren, Codierverfahren).

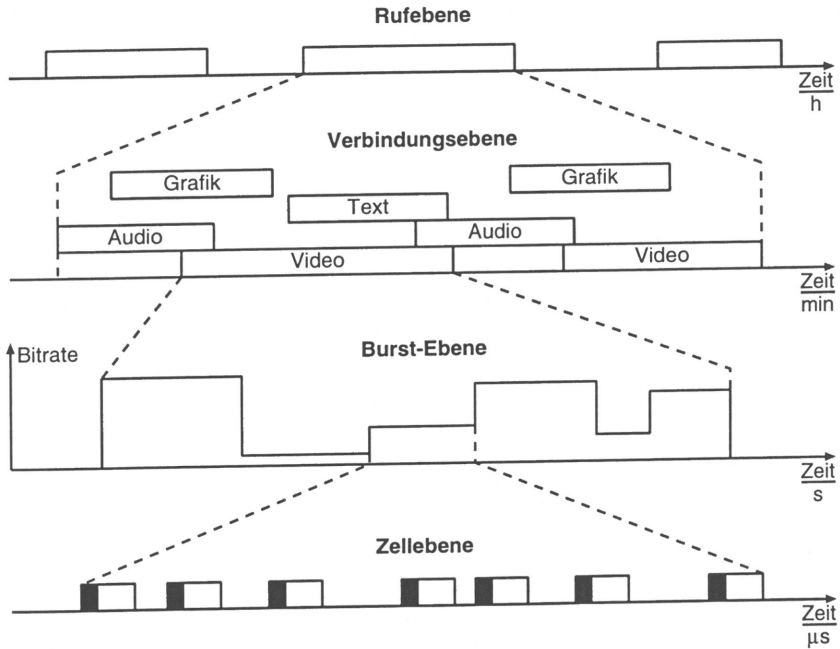


Bild 3.1: Hierarchische Modellierung einer Verkehrsquelle

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Verkehrsströmen mit konstanter Bitrate (*constant bit rate*, CBR) und variabler Bitrate. CBR-Quellen sind relativ einfach zu modellieren, VBR-Quellen können dagegen sehr komplexe Quellmodelle erfordern. Die VBR-Verkehrsquellen werden von den obengenannten Einflußgrößen in sehr unterschiedlichen Zeiträumen beeinflusst.

Deshalb ist für die Modellierung ein hierarchischer Ansatz, wie in Abbildung 3.1 für eine multimediale Verkehrsquelle dargestellt, naheliegend [74, 112, 123, 157, 235, 253, 272, 290]. Die hierarchischen Zeitebenen überspannen Vorgänge im Bereich von wenigen Mikrosekunden bis zu Stunden oder Tagen. Die Ausprägung der verschiedenen Ebenen und damit deren Modellierung ist von der betrachteten Verkehrsquelle abhängig.

3.4.1 Charakterisierung der Verkehrsströme

Die Charakterisierung des statistischen Verhaltens der Verkehrsströme auf den verschiedenen Zeitebenen erfolgt durch mathematische Modelle und wird durch geeignete stochastische Prozesse oder Zustandsmodelle beschrieben. Dabei wird berücksichtigt, daß das Verhalten der Verkehrsquelle auf einer bestimmten Zeitebene das Verhalten auf den darunter liegenden Ebenen beeinflusst. Ist das Verhalten auf einer Zeitebene durch diskrete Anforderungen beschreibbar, so kann dies über die Zwischenankunftsabstände der Anforderungen oder über einen Zählprozeß, der die Anzahl der Anforderungen in einem Zeitintervall beschreibt, erfolgen [235]. Die Beschreibung der verschiedenen Zeitebenen wird in den folgenden Abschnitten diskutiert.

3.4.2 Rufebene

Die Rufebene einer Verkehrsquelle kann durch zwei Zustände charakterisiert werden. Entweder besteht ein Ruf, d. h. die Quelle ist aktiv, oder die Quelle ist inaktiv. Die Verweildauer in den beiden Zuständen ist geprägt vom Teilnehmerverhalten und der Art des Kommunikationsdienstes. So liegt die mittlere Dauer eines Telefongesprächs im Minutenbereich, die mittlere Nutzungsdauer eines Videokonferenzdienstes, eines CSCW- (*computer supported cooperative work*) oder Video-On-Demand-Dienstes jedoch im Stundenbereich. Zudem schwankt das Teilnehmerverhalten im Tages-, Wochen-, und Jahresrhythmus (siehe z. B. [205], so daß für die Dimensionierung von Vermittlungseinrichtungen oftmals das Verkehrsaufkommen zur sogenannten Hauptverkehrsstunde oder mittleren Hauptverkehrsstunde [215] zugrunde gelegt wird.

Zur Vereinfachung der mathematischen Beschreibung wird häufig angenommen, daß die Rufdauern und die Pausenzeiten voneinander unabhängig und negativ-exponentiell verteilt (Beschreibung durch Poisson-Prozesse) oder geometrisch verteilt (Beschreibung durch Bernoulli-Prozesse) sind.

3.4.3 Verbindungsebene

Während eines Multimedia-Rufs können dynamisch Verbindungen für verschiedene Darstellungsmedien auf- und abgebaut werden, so daß jede Multimedia-Anwendung einen Verkehrsmix aus Video-, Audio-, Text- und Grafikverkehr erzeugt. Der Anteil der verschiedenen Verbindungen am Gesamtverkehr einer Quelle ist sehr unterschiedlich. Insgesamt führt die Integration und Synchronisation von verschiedenen Verbindungen in Multimedia-Anwendungen zu einer immensen Vielfalt von Gesamtverkehrsströmen, die sich in ihren charakteristischen

Merkmale und den daraus resultierenden Anforderungen an die sie verarbeitenden Systeme wesentlich unterscheiden. Für die Beschreibung des Verhaltens der Verkehrsquellen auf Verbindungsebene ist es daher hilfreich, die Vielfalt der Multimedia-Anwendungen zu klassifizieren [7, 181, 248], beispielsweise in

- Verteildienste,
- Multimedia-Mail,
- Informations- und Transaktionssysteme,
- Telekonferenz- und CSCW-Systeme,
- Verteilte Tutoring- und Lernsysteme,
- Audiovisuelle Simulationen,

und Modelle für die verschiedenen Klassen zu entwickeln. Da das Verhalten auf Verbindungsebene von der Multimedia-Anwendung, aber auch wesentlich vom Benutzerverhalten beeinflusst wird, erfolgt die Modellierung der einzelnen Verbindungen ähnlich wie Modellierung auf Rufebene.

3.4.4 Burst-Ebene

Die Burst-Ebene beschreibt das Verhalten einer Verkehrsquelle während der Verbindungsdauer. Dieses Verhalten ist medienabhängig [260] und kann bei VBR-Quellen komplexen Mechanismen unterliegen und deshalb ein weiteres zeitlich hierarchisches Unterteilen der Burst-Ebene nahelegen. Die Modellierung von Diensten für die paketierte Datenübertragung kann die Unterteilung in eine Paket- und Datenblockebene [74, 20] erforderlich machen.

Für Konferenzdienste kann die Verwendung einer Dialogebene vorteilhaft sein, wenn in den Redepausen durch die Verwendung eines Spracherkennungssystems die Übermittlung von Audiodaten unterdrückt wird und dadurch eine Talkspurt-Silence-Charakteristik entsteht. Die Verteilung und die Mittelwerte der Talkspurt- und Silencephasen sind stark abhängig vom Erkennungsverfahren, aber auch von der Gesprächssituation und der Anzahl der Gesprächsteilnehmer [19, 100, 174]. Modellierungsmöglichkeiten für Sprachquellen für paketvermittelte Netze finden sich z. B. in [44, 108, 177, 264, 275].

Für die Modellierung einer VBR-Videoquelle ist die hierarchische Untergliederung der Burst-Ebene nahezu zwingend, da die Variabilität des Datenstroms vom verwendeten Codieralgorithmus, der die Videobilder meist hierarchisch bearbeitet und in Blöcken codiert, und vom Videomaterial abhängt. In [216] werden für die Beschreibung drei Ebenen verwendet. Die Szenenebene beschreibt die Langzeitveränderungen (*long-term variability*) in der Komplexität des Videomaterials in verschiedenen Szenen. Kurzzeitige Veränderungen durch die Bewegung

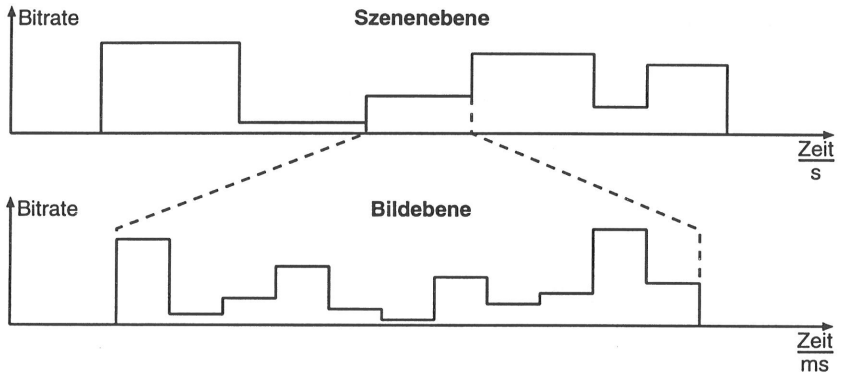


Bild 3.2: Modellierung der Burst-Ebene einer Videoquelle

einzelner Objekte oder Kamerabewegungen innerhalb einer Szene werden in der *Intrascene*-Ebene zusammengefaßt. Vorgänge bei der Codierung einzelner Bilder (z. B. periodisches oder blockweises Verarbeiten) werden durch die Bildebene beschrieben.

Für MPEG-codierte Videodatenströme kann entsprechend ihres hierarchischen Aufbaus zusätzlich eine Sequenz-, GOP-, Slice-, Makroblock- oder Block-Ebene verwendet werden [143]. Das Quellmodell, das in Kapitel 4 vorgestellt wird, verwendet ein zweistufiges Modell für die Burst-Ebene nach Abbildung 3.2, in dem nur zwischen der Langzeitvariabilität durch die Komplexität der Szenen und den codierten Datenmengen des MPEG-Codieralgorithmus für aufeinanderfolgende Bilder unterschieden wird. Die Validierung des Modells in Unterkapitel 5.2 wird zeigen, daß es durch die Verwendung von zwei Ebenen möglich ist, die entscheidenden Verhaltensmuster der Quelle nachzubilden.

3.4.5 Zellebene

Die Beschreibung der Abfolge der Ankünfte einzelner ATM-Zellen erfolgt auf der Zellebene. Im allgemeinen sind die Ankunftsabstände aufeinanderfolgender ATM-Zellen einer Quelle korreliert. Der Grad der Korrelation ist abhängig vom Verhalten der Quelle auf der Burst-Ebene und der Paketierung der Daten in ATM-Zellen. Für die Überlagerung vieler Quellen wird jedoch häufig angenommen, daß der Überlagerungsverkehr durch Erneuerungsprozesse modelliert werden kann, d. h. die Zellzwischenankunftsabstände voneinander unabhängig und identisch verteilt (iid) sind. Diese Annahme kann speziell bei hochgradig korrelierten Verkehrsquellen, wie VBR-Videoquellen, nicht aufrecht erhalten werden, wie in Abschnitt 5.3.1 gezeigt wird. Eine Übersicht über gängige Modelle von Verkehrsquellen für ATM-Systeme zur Modellierung der Zell- und Burst-Ebene findet man in [232].

3.5 Modellierung technischer Systeme

Die Struktur eines technischen Systems wird aus Grundelementen (Strukturkomponenten) aufgebaut, die elementare Operationen ausführen. Ein System, das in zufälliger Art und Weise eintreffende Anforderungen bearbeitet, kann durch Warteschlangen und Bedieneinheiten modelliert werden, die von abstrakten Aufträgen durchlaufen werden. Dabei kann jeder abstrakte Auftrag aus mehreren Anforderungen bestehen und so an einer Warteschlange oder einer Bedieneinheit eine Gruppenankunft (*batch-arrival*) bewirken. Man unterscheidet Wartesysteme, bei denen alle Aufträge gespeichert und schließlich durch die Bedieneinheit bearbeitet werden, und Verlustsysteme, bei denen alle Aufträge, die eintreffen während die Bedieneinheit belegt ist, verloren gehen, sowie Warte-Verlustsysteme, die eine begrenzte Anzahl von Aufträgen speichern können. Eine Warteschlange kann mit den zugehörigen Bedieneinheiten und ihrem Ankunftsprozeß zu einem elementaren Warteschlangenmodell zusammengefaßt werden. Für die Charakterisierung der stochastischen Prozesse (Ankunftsprozeß und Bedienprozeß), der Struktur (Anzahl der Warteplätze und Bedieneinheiten) und der Betriebsorganisation (Abfertigungsstrategie der Warteschlange) eines solchen Modells wird die erweiterte Kendallsche Notation verwendet (siehe z. B. [162]).

Für die Modellierung komplexer Systeme, die sich in unabhängige Teilsysteme zerlegen lassen, können mehrere elementare Warteschlangenmodelle zu einem Warteschlangennetz zusammengefügt werden. Der Fluß der Aufträge zwischen den einzelnen Komponenten wird durch Pfeile dargestellt. Zusätzlich werden weitere Strukturkomponenten für die Verzweigung und Zusammenführung von Aufträgen benötigt. Je nach Topologie unterscheidet man drei Arten von Warteschlangennetzen:

- Offene Warteschlangennetze,
- geschlossene Warteschlangennetze und
- gemischte Warteschlangennetze.

Bei offenen Warteschlangennetzen kommen Aufträge von außen an und verlassen das Netz nach endlicher Zeit wieder. Dagegen ist bei einem geschlossenen Warteschlangennetz ständig eine konstante Anzahl von Aufträgen im Netzwerk. Wenn sich eine gewisse Anzahl von Aufträgen ständig im Netz befindet, aber auch Aufträge von außerhalb ankommen oder Aufträge das Netz verlassen können, spricht man von einem gemischten Warteschlangennetz.

Können die Teilsysteme nicht unabhängig modelliert werden, weil sie sich gegenseitig blockieren können oder Aufträge durch mehrere Teilsysteme synchron bearbeitet werden müssen, benötigt man für die Modellierung weitere Strukturkomponenten. Diese können in Anlehnung an die Theorie der Petri-Netze [163, 58] definiert werden [94], die für die Beschreibung und Analyse von Abläufen mit nebenläufigen Prozessen und nichtdeterministischen Vorgängen in dynamischen Systemen mit fester Grundstruktur entwickelt wurde.







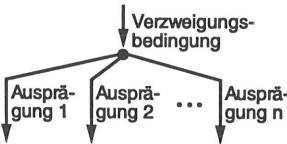

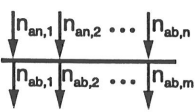
	<p>Generator zur Erzeugung von Aufträgen</p>
	<p>Bedieneinheit (<i>server</i>) mit Charakterisierung der Bediendauer durch die Zufallsvariable T</p>
	<p>Bediensystem bestehend aus unendlich vielen unabhängigen, parallel arbeitenden Bedieneinheiten (<i>infinite server</i>)</p>
	<p>Begrenzte Warteschlange mit Platz für n Anforderungen. Jedes Ankunftsereignis erhöht die Anzahl der wartenden Anforderungen um n_{an}, jedes Abgangsergebnis vermindert sie um n_{ab} (Gruppenankünfte und -abgänge).</p>
	<p>Begrenzte Warteschlange mit einem Warteplatz</p>
	<p>Unbegrenzte Warteschlange mit unendlicher Anzahl an Warteplätzen. Jeder ankommende Auftrag erhöht die Anzahl der wartenden Anforderungen um n_{an}, jeder abgehende Auftrag vermindert sie um n_{ab} (Gruppenankünfte und -abgänge).</p>
	<p>Bedingte Verzweigung eines Auftrags</p>
	<p>Zusammenführung von Aufträgen</p>
	<p>Transition zur Synchronisation von Anforderungen, zur Modellierung von Blockierungen oder zur Aufspaltung von Aufträgen in mehrere Folgeaufträge, deren Anzahl konstant oder eine Zufallsvariable sein kann</p>

Tabelle 3.3: Strukturkomponenten für die Modellierung technischer Systeme

Alle Strukturkomponenten, die für die Modellierung des Videoservers in Abschnitt 6.2 benötigt werden, sind in Tabelle 3.3 zusammengestellt. Die Aufträge werden durch den Generator erzeugt. Bei der Modellierung des Videoservers wird nur eine Art Generator benötigt, so daß es ausreicht, die Generatoren durch ein G zu bezeichnen.

Dagegen enthält das Modell sehr viele verschiedene Bedieneinheiten, so daß diese durch die Zufallsvariable T der Bediendauer gekennzeichnet werden. Eine Bedieneinheit ist in der Lage, zu jedem Zeitpunkt immer nur einen Auftrag zu bearbeiten, der aus mehreren Anforderungen bestehen kann. Mehrere gleichartige Bedieneinheiten können zu einem Bediensystem zusammengefaßt werden, bei dem die Bedieneinheiten unabhängig arbeiten und eine beliebige freie Bedieneinheit die nächste Anforderung übernimmt.

Die Pfeile zur Darstellung des Flusses der Aufträge erhalten als Parameter eine Zufallsvariable (z. B. n_{an} oder n_{ab}) zur Beschreibung der Anzahl der Anforderungen pro Auftrag. Dies kann als Verallgemeinerung der Gewichte der gerichteten Kanten der Stellen-Transitions-Netze verstanden werden. Ist keine Zufallsvariable angegeben, enthält ein Auftrag immer eine Anforderung.

Für die Speicherung der Anforderungen werden Warteschlangen mit einer endlichen Anzahl von Warteplätzen (endliche Warteschlange) und Warteschlangen ohne Begrenzung der Anzahl der Wartenden (unendliche Warteschlange) verwendet. Ein Spezialfall der endlichen Warteschlange ist die Warteschlange mit nur einem Warteplatz, die der Speicherung einer Synchronisationsanforderung (Synchronisationstoken) dient. Jede Warteschlange hat als zusätzlichen Parameter die Abfertigungsstrategie, nach der die wartenden Anforderungen abgearbeitet werden. Ist keine Abfertigungsstrategie angegeben, wird die Warteschlange nach der Strategie First-In-First-Out (FIFO) bedient, bei der die Anforderungen in der Reihenfolge ihres Eintreffens bearbeitet werden.

Ein Auftrag kann über ein Merkmal verzweigen, das heißt je nach Ausprägung des Merkmals einen entsprechenden Pfad wählen. Aufträge auf verschiedenen Pfaden können zusammengeführt und ab einem bestimmten Punkt auf demselben Pfad weitergeführt werden. Zur Modellierung von Blockierungen und Synchronisationsbedingungen wird das Transitionsymbol aus der Theorie der Petri-Netze verwendet. Eine Transition wird aktiviert, wenn an allen Eingängen i , $i \in \{1, 2, \dots, n\}$ die Gruppenankunft von $n_{an,i}$ Anforderungen möglich ist und alle nachfolgenden Komponenten j , $j \in \{1, 2, \dots, m\}$ jeweils eine Gruppenankunft mit $n_{ab,j}$ Anforderungen aufnehmen können.

3.6 Simulationstechnik

Die Simulation ist eine universelle Methode, die in den Natur- und Ingenieurwissenschaften für die Untersuchung natürlicher Vorgänge und technischer Systeme eingesetzt wird. Für die

Leistungsuntersuchung von Rechner- und Kommunikationssystemen eignet sich besonders die ereignisgesteuerte Simulationstechnik. Damit ist es möglich, Systeme zu untersuchen, die sich durch ihre Komplexität oder durch die Eigenschaften der für die Beschreibung ihrer zufallsabhängigen Komponenten verwendeten stochastischen Prozesse einer analytischen Behandlung entziehen. So läßt sich die Überlagerung mehrerer VBR MPEG-codierter Videodatenströme, wie sie in Kapitel 5 untersucht wird, nur näherungsweise durch analytische Verfahren beschreiben [62], und das in Kapitel 6 untersuchte Video-On-Demand-System ist durch seine Komplexität nicht analytisch handhabbar.

In den folgenden Abschnitten wird die Methodik der ereignisgesteuerten Systemsimulation beschrieben, da diese für die Leistungsuntersuchungen in den Kapiteln 5 und 6 verwendet wird. Eine ausführliche Beschreibung der ereignisgesteuerten Simulationsmethodik findet sich z. B. in [164, 218, 227]. Wichtig bei der simulativen Untersuchung ist eine Betrachtung der Konvergenz und der statistischen Aussagekraft der durch sie gewonnenen Leistungsdaten des untersuchten Systems. Hier soll besonders auf die Konvergenz der Ergebnisse für stochastische Prozesse mit und ohne Langzeitkorrelation eingegangen werden.

3.6.1 Ereignisgesteuerte Simulation

Um ein technisches System durch eine zeitdiskrete ereignisgesteuerte Simulation zu untersuchen, muß die Struktur und das Verhalten des Systems auf einem Digitalrechner durch ein Simulationsprogramm nachgebildet werden. Ein Simulationsprogramm besteht aus mehreren Teilen. Die Beschreibung des zu untersuchenden Systems erfolgt durch die in Abschnitt 3.5 beschriebenen Strukturkomponenten. Diese werden auf entsprechende Datenstrukturen abgebildet, die die Parameter und den Systemzustand der Strukturkomponenten enthalten.

Die stochastischen Prozesse, die benötigt werden, um das zufallsabhängige Verhalten des Systems zu beschreiben, werden durch Pseudo-Zufallszahlengeneratoren realisiert, die die gewünschten Verteilungsfunktionen und Korrelationseigenschaften nachbilden.

Die Komponenten des Modells des technischen Systems ändern ihren Systemzustand zu bestimmten Zeitpunkten durch das Eintreten von Ereignissen (z. B. Ankunft einer Anforderung an einer Warteschlange oder Ende der Bedienung einer Anforderung). Die Ereignisse werden mit Hilfe eines sogenannten Kalenders verwaltet, der die Simulationszeitachse repräsentiert. In diesen Kalender werden die Ereigniszeitpunkte aller Ereignisse in chronologischer Reihenfolge eingetragen. Zu Beginn der Simulation wird der Kalender durch Startereignisse (z. B. dem Sendezeitpunkt der ersten ATM-Zelle einer Verkehrsquelle) initialisiert. Während der Simulation wird durch die Ablaufsteuerung jeweils das nächste Ereignis aus dem Kalender genommen und die Simulationszeit auf dessen Ereigniszeitpunkt gesetzt. Dabei wird die Zeitspanne zwischen dem Ereigniszeitpunkt des letzten Ereignisses und diesem Ereignis übersprungen. Da durch das Eintreffen eines Ereignisses der Systemzustand des Modells

verändert wird, müssen die Datenstrukturen der betroffenen Komponenten dem neuen Systemzustand angepaßt werden. Im allgemeinen löst die Bearbeitung eines Ereignisses auch zukünftige Folgeereignisse aus, die in den Kalender entsprechend ihrer Ereigniszeitpunkte einzusortieren sind.

Um die interessierenden Leistungsgrößen des Systemmodells während der Simulation beobachten zu können, werden Datenstrukturen mit Meßzählern verwendet. Diese werden, wie der Systemzustand, jeweils beim Eintreffen eines Ereignisses aktualisiert. Bei der stationären Systemsimulation soll das Verhalten des Systems im eingeschwungenen Zustand untersucht werden. Dazu wird die Simulationszeit in mehrere Phasen eingeteilt. Die erste Phase bezeichnet man als Warmlaufphase. Sie dient dazu, das Systemmodell in den eingeschwungenen Zustand zu bringen, und es werden keine Meßwerte ermittelt. Daran schließen sich mehrere Teiltests (i.allg. 10) an, in denen jeweils Meßwerte für die zu beobachtenden Leistungsgrößen ermittelt werden. Aus den Meßwerten der Teiltests werden dann am Ende der Simulation mit Hilfe der Stichprobentheorie Schätzwerte für die beobachteten Leistungsgrößen und Konfidenzintervalle (Vertrauensintervalle) berechnet. Das Konfidenzintervall gibt den Bereich um den Schätzwert an, in dem sich der tatsächliche Wert der Leistungsgröße mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit, dem Konfidenzniveau γ , befindet.

Die in einer vorgegebenen Zeitspanne erzielbare Genauigkeit der Simulationsergebnisse, d. h. die minimale erreichbare Länge des Konfidenzintervalls, ist von der Anzahl der Ereignisse abhängig, die innerhalb der vorgegebenen Zeit bearbeitet werden können. Dies ist neben der Leistungsfähigkeit des verwendeten Digitalrechners von der Komplexität der Ereignisbearbeitung und der Art der verwendeten stochastischen Prozesse abhängig (siehe auch Abschnitt 3.6.2).

So können mit heutigen RISC-Arbeitsplatzrechnern (*Reduced Instruction Set Computer*) bei Simulation der Zell- und Burst-Ebene bei der Verwendung langzeitkorrelierter Verkehrsquellen innerhalb weniger Tage Zellverlustwahrscheinlichkeiten von etwa 10^{-7} mit hinreichender Genauigkeit erfaßt werden. Generell ist es notwendig, sich bei der Modellierung des technischen Systems auf wenige Zeitebenen (1–2) zu beschränken. Das Verhalten des Systems auf den darunterliegenden Zeitebenen wird so weit wie möglich vereinfacht und das der Zeitebene über den betrachteten wird „eingefroren“, d. h. der Verlauf der Systemvariablen dieser Ebene wird über die Dauer der Simulation als konstant angenommen (z. B. auf Verbindungsebene die Anzahl der bestehenden Verbindungen).

Da für ATM-Systeme Verlustwahrscheinlichkeiten bis unter 10^{-10} diskutiert werden, wurden in letzter Zeit mehrere Verfahren für die Vorhersage seltener Ereignisse vorgeschlagen. Dazu zählen hybride Verfahren, die analytische Methoden und Simulation kombinieren [158, 238], Verfahren zur Reduktion der Varianz der Meßwerte unter Verwendung der statistischen Eigenschaften des Simulationsmodells [280] und Extrapolationsmethoden [148]. Eine sehr gute Gliederung und Beschreibung der verschiedenen Methoden findet sich in [243, S. 197–209].

Die Verwendung von Parallelrechnern ist eine weitere Möglichkeit, die es erlaubt, komplexere Systeme in vertretbarer Zeit zu simulieren [80].

Da für die Beschreibung des prinzipiellen Verhaltens der im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Systeme das oben beschriebene Standardverfahren ausreichte und für dieses Komponenten einer bestehenden umfangreichen Simulationsbibliothek [283, 91] verwendet werden konnten, wurde auf die Anwendung spezieller Verfahren verzichtet.

3.6.2 Zeitliche Konvergenz der Erwartungswerte stochastischer Prozesse

Durch die stationäre Simulation eines technischen Systems sollen dessen charakteristische Leistungsgrößen im eingeschwungenen Zustand ermittelt werden, d. h. die Simulation wird so lange durchgeführt, bis die betrachteten Leistungsgrößen auf einen stationären Wert konvergiert sind. Der Grad der Konvergenz kann durch Konfidenzintervalle beschrieben werden, die den Bereich angeben, in dem der tatsächliche Wert der Leistungsgröße mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit (z. B. 95% oder 99%), dem Konfidenzniveau γ , liegt. Die Geschwindigkeit der Konvergenz der Leistungsgrößen ist abhängig vom betrachteten technischen System und den stochastischen Prozessen, die für die Beschreibung der zufallsabhängigen Vorgänge verwendet werden. In diesem Abschnitt wird gezeigt, daß sich bei der Verwendung von langzeitkorrelierten stochastischen Prozessen ein eingeschwungener Zustand erst sehr viel später einstellt als bei der Verwendung von Erneuerungsprozessen und damit die notwendige Simulationszeit um mehrere Größenordnungen verlängern kann.

Für eine normalverteilte Zufallsvariable X mit Erwartungswert μ und Varianz σ^2 werden für die Bestimmung der Grenzen des Konfidenzintervalls die $\frac{1+\gamma}{2}$ -Quantile $c_{\frac{1+\gamma}{2}}$ verwendet, für die gilt

$$P(\mu - c_{\frac{1+\gamma}{2}} \leq X \leq \mu + c_{\frac{1+\gamma}{2}}) = \gamma . \quad (3.94)$$

Eine Beobachtung der Zufallsvariablen X liegt damit mit der Wahrscheinlichkeit γ innerhalb des Konfidenzintervalls

$$\left[\mu - c_{\frac{1+\gamma}{2}} , \mu + c_{\frac{1+\gamma}{2}} \right] . \quad (3.95)$$

Das Quantil $c_{\frac{1+\gamma}{2}}$ läßt sich über die Verteilungsfunktion $\Phi(x) = F_X(x)$ der Standardnormalverteilung und deren $\frac{1+\gamma}{2}$ -Quantil $z_{\frac{1+\gamma}{2}}$ durch

$$c_{\frac{1+\gamma}{2}} = \sigma \cdot z_{\frac{1+\gamma}{2}} \quad \text{mit} \quad z_{\frac{1+\gamma}{2}} = \Phi^{-1} \left(\frac{1+\gamma}{2} \right) \quad (3.96)$$

berechnen. Die Geschwindigkeit der Konvergenz der Simulationsergebnisse ist stark von der Korrelationsstruktur der verwendeten stochastischen Prozesse abhängig. Von grundlegendem

Interesse ist die Konvergenz des Mittelwertprozesses

$$X_t^{**} = \frac{X_t^*}{t} \quad (3.97)$$

eines verwendeten diskreten Prozesses $\{X_t\}$. Im folgenden wird deshalb die Konvergenz des Mittelwertprozesses $N(0, \sigma^2)$ -verteilter stochastischer Prozesse mit unterschiedlichem Korrelationsverhalten untersucht und verglichen.

Ist $\{X_t\}$ eine Folge von unkorrelierten $N(0, \sigma^2)$ -verteilten Zufallsvariablen, dann ist der Mittelwertprozeß X_t^{**} nach Abschnitt 3.1.2 $N(0, \sigma^2/t)$ -verteilt. Als Konfidenzintervall für X_t^{**} erhält man so

$$\left[-\frac{\sigma}{\sqrt{t}} z_{\frac{1+\gamma}{2}}, \frac{\sigma}{\sqrt{t}} z_{\frac{1+\gamma}{2}} \right]. \quad (3.98)$$

Ist $\{X_t\}$ ein diskreter, normalverteilter exakt selbstähnlicher Prozeß mit Mittelwert Null, Varianz σ^2 und Hurst-Parameter H , dann gilt für die Varianz des Mittelwertprozesses X_t^{**} nach [39] (vergleiche Eigenschaft 2 in Abschnitt 3.3.1)

$$\text{VAR}[X_t^{**}] = t^{-2(1-H)} \sigma^2, \quad (3.99)$$

X_t^{**} ist also $N(0, t^{-2(1-H)} \sigma^2)$ -verteilt und man erhält als Konfidenzintervall

$$\left[-\frac{\sigma}{t^{1-H}} z_{\frac{1+\gamma}{2}}, \frac{\sigma}{t^{1-H}} z_{\frac{1+\gamma}{2}} \right]. \quad (3.100)$$

Für einen normalverteilten ffGn-Prozeß $X_f(t, H)$ mit Mittelwert Null, Varianz Eins und Hurst-Parameter H nach Abschnitt 3.3.4.2 mit

$$X_f(t, H) = \sum_{k=1}^{N(n_{\text{ffGn}})} [W_k X_{\text{MG}}(t, r_k)] + X_h(t, H) \quad (3.101)$$

erhält man als Mittelwertprozeß

$$X_f^{**}(t, H) = \sum_{k=1}^{N(n_{\text{ffGn}})} W_k \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t X_{\text{MG}}(i, r_k) + \frac{1}{t} \sum_{i=1}^t X_h(i, H). \quad (3.102)$$

Die Zufallsvariablen des Markoff-Gauß-Prozesses $X_{\text{MG}}(t, r_k)$, die sich nach Gleichung 3.83 durch einen autoregressiven Prozeß rekursiv berechnen, können auch durch

$$X_{\text{MG}}(t, r_k) = \begin{cases} G_k(1) & \text{für } t = 1 \\ r_k^{t-1} G_k(1) + \sqrt{1 - r_k^2} \sum_{i=2}^t r_k^{t-i} G_k(i) & \text{für } t > 1 \end{cases} \quad (3.103)$$

berechnet werden. Daraus erhält man für die Summe der Zufallsvariablen eines Markoff-Gauß-Prozesses die Darstellung

$$\sum_{i=1}^t X_{\text{MG}}(i, r_k) = \sum_{i=1}^t r_k^{i-1} G_k(1) + \sqrt{1 - r_k^2} \sum_{j=1}^{t-1} \sum_{i=1}^{t-j} r_k^{i-1} G_k(j+1). \quad (3.104)$$

Da die Zufallsvariablen $G_k(t)$ alle voneinander unabhängig und $N(0,1)$ -verteilt sind, ist die Zufallsvariable $\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t X_{\text{MG}}(i, r_k) N(0, \sigma_{\text{MG}}^2(t, r_k))$ -verteilt mit

$$\sigma_{\text{MG}}^2(t, r_k) = \frac{1}{t} + 2 \sum_{i=1}^{t-1} \frac{t-i}{t^2} r_k^i. \quad (3.105)$$

Damit ist auch die gewichtete Summe aller Markoff-Gauß-Prozesse normalverteilt mit Mittelwert Null und Varianz $\sigma_{\text{MG}}^2(t)$ und es gilt

$$\sigma_{\text{MG}}^2(t) = \sum_{k=1}^{N(n_{\text{ffGn}})} W_k^2 \sigma_{\text{MG}}^2(t, r_k). \quad (3.106)$$

Der hochfrequente Anteil $X_h(t, H)$ des ffGn-Prozesses $X_f(t, H)$ ist eine Folge von unkorrelierten Zufallsvariablen mit Mittelwert Null und Varianz σ_h^2 mit

$$\sigma_h^2 = 1 - \frac{H(2H-1)B^{H-1}}{\Gamma(3-2H)}, \quad (3.107)$$

also ist $\frac{1}{t} \sum_{i=1}^t X_h(i, H) N(0, \sigma_h^2/t)$ -verteilt. Schließlich ist auch $X_f^{**}(t, H)$ normalverteilt mit

$$E[X_f^{**}(t, H)] = 0 \quad \text{und} \quad (3.108)$$

$$\text{VAR}[X_f^{**}(t, H)] = \sigma_{\text{MG}}^2(t) + \frac{\sigma_h^2}{t} \quad (3.109)$$

und man erhält als Konfidenzintervall zum Konfidenzniveau γ für $X_f^{**}(t, H)$

$$\left[-\sqrt{\sigma_{\text{MG}}^2(t) + \frac{\sigma_h^2}{t}} z_{\frac{1+\gamma}{2}}, \sqrt{\sigma_{\text{MG}}^2(t) + \frac{\sigma_h^2}{t}} z_{\frac{1+\gamma}{2}} \right]. \quad (3.110)$$

Wird die Länge der Konfidenzintervalle nach Gleichung 3.98 oder 3.100 in doppelt logarithmischem Maßstab über der Zeitspanne t aufgetragen, ergeben sich Geraden mit unterschiedlicher Steigung. Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf der Länge der Konfidenzintervalle zum Konfidenzniveau $\gamma = 0,95$ für exakt fraktale $N(0,1)$ -verteilte stochastische Prozesse mit Hurst-Parameter H . Als Grenzfälle sind auch die Kurven für $H = 0,5$, d. h. eines unkorrelierten Prozesses, und für $H = 1$ eingezeichnet. Mit steigendem H nimmt die Länge der Konfidenzintervalle immer langsamer ab. Der Mittelwertprozeß konvergiert also langsamer. Für $H \rightarrow 1$ bleibt die Intervalllänge unabhängig von der Zeitspanne t konstant.

Das Verhalten des ffGn-Prozesses für $H = 0,8$ zeigt Abbildung 3.4 in Abhängigkeit von der Wahl der Anzahl der gewünschten Zufallszahlen n_{ffGn} . Für eine Zeitspanne, die in etwa der Anzahl der gewünschten Zufallszahlen entspricht, folgt der Verlauf der Länge der Konfidenzintervalle dem des exakt fraktalen Prozesses. Für $t \rightarrow \infty$ entspricht die Steigung der Kurven der eines unkorrelierten Prozesses, da für Zeitspannen $t > n_{\text{ffGn}}$ der ffGn-Prozeß nicht mehr in der Lage ist, das selbstähnliche Verhalten eines exakt fraktalen Prozesses nachzubilden.

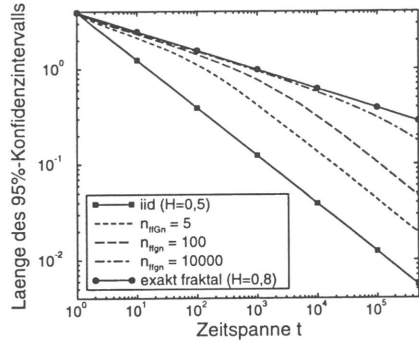
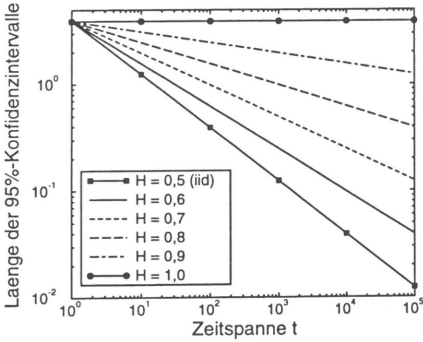


Bild 3.3: Einfluß des Hurst-Parameters H auf die Größe der Konfidenzintervalle von X_t^{**} eines exakt fraktalen stochastischen Prozesses

Bild 3.4: Größe der Konfidenzintervalle des Mittelwertprozesses $X_f^{**}(t, H)$ eines ffGn-Prozesses mit $H = 0,8$, $B = 1,1$, $Q = 20$

Realisierungen des Verlaufs der Zufallsvariablen X_t^{**} für einen unkorrelierten Prozeß und $X_f^{**}(t, H)$ des ffGn-Prozesses mit $H = 0,8$ zusammen mit den 95%-Konfidenzintervallen zeigt Abbildung 3.5. Man erkennt deutlich die größeren Schwankungen des ffGn-Prozesses für große Zeitspannen t , so daß eine wesentlich längere Simulationsdauer erforderlich ist, bis der Mittelwertprozeß eines selbstähnlichen Prozesses ein hinreichend kleines Konfidenzintervall besitzt.

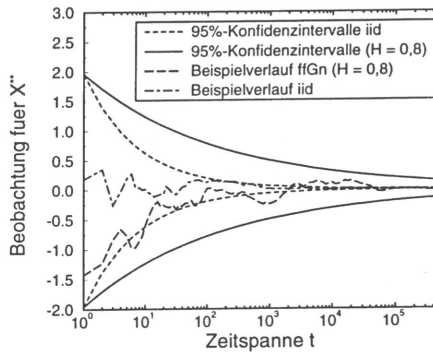


Bild 3.5: Verlauf der Realisierungen der Prozesse $X_f^{**}(t, H)$ ($H = 0,8$, $B = 1,1$ und $Q = 20$) und X_t^{**} eines unkorrelierten $N(0,1)$ -verteilten Prozesses

Kapitel 4

Modellierung VBR-codierter Videodatenströme

Durch die stochastische Modellierung einer Verkehrsquelle sollen deren statistische Eigenschaften so genau wie möglich beschrieben werden. Ein Quellmodell sollte möglichst wenige Parameter besitzen, die in direkter Relation zu einer bestimmten Eigenschaft der Verkehrsquelle stehen. Durch die Variation der Parameter kann dann gezielt der Einfluß dieser Eigenschaft auf das stochastische Verhalten der Quelle und des betrachteten technischen Systems untersucht werden.

Nach einem Überblick über die verschiedenen Möglichkeiten für die Modellierung VBR-codierter Videodatenströme werden im folgenden die wesentlichen statistischen Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme an einem repräsentativen Beispiel beschrieben. Dabei soll unterschieden werden zwischen den durch das MPEG-Codierverfahren hervorgerufenen Eigenschaften und den Eigenschaften des Bildmaterials, die unabhängig vom verwendeten Codierverfahren sind. Aufbauend auf den Erkenntnissen aus der Untersuchung der statistischen Eigenschaften wird ein neues hierarchisches stochastisches Quellmodell entwickelt, das die charakteristischen Eigenschaften der Zell-, Bild- und Szenenebene eines VBR MPEG-codierten Videodatenstroms umfaßt. Dieses Modell bildet die Grundlage für die Leistungsuntersuchung des statistischen Multiplexers in Kapitel 5 und des verteilten Video-On-Demand-Systems in Kapitel 6.

4.1 Überblick über Modellierungsmöglichkeiten für VBR-Videodatenströme

Im Gegensatz zu CBR-codierten Videodatenströmen, bei denen die Bildqualität in Abhängigkeit von der Komplexität der Bilder schwankt, ermöglichen VBR-codierte Ströme eine kon-

stante Bildqualität. Da bei der Übertragung der Daten über ein ATM-Netz zudem ein statistischer Multiplexgewinn erzielt werden kann [107, 217, 278, 279], wurden in der wissenschaftlichen Literatur der letzten Jahre mehrere VBR-Codierverfahren [180, 245], deren Implementierungen (siehe z.B. [259]) und Modellierungsmöglichkeiten für die durch sie erzeugten Videodatenströme vorgestellt. Die statistischen Eigenschaften VBR-codierter Videodatenströme sind vom verwendeten Codierverfahren, den für die Codierung gewählten Parametern, dem Videoinhalt und der gewählten Zeitebene abhängig [24]. Insbesondere unterscheidet sich das Korrelationsverhalten der codierten Bildgrößen von Videokonferenzen und von Spielfilmen.

In [85, 86] wurde zum Beispiel ein Intraframe-Codierungsalgorithmus benutzt, der auf der diskreten Kosinustransformation (DCT) basiert und keine Bewegungsschätzung verwendet. Damit wurde der gesamte Spielfilm „Krieg der Sterne“ codiert und dessen statistische Eigenschaften untersucht. Das Verhalten von Interframe-codierten Videodatenströmen wird in [106] untersucht. In [55, 79, 154, 196, 197, 211] werden verschiedene Videodatenströme verglichen, für deren Erzeugung hybride Inter- und Intraframe-Codierverfahren mit Bewegungsschätzung und Codierverfahren mit Aufspaltung des Frequenzbandes verwendet wurden.

Die veröffentlichten empirischen Videodatenströme, die durch verschiedene Codierverfahren erzeugt wurden, zeigen deshalb ein sehr unterschiedliches Verhalten, das durch verschiedene stochastische Prozesse modelliert werden kann. Eine Übersicht über mehrere Möglichkeiten zur Modellierung von ATM VBR-Videodatenströmen findet sich in [78, 102, 232]. Zwei einfache Quellmodelle für die Modellierung der Bitrate von Videokonferenzdatenströmen werden in [185] vorgestellt. Beim ersten wird ein zeitkontinuierlicher Markoff-Prozeß benutzt, der sich aus der Überlagerung mehrerer On-Off-Quellen mit negativ-exponentiell verteilten Zustandsdauern ergibt. Beim zweiten wird ein autoregressiver Prozeß erster Ordnung (AR(1)) vorgeschlagen, der z. B. auch in [32] für die Untersuchung mehrerer ATM-Bitratenzuteilungsverfahren angewandt wird.

Beide Modelle sind nicht in der Lage, plötzliche Bitratenänderungen nachzubilden, die durch Szenenwechsel in Spielfilmen entstehen. Deshalb wurde in [256] das eindimensionale Markoff-Modell durch verschiedene Aktivitätsniveaus zu einem zweidimensionalen Modell erweitert. Die Überlagerung mehrerer diskreter On-Off-Quellen wird in [177] untersucht und in [38, 121, 220, 257, 296] werden allgemeine diskrete Zustandsprozesse benutzt. In [114] und [184] werden allgemeine Markoff-Prozesse verwendet, die einem diskreten autoregressiven Prozeß erster Ordnung entsprechen (DAR(1)). Dieser Prozeß wird in [60] genommen, um eine effektive Bitrate für Videokonferenzdienste zu bestimmen und mit Simulationen unter Verwendung von realen Videokonferenzdaten zu vergleichen. Schließlich werden in [284, 285, 292] Markoff-modulierte Poisson-Prozesse (*Markov Modulated Poisson Process*, MMPP) für die Modellierung verwendet und in [156] werden Markoff-Prozesse verschiedener Komplexität

verglichen. Möglichkeiten für die Bestimmung der Parameter der MMPP-Modelle finden sich auch in [75, 251].

Der in [185] vorgestellte AR(1)-Prozeß kann für die Modellierung von Videodatenströmen von Spielfilmen erweitert werden. In [233] werden zwei AR(1)-Prozesse verwendet, die zusammen eine bessere Nachbildung der Korrelationseigenschaften der empirischen Daten ermöglichen. Zusätzlich wird für die Modellierung von Szenenwechseln ein Markoff-Prozeß verwendet. Um sowohl die längerfristigen Veränderungen des Datenstroms auf der Szenenebene als auch die Variabilität auf der Bildebene zu erfassen, wird in [293] ein AR(1)-Prozeß mit variablen Parametern eingesetzt, die über einen Markoff-Prozeß bestimmt werden, der das Verhalten auf der Szenenebene modelliert. Um eine exaktere Nachbildung einer vorgegebenen empirischen Verteilungsfunktion zu erreichen, wird in [296] mit einem AR(1)-Prozeß mit einer anschließenden Merkmalstransformation gearbeitet. Ein autoregressiver Moving-Average-Prozeß (*autoregressive moving average*, ARMA) kommt in [101] für die Modellierung eines Videodatenstroms und für die Überlagerung mehrerer Ströme zur Anwendung.

In [144, 145] wird eine Klasse kontinuierlicher stochastischer Prozesse, genannt TES (*Transform-Expand-Sample*), vorgestellt. TES-Prozesse sind nichtlineare autoregressive Prozesse erster Ordnung, die eine Modulo-Operation und eine Merkmalstransformation beinhalten [147]. Mit diesen Prozessen ist es möglich, eine beliebige empirische Verteilungsfunktion nachzubilden. Zudem können durch die geeignete Wahl der verfügbaren Parameter verschiedene Autokorrelationsfunktionen, auch mit abklingend periodischem Verhalten, nachgebildet werden. Ein Nachteil ist, daß die Bestimmung der Parameter, die den Verlauf der Autokorrelationsfunktion festlegen, nur durch heuristisches Durchsuchen des Parameterraums erfolgen kann. Für die Modellierung VBR-codierter Videodatenströme wurden TES-Prozesse beispielsweise in [126, 172, 200, 201, 240] eingesetzt.

Eine Möglichkeit für die direkte Verwendung der empirischen relativen Häufigkeiten der Bildgrößen des zu modellierenden Videodatenstroms für die analytische Behandlung eines statistischen Multiplexers wird in [262, 263] beschrieben. Das Verhalten des Multiplexers wird aus der gewichteten Summe mehrerer M/D/1-N-Modelle bestimmt, deren Ankunftsdaten sich aus der empirischen Verteilungsfunktion des Ankunftsprozesses ergeben.

Für die Modellierung des Verhaltens von codierten Spielfilmen werden in [77, 113, 159, 160] stochastische Modelle vorgeschlagen, die explizit die Verteilung der Szenenlängen eines Films modellieren. Dabei werden für die Verteilungsfunktionen der Szenenlängen Weibull-, Gamma-, Pareto- und geometrische Verteilungen verwendet, die an die jeweiligen empirischen Verteilungen angepaßt werden. Aufeinanderfolgende Szenenlängen werden als unabhängig und identisch verteilt betrachtet.

Alle bisher vorgestellten Modellierungsmöglichkeiten berücksichtigen keine Langzeitkorrelationseffekte. In [117] wird ein Algorithmus für einen ARIMA(0,d,0)-Prozess vorgestellt, der

die Simulation dieses Prozesses auf einer Rechenanlage ermöglicht. Dieser Algorithmus hat jedoch den Nachteil, daß die Rechenzeit für eine Pseudozufallszahlenfolge mit dem Quadrat der Anzahl der Zufallszahlen steigt. Dieser Algorithmus wird in [85, 87] für die Modellierung VBR-codierter Videodaten verwendet. Der Einfluß eines ARIMA(1,d,0)-Eingangsprozesses auf die Warteschlangenlänge einer Bedieneinheit wird in [1] untersucht.

4.2 Statistische Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme

Die Standardisierung des MPEG-Verfahrens hat das Interesse an der Untersuchung der durch dieses Verfahren erzeugten VBR-Videodatenströme erheblich gesteigert. Die statistischen Eigenschaften mehrerer verschiedener kurzer Sequenzen werden in [224] vorgestellt. 15 Videosequenzen mit jeweils etwa 40000 Bildern mit unterschiedlichen Eigenschaften werden in [247] beschrieben. Insbesondere ergibt sich für die verschiedenen untersuchten Spielfilmsequenzen ein Hurst-Parameter H zwischen 0,73 und 0,99. Dies zeigt, daß alle Sequenzen Langzeitkorrelationseigenschaften haben und deren Ausprägung vom Filminhalt abhängt. Ein Vergleich des Hurst-Parameters für den Spielfilm „Krieg der Sterne“ für Videodatenströme, die mit unterschiedlichen Codierverfahren [63, 85, 86] erzeugt wurden, zeigt, daß das Codierverfahren selbst wenig Einfluß auf den Hurst-Parameter hat.

Vier CCIR601-Testvideosequenzen mit insgesamt 2000 Bildern werden in [239] für eine Multiplexeranalyse herangezogen. Die statistischen Eigenschaften einer 23 Minuten langen Spielfilmsequenz werden in [160] untersucht. Es wird gezeigt, daß die Verteilungsfunktionen der Bildgrößen durch Lognormalverteilungen approximiert werden können, wobei ein einfaches Zustandsmodell (ähnlich dem in [62] verwendeten) für Multiplexeruntersuchungen auf der Bildebene benutzt wird. In [115] wird gezeigt, daß sich die Verteilungsfunktionen von MPEG-2-codierten Bildgrößen ebenfalls durch Lognormalverteilungen modellieren lassen. Die Eigenschaften von VBR MPEG-2-codierten Videodatenströmen mit unterschiedlichen GOP-Folgen werden in [97] vorgestellt.

Die CBR- und VBR-Übertragung von MPEG-codierten Videodaten unter Echtzeitbedingungen wird in [152] untersucht, und es werden Adaptionmöglichkeiten des MPEG-Verfahrens vorgeschlagen, um die Ende-zu-Ende-Verzögerung zu verringern und den Multiplexgewinn zu erhöhen. In [221, 222, 223] wird unter Verwendung einer 3 Minuten und 40 Sekunden langen Videosequenz der Einfluß zweier Parameter des MPEG-Codieralgorithmus auf die Bildgrößenstatistik und die Möglichkeiten der Anwendung dynamischer Bitratenreservierungsmechanismen [17] für die VBR-Übertragung der Videodatenströme untersucht. Die Aufspaltung der MPEG-codierten Videodaten durch verschiedene Algorithmen in einen hochprioren

und niederprioren Datenstrom wird in [49] untersucht. Dabei zeigt sich, daß durch die einfache Aufspaltung in nieder- und hochfrequente quantisierte DCT-Koeffizienten bei mittleren Bitraten die subjektiv beste Bildqualität erzielt werden kann.

4.2.1 Statistisches Basismaterial

Für die Entwicklung hinreichend genauer, repräsentativer und aussagekräftiger Quellmodelle ist es notwendig, so viel statistisches Basismaterial wie möglich zu verwenden. Im Rahmen dieser Arbeit werden die Eigenschaften VBR MPEG-codierter Videodatenströme exemplarisch an der in [59] codierten MPEG-1-Sequenz des Spielfilms „Krieg der Sterne“ aufgezeigt.

Auflösung	640 × 480 Pixel
Farbtiefe (RGB)	5 bit, 6 bit, 5 bit
Bildfrequenz	25 Hz
Gesamtzahl Bilder n_{sw}	123574
Anzahl I-Bilder n_I	13731
Anzahl P-Bilder n_P	27461
Anzahl B-Bilder n_B	82382
GOP-Folge	IBBPBBPBB

Tabelle 4.1: Parameter der „Krieg der Sterne“-Sequenz

Die Statistik der Bildsequenz, die Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, n_{sw}\}$, wurde auf der Bildebene des Codierers entnommen und enthält die notwendige Anzahl an Bits, um die aufeinanderfolgenden Bilder zu codieren. Die Parameter der Sequenz, die eine Länge von etwa 82 Minuten hat, zeigt Tabelle 4.1. Diese Sequenz wird für die statistische Beurteilung der einzelnen Bildtypen in drei Teilsequenzen $\{x_{k,b,i}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, n_k\}$, $k \in \{I, P, B\}$ aufgespalten.

Der mittlere Informationsinhalt der codierten Bilder beträgt 0,235 bit/Pixel. Dies ergibt eine mittlere Bitrate von etwa 1,8 Mbit/s. Die wichtigsten statistischen Kennwerte der codierten Videobilder sind für alle Bilder und getrennt nach den drei Bildtypen in Tabelle 4.2 zusammengefaßt. Die Mittelwerte und Varianzen der verschiedenen Bildtypen werden später als Parameter für das VBR MPEG-Quellmodell benötigt, das in Unterkapitel 4.3 vorgestellt werden wird.

Erwartungsgemäß sind die I-Bilder im Mittel größer als die P-Bilder, die wiederum größer als die B-Bilder sind, da die Intraframe-codierten I-Bilder den Inhalt eines kompletten Bildes enthalten, die P- und B- Bilder aber durch die Bewegungsschätzung den codierten Inhalt anderer Bilder mitbenutzen. Auch die Schwankungen des Informationsgehalts der Bilder

Stichprobe	$\{x_{sw,b,i}\}$	$\{x_{I,b,i}\}$	$\{x_{P,b,i}\}$	$\{x_{B,b,i}\}$
Bildtyp	Alle	I	P	B
Minimum	$\frac{x_{sw,b,min}}{\text{bit}} = 2720$	$\frac{x_{I,b,min}}{\text{bit}} = 44520$	$\frac{x_{P,b,min}}{\text{bit}} = 2720$	$\frac{x_{B,b,min}}{\text{bit}} = 44520$
Maximum	$\frac{x_{sw,b,max}}{\text{bit}} = 394920$	$\frac{x_{I,b,max}}{\text{bit}} = 387656$	$\frac{x_{P,b,max}}{\text{bit}} = 394920$	$\frac{x_{B,b,max}}{\text{bit}} = 144048$
Mittelwert	$\frac{\hat{x}_{sw,b}}{\text{bit}} = 7,25 \cdot 10^4$	$\frac{\hat{x}_{I,b}}{\text{bit}} = 1,82 \cdot 10^5$	$\frac{\hat{x}_{P,b}}{\text{bit}} = 1,03 \cdot 10^5$	$\frac{\hat{x}_{B,b}}{\text{bit}} = 4,41 \cdot 10^4$
Varianz	$\frac{\hat{\sigma}_{sw,b}^2}{\text{bit}^2} = 2,69 \cdot 10^9$	$\frac{\hat{\sigma}_{I,b}^2}{\text{bit}^2} = 1,93 \cdot 10^9$	$\frac{\hat{\sigma}_{P,b}^2}{\text{bit}^2} = 1,19 \cdot 10^9$	$\frac{\hat{\sigma}_{B,b}^2}{\text{bit}^2} = 1,99 \cdot 10^8$

Tabelle 4.2: Statistische Kennwerte der Stichproben $\{x_{sw,b,i}\}$, $\{x_{I,b,i}\}$, $\{x_{P,b,i}\}$ und $\{x_{B,b,i}\}$

wirken sich auf die Größe der I-Bilder am stärksten aus, so daß deren Verteilung die größte Varianz aufweist.

Die Abbildungen 4.1 und 4.2 zeigen jeweils einen Teil der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ in unterschiedlichem Zeitmaßstab. In Abbildung 4.1 erkennt man deutlich die Schwankung der Bildgrößen entsprechend der GOP-Folge aus Tabelle 4.1, und die erkennbaren drei Niveaus der Bildgrößen können einfach dem entsprechenden Bildtyp zugeordnet werden.

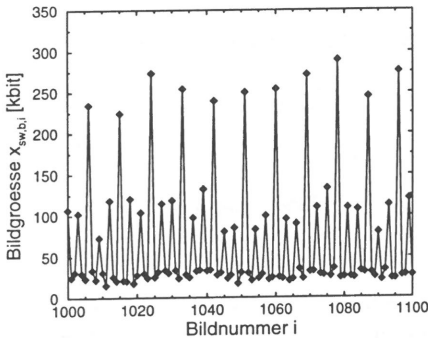


Bild 4.1: Bildgrößen-Sequenz („Krieg der Sterne“, kleiner Zeitmaßstab)

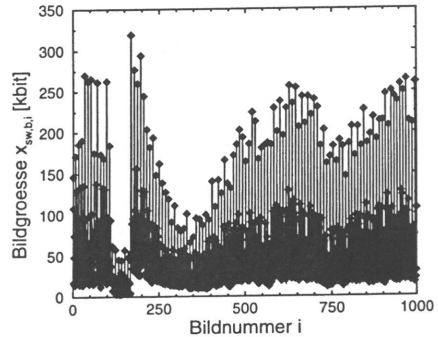


Bild 4.2: Bildgrößen-Sequenz („Krieg der Sterne“, großer Zeitmaßstab)

Wählt man einen um den Faktor 10 größeren Zeitmaßstab (Abbildung 4.2), erkennt man, daß auch die Niveaus der Bildgrößen starken längerfristigen Schwankungen unterliegen, die durch die Komplexität des Bildaufbaus in verschiedenen Szenen und Bewegungen von Objekten oder der Kamera hervorgerufen werden. Hier wird bereits eine zeitliche Trennung der Einflüsse der Art des Bildmaterials und des Codieralgorithmus deutlich. Diese Trennung wird sich im Quellmodell in der Modellierung der Szenen- und Bildebene widerspiegeln.

4.2.2 Verteilungen

Die empirische Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}_{sw,b}(x)$ der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ der Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ zeigt Abbildung 4.3. Sie ist gekennzeichnet durch zwei Bereiche: Etwa 78% der codierten Bilder sind kleiner als 100 kbit. Dies sind hauptsächlich die B-Bilder, die in der verwendeten GOP-Folge einen Anteil von 66,6% haben. Die restlichen etwa 22% der Bilder (überwiegend P- und I-Bilder) können eine Größe von bis zu annähernd 400 kbit erreichen.

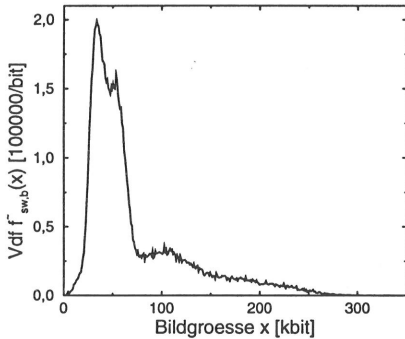


Bild 4.3: Empirische Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}_{sw,b}(x)$ der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen

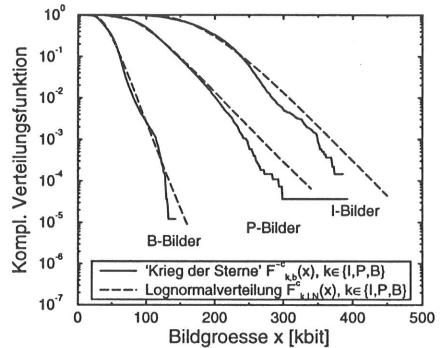


Bild 4.4: Vergleich der komplementären Verteilungsfunktionen der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen mit logarithmischen Normalverteilungen

Die empirische Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}_{sw,b}(x)$ aller Bilder läßt sich nur unzureichend durch eine theoretische Verteilungsdichtefunktion approximieren. Wesentlich günstiger ist die Approximation der Verteilungsdichten der einzelnen Bildtypen $\tilde{f}_{k,b}(x)$, $k \in \{I, P, B\}$. Abbildung 4.4 zeigt einen Vergleich zwischen den empirischen komplementären Verteilungsfunktionen $\tilde{F}_{k,b}^c(x)$ der empirischen I-, P- und B-Bildgrößen und den komplementären Verteilungsfunktionen $F_{k,LN}^c(x)$ von Lognormalverteilungen mit denselben Mittelwerten und Varianzen.

Der Vergleich zeigt, daß die Verteilung der Größen der B-Bilder sich sehr gut durch eine Lognormalverteilung beschreiben läßt. Für die P- und I-Bilder wird die Wahrscheinlichkeit für sehr große Bilder durch die Lognormalverteilungen etwas überschätzt. Man muß jedoch bedenken, daß bei diesen Bildtypen die empirischen Stichproben einen erheblich geringeren Umfang haben. Insgesamt können die Verteilungen der Bildtypen des verwendeten Bildmaterials hinreichend genau durch logarithmische Normalverteilungen modelliert werden, und die Ergebnisse sind in Übereinstimmung mit der weiter oben zitierten Literatur. Eine detail-

liertere Betrachtung der Güte der Anpassung der Lognormalverteilungen mit Hilfe von PP- und QQ-Plots findet sich im Anhang B.

4.2.3 Autokorrelation

Neben der Verteilung ist die Autokorrelation das wichtigste Charakteristikum des Verhaltens eines stochastischen Prozesses. Den empirischen Autokorrelationskoeffizienten $\hat{r}_{sw,b,k}$ der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ (Autokorrelationskoeffizient der Bildebene) zeigt Abbildung 4.5. Dessen Verhalten ist gekennzeichnet durch eine periodische und eine langsam abfallende Komponente. Im periodischen Verhalten ist die verwendete GOP-Folge und damit klar der spezielle Einfluß des MPEG-Codierverfahrens auf die Korrelationsstruktur der Größen der codierten Bilder zu erkennen [104].

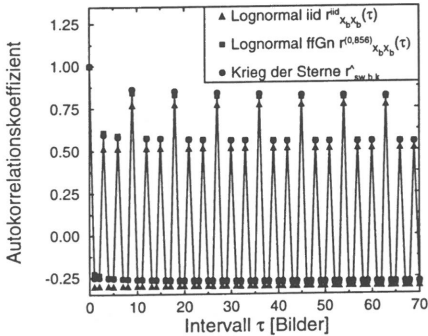


Bild 4.5: Vergleich der Autokorrelationskoeffizienten der Bildebene

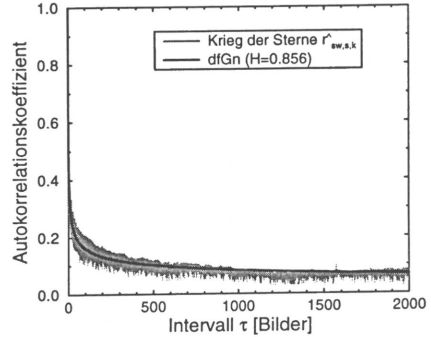


Bild 4.6: Vergleich der Autokorrelationskoeffizienten der Szenenebene

Um den Einfluß des MPEG-Algorithmus von den Eigenschaften des Bildmaterials zu trennen, werden die Beobachtungen der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ durch die Transformation

$$x_{sw,s,i} = \frac{\ln x_{sw,b,i} - \ln \hat{x}_{k,b} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\hat{\sigma}_{k,b}^2}{\hat{x}_{k,b}^2} \right)}{\sqrt{\ln \left(1 + \frac{\hat{\sigma}_{k,b}^2}{\hat{x}_{k,b}^2} \right)}} \quad (4.1)$$

auf die Stichprobe $\{x_{sw,s,i}\}$ (Stichprobe auf der Szenenebene) abgebildet. Dabei ist $k = I, P$ oder B zu wählen, wenn $x_{sw,b,i}$ die Größe eines I-, P- oder B-Bildes ist. Mit dieser Transformation wird zweierlei erreicht: Durch die Logarithmusoperationen werden die annähernd lognormalverteilten Teilstichproben $\{x_{k,b,i}\}$, $k \in \{I, P, B\}$ in normalverteilte Stichproben transformiert. Zusätzlich wird jede Beobachtung durch den Erwartungswert und die Varianz

der Teilstichprobe, zu der sie gehört, skaliert. Die Stichprobe $\{x_{sw,s,i}\}$ ist damit näherungsweise $N(0,1)$ -verteilt und sollte nicht mehr das periodische Verhalten der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ aufweisen, das durch die verschiedenen Bildtypen des MPEG-Codierverfahrens verursacht wird.

Den Autokorrelationskoeffizienten $\hat{r}_{sw,s,k}$ der Stichprobe $\{x_{sw,s,i}\}$ zeigt Abbildung 4.6. Der Vergleich mit Abbildung 4.5 zeigt, daß das periodische Verhalten nahezu verschwunden ist (die Höhe des grauen Bereiches resultiert aus den verbleibenden periodischen Schwankungen). Diese Autokorrelationsfunktion ist ein Maß für die Langzeitschwankungen der Komplexität der Bildinhalte auf der Szenenebene bei weitgehendem Ausschluß der Einflüsse durch das Codierverfahren (vgl. z. B. [87]). Dabei ist gut zu erkennen, daß auch Bilder, die eine große Zeitspanne τ voneinander entfernt sind, eine nicht vernachlässigbare Korrelation der Bildgrößen aufweisen.

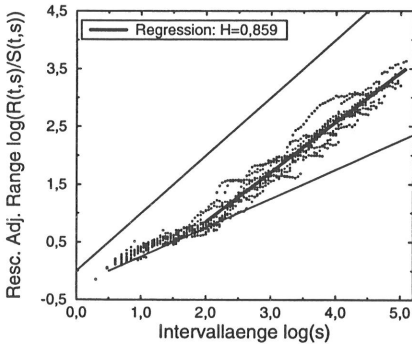


Bild 4.7: R/S -Analyse der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ auf Bildebene

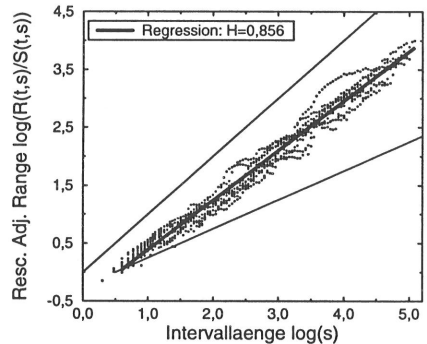


Bild 4.8: R/S -Analyse der Stichprobe $\{x_{sw,s,i}\}$ auf Szenenebene

Für die Untersuchung der Langzeitkorrelationseigenschaften der Stichproben $\{x_{sw,b,i}\}$ und $\{x_{sw,s,i}\}$ werden R/S -Analysen verwendet, deren Pox -Plots in den Abbildungen 4.7 und 4.8 dargestellt sind. Die R/S -Analyse auf Bildebene zeigt einen Transienten für Intervallängen bis etwa $s = 100$ Bilder. In diesem Bereich ist keine LRD-Eigenschaft zu erkennen. Die Länge des Transienten entspricht dabei in etwa der mittleren Szenenlänge des Bildmaterials von ca. 4 Sekunden [61]. Wird die Intervalllänge größer als die mittlere Szenenlänge gewählt, dann zeigt sich deutlich das Langzeitkorrelationsverhalten der Stichprobe. Die Regressionsgerade für $s \geq 2,0$ hat als Steigung den Hurst-Parameter $H = 0,859$.

Bei der R/S -Analyse der Stichprobe $\{x_{sw,s,i}\}$ ist kein Transient zu erkennen. Das heißt, auf Szenenebene zeigen die „Krieg der Sterne“-Daten ein homogenes Langzeitkorrelationsverhalten, das auf der Bildebene durch das periodische Verwenden verschiedener Bildtypen

unterdrückt wird. Die nichtlineare Transformation hat nur einen unwesentlichen Einfluß auf die R/S -Intensität (den Hurst-Parameter H) der beiden Stichproben (vgl. [195]).

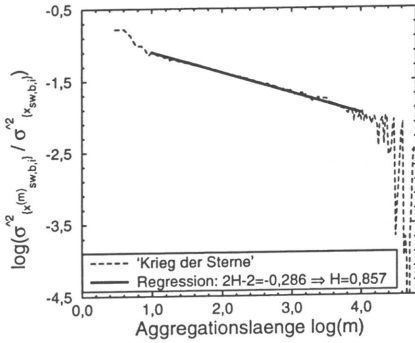


Bild 4.9: Varianz-Zeit-Graph der „Krieg der Sterne“-Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$

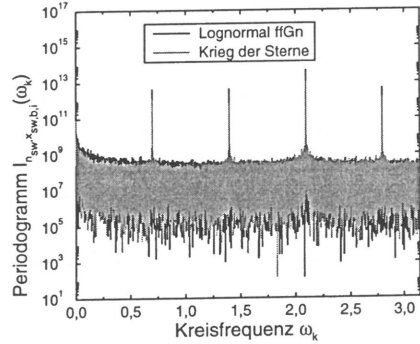


Bild 4.10: Periodogramm-Analyse der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$

Der Varianz-Zeit-Graph der Stichprobe $\{x_{sw,b,i}\}$ der „Krieg der Sterne“-Daten ist in Abbildung 4.9 dargestellt. Die Regressionsgerade wurde für die Aggregationslängen $1 \leq m \leq 4$ ermittelt. Der Hurst-Parameter $H = 0,857$, der sich aus der Steigung der Regressionsgeraden ergibt, stimmt sehr gut mit den Schätzwerten der R/S -Analysen überein. Auch die Periodogramm-Analyse (Abbildung 4.10) zeigt deutlich die Einflüsse der LRD-Eigenschaft des Bildmaterials durch einen starken Anstieg des Periodogramms $I_{n_{sw,x_{sw,b,i}}}(\omega_k)$ für $\omega_k \rightarrow 0$. Der periodische Einfluß des MPEG-Codierverfahrens zeigt sich in den vier ausgezeichneten Periodenlängen von 2,25, 3,00, 4,50 und 9,00 Bildern, die die Basis für die periodische Struktur der Stichprobe bilden [63].

4.3 Hierarchisches Modell einer VBR MPEG-Videoquelle

Die Untersuchungen der statistischen Eigenschaften der VBR MPEG-codierten Bildgrößen des Spielfilms „Krieg der Sterne“ in Unterkapitel 4.2 zeigen, daß es für die Beschreibung

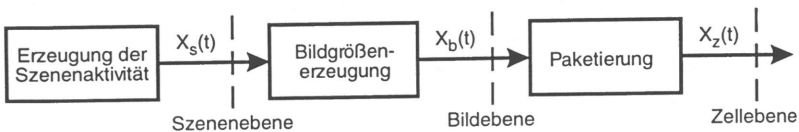


Bild 4.11: Hierarchisches MPEG-Quellmodell

der verschiedenen Einflüsse günstig ist, ein zweistufiges Modell zu verwenden, das die Bild- und Szenenebene getrennt modelliert. Für ein ATM-Quellmodell muß zusätzlich die Paketierung der codierten Bilder in ATM-Zellen berücksichtigt werden. Damit erhält man das in Abbildung 4.11 dargestellte dreistufige hierarchische ATM-Quellmodell.

Die stochastischen Prozesse $X_s(t)$, $X_b(t)$ und $X_z(t)$ beschreiben das Verhalten des Modells auf der Szenen-, Bild- und Zellebene. Die diskrete Variable $t \in \mathbb{N}$ gibt die Nummer des Videobildes an. $X_s(t)$ beschreibt in abstrakter Weise das Aktivitätsniveau der aufeinanderfolgenden Bilder. Aus dem Aktivitätsniveau eines Bildes wird durch eine Transformation die tatsächliche Größe der Bilder $X_b(t)$ bestimmt. Die Datenmenge eines Bildes wird schließlich in ATM-Zellen paketierte. $X_z(t)$ gibt dabei den Zellzwischenankunftsabstand für die Zellen des Bildes mit der Nummer t an. Die Modellierung der drei Ebenen wird in den folgenden Abschnitten vorgestellt.

4.3.1 Modellierung der Zellebene

Das Modell der Zellebene beschreibt den Paketierungsprozeß, der die aufeinanderfolgenden codierten Bilder in einen Strom von ATM-Zellen umwandelt. Die Art und Weise, in der die Zellen gesendet werden, beeinflusst den Büschelfaktor des Zellstroms. Dabei kann durch Glättungsalgorithmen (*smoothing algorithms*) eine für das ATM-Netz günstigere zeitliche Abfolge der Sendezeitpunkte der aufeinanderfolgenden Zellen erzielt werden [37, 52]. Bei einer Bildfrequenz von $f_b = 25$ Hz steht für die Übertragung eines Bildes die Zeit $\Delta T = 1/f_b = 40$ ms zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei verschiedene Paketierungsmodi unterschieden:

1. Deterministischer Modus
2. Blockmodus

Beim deterministischen Modus wird angenommen, daß die Zellen eines Bildes gleichmäßig verteilt über die gesamte Bildarstellungsdauer ΔT ausgespielt werden. Dadurch ist der Zellzwischenankunftsabstand $X_z(t)$ innerhalb eines Bildes konstant (deterministischer Zellzwischenankunftsabstand), und der Zellstrom wird innerhalb der Darstellungsdauer ΔT der Bilder optimal geglättet [258]. Durch die Verwendung verschiedener Bildtypen bietet sich für MPEG-codierte Videodatenströme auch die Glättung des Zellstroms über mehrere Bilder an, um eine stärkere Reduktion der Varianz des ATM-Verkehrstroms zu erreichen [96, 166], was hier nicht weiter betrachtet werden soll. Die mittlere Bitrate $R_z(t)$ und der Zellzwischenankunftsabstand $X_z(t)$ des Zellstroms innerhalb des Bildes t ergeben sich aus der Größe des Bildes $X_b(t)$, der Nutzlast L_{NL} , der Größe $L_Z = 424$ bit einer ATM-Zelle und der Bilddauer ΔT für $t \in \mathbb{N}$ durch

$$R_z(t) = \frac{\left\lceil \frac{X_b(t)}{L_{NL}} \right\rceil \cdot L_Z}{\Delta T} \quad \text{und} \quad X_z(t) = \frac{L_Z}{R_z(t)} = \frac{\Delta T}{\left\lceil \frac{X_b(t)}{L_{NL}} \right\rceil}. \quad (4.2)$$

Im Blockmodus werden zu Beginn der Zeitspannen ΔT die ATM-Zellen mit einer festgelegten Blockbitrate $R_{z,on} > 0$ ausgespielt. Sind alle Daten des Bildes übertragen, wird bis zum Beginn der Übertragung des nächsten Bildes gewartet ($R_{z,off} = 0$). Der Zwischenankunftsabstand der Zellen während der On-Phase $X_{z,on}(t)$ ergibt sich direkt aus der vorgegebenen Bitrate zu $X_{z,on}(t) = L_Z/R_{z,on}$. Über die Anzahl der Zellen $[X_b(t)/L_{NL}]$, die für die Übertragung des Bildes t benötigt werden, erhält man die Dauern der On- und Off-Phasen zu

$$T_{on}(t) = \left\lceil \frac{X_b(t)}{L_{NL}} \right\rceil X_{z,on}(t) \quad \text{und} \quad T_{off}(t) = \Delta T - T_{on}(t). \quad (4.3)$$

Der Zwischenankunftsabstand $X_{z,off}(t)$ zwischen der letzten Zelle des Bildes t und der ersten des Bildes $t+1$ entspricht der Dauer $T_{off}(t)$. Ist das zu übertragende Bild größer als $R_{z,on} \cdot \Delta T$, kann es mit der festgelegten Bitrate nicht innerhalb einer Bilddauer übertragen werden. In diesem Fall werden $R_{z,on} = R_z(t)$ und $X_z(t)$ nach Gleichung 4.2 gewählt.

4.3.2 Modellierung der Bildebene

Die Untersuchungen in Abschnitt 4.2.2 haben gezeigt, daß sich die Verteilungsfunktionen der Bildtypen durch logarithmische Normalverteilungen modellieren lassen. Die Autokorrelationsfunktion der Bildgrößen wird nach Abschnitt 4.2.3 hauptsächlich durch die gewählte GOP-Folge bestimmt. Daher wird für die Bildebene ein einfaches Zustandsmodell gewählt, dessen Zustand durch die GOP-Folge gegeben ist, und als Verteilung für die Bildtypen Lognormalverteilungen verwendet. Eine schematische Darstellung des Modells zeigt Abbildung 4.12.

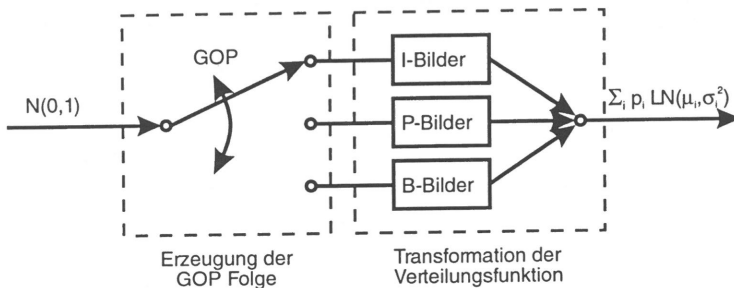


Bild 4.12: Modell für die Bildgrößengenerierung

Wie in Abschnitt 3.1.2 gezeigt, kann eine Lognormalverteilung $LN(\mu, \sigma^2)$ durch eine Transformation aus einer Normalverteilung $N(\mu, \sigma^2)$ abgeleitet werden. Daher können die Verteilungen der verschiedenen Bildgrößen alle aus einem gemeinsamen standardnormalverteilten

stochastischen Prozeß $X_s(t)$ durch

$$X_{b,k}(t) = \exp \left[\sqrt{\ln \left(1 + \frac{\text{VAR}[X_{b,k}]}{\text{E}[X_{b,k}]^2} \right)} X_S(t) + \ln \text{E}[X_{b,k}] - \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\text{VAR}[X_{b,k}]}{\text{E}[X_{b,k}]^2} \right) \right] \quad (4.4)$$

abgeleitet werden, wobei $X_{b,k}$, $k \in \{I, P, B\}$ die Folgen der Zufallsvariablen für die I-, P- und B-Bildgrößen sind und $\text{E}[X_{b,k}]$ und $\text{VAR}[X_{b,k}]$ deren Mittelwerte und Varianzen (vgl. Gleichung 4.1 für die Rücktransformation der empirischen Beobachtungen). Für die Parametrisierung des Modells auf der Bildebene werden somit sechs statistische Kenngrößen benötigt. Für ein Bild zur Zeit t wird $k \in \{I, P, B\}$ entsprechend der GOP-Folge periodisch gewählt. Die Verteilungsdichtefunktion des stochastischen Prozesses $X_b(t)$ ergibt sich aus den Verteilungsdichtefunktionen $f_{X_{b,k}}(x)$, $k \in \{I, P, B\}$ der drei Bildtypen durch

$$f_{X_b}(x) = \sum_{k \in \{I, P, B\}} p_k f_{X_{b,k}}(x), \quad (4.5)$$

wobei p_k die Wahrscheinlichkeit ist, innerhalb der GOP-Folge ein Bild des Typs k vorzufinden. Der Erwartungswert $\text{E}[X_b]$ und die Varianz $\text{VAR}[X_b]$ der Größe aller Bilder errechnet sich aus den Erwartungswerten $\text{E}[X_{b,k}]$ und Varianzen $\text{VAR}[X_{b,k}]$ der Prozesse der drei Bildtypen durch

$$\text{E}[X_b] = \sum_{k \in \{I, P, B\}} p_k \text{E}[X_{b,k}] \quad \text{und} \quad (4.6)$$

$$\text{VAR}[X_b] = \sum_{k \in \{I, P, B\}} \left[p_k \left(\text{VAR}[X_{b,k}] + \text{E}[X_{b,k}]^2 \right) \right] - \left[\sum_{k \in \{I, P, B\}} p_k \text{E}[X_{b,k}] \right]^2. \quad (4.7)$$

Wird als Eingangsprozeß eine Folge unabhängiger gleichverteilter Zufallsvariablen (iid-Prozeß) verwendet, ist die Autokorrelationsfunktion $r_{X_b X_b}^{\text{iid}}(\tau)$ der Bildgrößen $X_b(t)$ nur von der gewählten GOP-Folge abhängig. Sie ist daher periodisch mit Periode N_{MPEG} für $\tau > 0$ und berechnet sich aus

$$r_{X_b X_b}^{\text{iid}}(\tau) = \frac{1}{\text{VAR}[X_b]} \left[\sum_{i,j \in \{I, P, B\}} [\text{E}[X_{b,i}] \text{E}[X_{b,j}] p_{ij}^{(\tau)}] - \text{E}[X_b]^2 \right], \quad (4.8)$$

wobei $p_{ij}^{(\tau)}$ die Wahrscheinlichkeit ist, daß ein Bild des Typs i in der Distanz von τ Bildern ein Bild des Typs j als Nachfolger hat. Für die Parameter $N_{\text{MPEG}} = 9$ und $M_{\text{MPEG}} = 3$ der GOP-Folge der Beispielsequenz des Spielfilms „Krieg der Sterne“ erhält man $r_{X_b X_b}^{\text{iid}}(0) = 1$ und

$$r_{X_b X_b}^{\text{iid}}(\tau) = \frac{1}{\text{VAR}[X_b]} \left[\left\{ \begin{array}{l} \frac{2}{9} \text{E}[X_{b,I}] \text{E}[X_{b,B}] + \frac{4}{9} \text{E}[X_{b,P}] \text{E}[X_{b,B}] + \frac{1}{3} \text{E}[X_{b,B}]^2 \\ \frac{2}{9} \text{E}[X_{b,I}] \text{E}[X_{b,P}] + \frac{1}{9} \text{E}[X_{b,P}]^2 + \frac{2}{3} \text{E}[X_{b,B}]^2 \\ \frac{1}{9} \text{E}[X_{b,I}]^2 + \frac{2}{9} \text{E}[X_{b,P}]^2 + \frac{2}{3} \text{E}[X_{b,B}]^2 \end{array} \right\} - \text{E}[X_b]^2 \right]$$

$$\text{für } \tau = \begin{cases} 1, 2, 4, 5, 7, 8, \dots \\ 3, 6, 12, 15, 21, \dots \\ 9, 18, 27, \dots \end{cases} \quad (4.9)$$

Nimmt man für die Mittelwerte und Varianzen die Schätzwerte aus Tabelle 4.2, erhält man für $r_{X_b, X_b}^{iid}(\tau)$ die Werte in Tabelle 4.3. Ein Vergleich der empirischen Autokorrelationsfunktion $\hat{r}_{sw,b,k}$ mit der Autokorrelationsfunktion $r_{X_b, X_b}^{iid}(\tau)$ (siehe Abbildung 4.5) ohne Berücksichtigung der Szenenebene zeigt, daß das periodische Verhalten der empirischen Bildgrößen sehr gut nachgebildet wird, aber die zusätzlich vorhandene asymptotisch abfallende Komponente unberücksichtigt bleibt.

Intervall τ	Autokorrelationskoeffizient $r_{X_b, X_b}^{iid}(\tau)$
0	1
1, 2, 4, 5, 7, 8, ...	-0,29
3, 6, 12, 15, 21, ...	0,48
9, 18, 27, ...	0,78

Tabelle 4.3: Autokorrelationskoeffizienten $r_{X_b, X_b}^{iid}(\tau)$ der Bildebene mit iid Prozeß auf Szenenebene

4.3.3 Modellierung der Szenenebene

Durch die zusätzliche Modellierung der Szenenebene ist es möglich, das Korrelationsverhalten der VBR MPEG-Videoquelle realistischer nachzubilden. Wie schon in den Abbildungen 4.7 und 4.8 dargestellt, zeigen die Bildgrößen VBR-codierter Videodaten ein fraktales Verhalten, das durch den Hurst-Parameter H beschrieben werden kann. Die Autokorrelationsfunktion der auf Szenenebene transformierten empirischen Bildgrößen läßt sich über einen weiten Bereich sehr gut durch die Autokorrelationsfunktion eines dfGn-Prozesses approximieren (siehe Abbildung 4.6). Dies legt nahe, als stochastischen Prozeß $X_s(t)$ für die Beschreibung der Szenenebene einen ffGn-Prozeß zu verwenden. Eine grafische Veranschaulichung des in Abschnitt 3.3.4.2 vorgestellten Näherungsprozesses des dfGn-Prozesses zeigt Abbildung 4.13. Dieser kann durch den Hurst-Parameter H an die Korrelationseigenschaften des zu modellierenden Bildmaterials angepaßt werden, d. h. er benötigt (neben den Güteparametern B und Q) nur einen Parameter.

Da der ffGn-Prozeß $N(0,1)$ -verteilt ist, kann dieser direkt für die Berechnung von $X_s(t)$ verwendet werden und die Eingangsvariable für das Modell der Bildebene zur Verfügung stellen. Die Verbesserung der Modellierung des Korrelationsverhaltens zeigt der Vergleich in Abbildung 4.5 für die Bildebene. Die Autokorrelationsfunktion $r_{X_b, X_b}^{(0,856)}(\tau)$ bildet durch die Verwendung eines ffGn-Prozesses mit Hurst-Parameter $H = 0,856$ auf der Szenenebene die empirische Autokorrelationsfunktion $\hat{r}_{sw,b,k}$ wesentlich besser nach als die Autokorrelationsfunktion $r_{X_b, X_b}^{iid}(\tau)$ ohne Verwendung eines speziellen Modells für die Szenenebene (siehe Abbildung 4.5). Durch die zusätzliche Modellierung des Verhaltens auf der Szenenebene

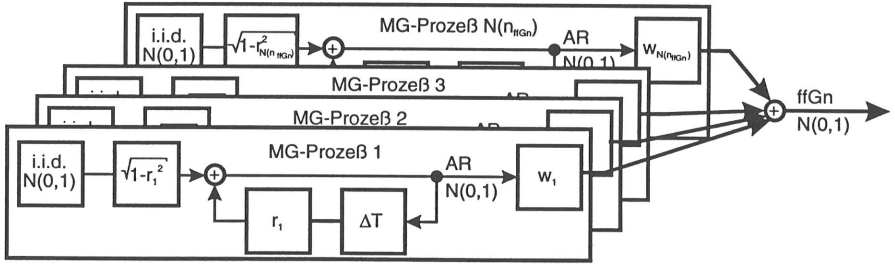


Bild 4.13: Modell für die Generierung des Szenenaktivitätsniveaus

wird auch die asymptotisch abfallende Komponente der empirischen Autokorrelationsfunktion berücksichtigt, da Bilder, die nur eine geringe Zeitspanne voneinander entfernt sind, durch den ffGn-Prozess eine größere Korrelation besitzen als Bilder, die weit voneinander entfernt sind. Dieses Verhalten überträgt sich auch auf das Verhalten auf der Bildebene.

Kapitel 5

Leistungsuntersuchung eines statistischen ATM-Multiplexers

In Kapitel 4 wurde eine Möglichkeit für die hierarchische stochastische Modellierung der charakteristischen Eigenschaften der Zell-, Bild- und Szenenebene eines VBR MPEG-codierten Videodatenstroms vorgestellt. Dieses Modell soll nun dazu verwendet werden, Vorhersagen über das Verhalten eines statistischen ATM-Multiplexers zu machen, der von mehreren MPEG-Videoquellen gespeist wird. Dazu wird zuerst das Modell eines idealisierten ATM-Multiplexers vorgestellt. Zur Validierung des entwickelten stochastischen Quellmodells wird die Zellverlustwahrscheinlichkeit eines solchen Multiplexers herangezogen. Schließlich wird gezeigt, wie die Zellverluste eines Multiplexers durch die Wahl der Parameter der Quellen auf der Zell-, Bild und Szenenebene beeinflußt werden.

Im folgenden wird davon ausgegangen, daß die $L_Z = 53$ byte großen ATM-Zellen eine mittlere Videonutzlast von $L_{NL} = 47$ byte befördern. Werden keine anderslautenden Angaben gemacht, wird der deterministische Paketierungsmodus für die Zellebene verwendet, und die Startzeitpunkte der Videodatenströme werden zufällig gewählt (vgl. Abschnitt 5.3.2). Bei der Verwendung von Quellmodellen beinhalten alle Simulationsergebnisse 95%-Konfidenzintervalle, die auf den Ergebnissen von 10 sehr langen Teiltests beruhen. Da durch die LRD-Eigenschaft der Videodaten die Teiltests nicht als unabhängig betrachtet werden können, wurden sie so lang gewählt, daß die verbleibende Korrelation sehr gering ist. Aus diesem Grund können die Konfidenzintervalle zwar nicht als mathematisch exakt gelten, geben aber dennoch Aufschluß über die Genauigkeit der Ergebnisse. Da durch die begrenzte Länge der Stichprobe $\{x_{s,w,b,i}\}$ der „Krieg der Sterne“-Bildgrößen für geringe Verlustwahrscheinlichkeiten keine aussagekräftigen Konfidenzintervalle zu erzielen sind, wird für die empirischen Daten ein Korridor angegeben, der aus der Kurve mit den Originaldaten sowie zwei Kurven mit 99 % und 101 % der Originalbildgrößen besteht.

5.1 Modell eines statistischen ATM-Multiplexers

Ein ATM-Multiplexer ist ein Netzelement mit einem Ausgang, das den Verkehr mehrerer Eingänge konzentriert. Abbildung 5.1 zeigt das Modell eines ATM-Multiplexers, der durch N_{Mux} Quellen gespeist wird. Die Zellströme der Quellen sind völlig asynchron, das heißt am Multiplexer können Zellen zu beliebigen Zeitpunkten ankommen und sind nicht an einen Systemtakt gebunden. Der Multiplexer selbst wird durch ein Warteverlustsystem modelliert. Die Bediendauer D ist deterministisch und entspricht der Zeit, die für das Senden einer Zelle benötigt wird. Sie ergibt sich aus der Linkbitrate R_L durch

$$D = \frac{Lz}{R_L}. \quad (5.1)$$

Für die Speicherung der asynchron ankommenden Zellen steht eine endliche Warteschlange für maximal S Zellen zur Verfügung. Ist die Warteschlange bei der Ankunft einer Zelle bereits mit S Zellen besetzt, wird die ankommende Zelle verworfen. Die mittlere Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z ergibt sich aus dem Verhältnis der verworfenen Zellen zu der Gesamtzahl der ankommenden Zellen in einem bestimmten Zeitintervall. Die ankommenden Zellen werden nach dem FIFO-Prinzip bearbeitet, da im ATM-Netz die Reihenfolge der Zellen garantiert werden muß. Als Angebot A des Multiplexers bezeichnet man das Verhältnis der Summe der Bitrate aller Videostreams zur Linkbitrate des Multiplexers und es gilt

$$A = \frac{\sum_{i=1}^{N_{Mux}} R_{z,i}}{R_L} = \frac{D}{\overline{T_{A,z}}}, \quad (5.2)$$

wobei $\overline{T_{A,z}}$ der mittlere Zwischenankunftsabstand des Gesamtzellstroms aller Videoquellen ist.

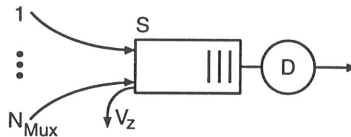


Bild 5.1: Modell eines ATM-Multiplexers

5.2 Validierung des hierarchischen Quellmodells

In diesem Unterkapitel soll gezeigt werden, daß das im Kapitel 4 vorgestellte ATM VBR MPEG-Videoquellmodell in der Lage ist, über die beschriebenen Zeitebenen die wesentlichen Merkmale der empirischen Daten nachzubilden. Dazu sollen die Zellverluste des in

Unterkapitel 5.1 beschriebenen Multiplexermodells betrachtet werden. Der Multiplexer wird einerseits durch die paketierte empirische Videodaten des Spielfilms „Krieg der Sterne“ gespeist und andererseits durch Quellmodelle, die das Verhalten der empirischen Zellströme nachbilden. Die Übereinstimmung der Ergebnisse dient als Gütekriterium für die Genauigkeit, mit der das Quellmodell das Verhalten der empirischen Datenströme nachbilden kann.

Die Verwendung des ffGn-Prozesses für die Szenenebene steigert im Vergleich zur Verwendung unabhängiger Zufallsvariablen die Komplexität und damit auch die zur Simulation der Quellmodelle notwendige Rechenzeit erheblich. Daher wird vergleichend auch die Leistungsfähigkeit eines vereinfachten Modells mit einer Folge unabhängiger Zufallsvariablen für die Szenenebene betrachtet. Die Zellverluste, die bei der Verwendung der Quellmodelle auftreten, werden mit denen verglichen, die sich bei der Verwendung der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen ergeben. Auf der Zellebene wird der deterministische Modus verwendet. Die Startzeitpunkte der Videodatenströme werden zufällig gewählt. Als Parameter für die Modellierung der Bildebene werden die in Tabelle 4.1 angegebenen Mittelwerte $\hat{x}_{k,b}$ und Varianzen $\hat{\sigma}_{k,b}^2$ der drei Bildtypen mit $k \in \{I, P, B\}$ verwendet. Für die Güteparameter des ffGn-Prozesses wird $B = 1,1$ und $Q = 20$ gewählt. Der Hurst-Parameter wird nach Abbildung 4.8 auf $H = 0,856$ eingestellt.

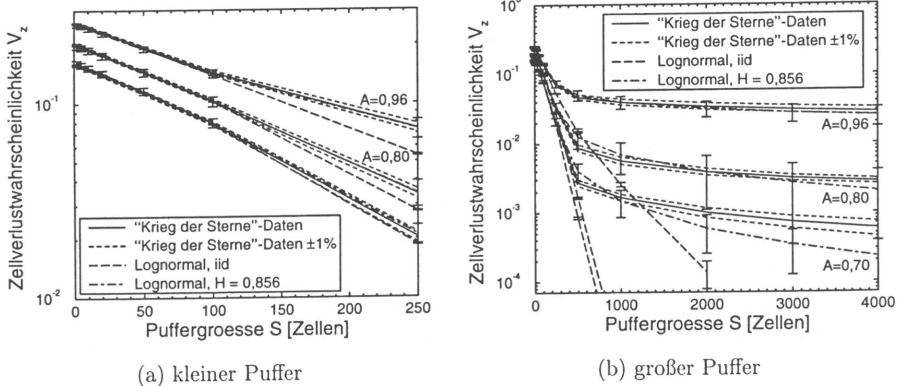


Bild 5.2: Einfluß der Puffergröße S einer Bedieneinheit mit konstanter Bediendauer D auf die Zellverluste V_z einer VBR MPEG-Quelle

Abbildung 5.2 zeigt die Verlustwahrscheinlichkeit V_z eines Multiplexers, der nur von einer Quelle gespeist wird, aufgetragen über der Puffergröße S . Die Bediendauer D wurde so gewählt, daß sich bei einem mittleren Zellzwischenankunftsabstand $T_{A,z} = 2,08 \cdot 10^{-4}$ s der Quelle die angegebenen Angebote A ergeben. Der Verlauf der Verlustwahrscheinlichkeit kann in zwei Phasen eingeteilt werden. Bis zu einer Puffergröße von etwa 250 Zellen (Abbildung 5.2 (a)) sinkt die Verlustwahrscheinlichkeit mit steigender Puffergröße relativ schnell,

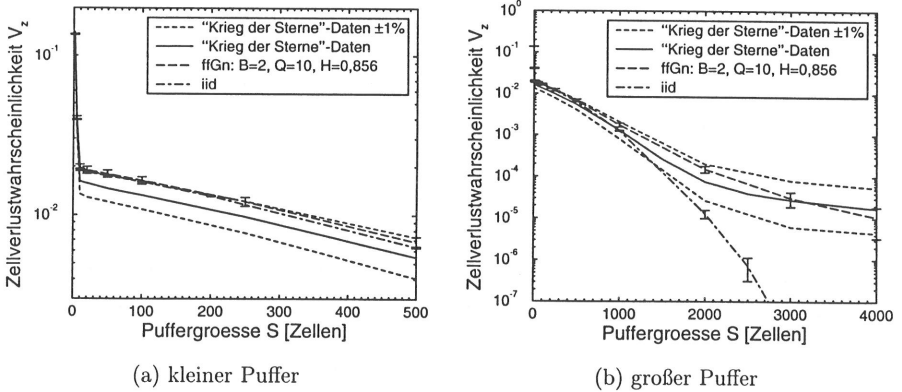


Bild 5.3: Einfluß der Puffergröße S eines Multiplexers auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z von $N_{Mux} = 40$ VBR MPEG-Quellen ($A \approx 0,93$)

und auch die Ergebnisse für das Modell ohne Modellierung der Szenenebene stimmen sehr gut mit den Ergebnissen für die empirischen Bildgrößen überein. Die Verluste in diesem Bereich können der Bildebene zugeschrieben werden, da es durch den kleinen Puffer nicht mehr möglich ist, die eintreffenden Zellen eines großen Bildes zwischenzuspeichern.

Für große Puffer werden die Verluste durch das vereinfachte Modell um Größenordnungen unterschätzt (Abbildung 5.2 (b)). Die zusätzliche Modellierung der Szenenebene mit einem ffGn-Prozeß ergibt aber eine gute Übereinstimmung mit den Verlusten der empirischen Bildgrößen. Bei einer auf Szenenebene unkorrelierten Bildfolge können durch den Puffer auch große Bilder zwischengepuffert werden, und die Verluste fallen weiter stark ab. Durch die Langzeitkorrelationsstruktur der Videodaten gibt es aber auf der Szenenebene Perioden mit hohem und geringem Datenaufkommen, wobei die Periodenlängen theoretisch nach oben nicht begrenzt sind. Diese Schwankungen können auch durch einen großen Puffer nicht ausgeglichen werden, und die Verluste halten sich auf relativ hohem Niveau. Die Höhe des Niveaus wird durch das Angebot A und die Verteilungsfunktion der Zellzwischenankunftsabstände $T_{A,z}$ bestimmt.

Werden mehrere Videodatenströme in einem Multiplexer zusammengeführt, ergibt sich für den Verlauf der Zellverlustwahrscheinlichkeit, aufgetragen über der Puffergröße S , ein Verlauf mit drei Phasen, wie in Abbildung 5.3 dargestellt. Die drei Phasen können dem Verhalten der Videodatenströme auf der Zell-, Burst- und Szenenebene zugeordnet werden (siehe auch [213, 242, 244]).

Bei sehr kleinen Puffern (hier weniger als 20 Zellen) treten bereits Verluste durch die asynchrone Ankunft der Zellen der verschiedenen Videodatenströme auf, da es möglich ist, daß aufeinanderfolgend ankommende Zellen sehr kleine Zellzwischenankunftsabstände aufweisen.

Das Verhalten der Quellen auf der Bildebene bestimmt für Puffergrößen bis etwa 1000 Zellen den Verlauf der Zellverlustwahrscheinlichkeit. Bei Puffern mit einer Kapazität von mehr als etwa 1000 Zellen macht sich auch für die Überlagerung mehrerer Videodatenströme die Korrelationsstruktur der Szenenebene deutlich bemerkbar. Als Erklärung für den Verlauf der Kurve im Bereich der Bild- und Szenenebene gilt das bereits weiter oben für den Fall einer Quelle Gesagte.

Um auch bei sehr großen Puffern durch die Simulationen Ergebnisse mit aussagekräftigen Konfidenzintervallen zu bekommen, mußte das Angebot A des Multiplexers sehr hoch gewählt werden. Für hohe Angebote reagiert jedoch die Verlustwahrscheinlichkeit V_z überaus sensibel auf geringe Angebotsunterschiede. Erschwerend für die Simulation kommt die in Abschnitt 3.6.2 beschriebene langsame zeitliche Konvergenz des Mittelwertprozesses langzeitkorrelierter stochastischer Prozesse hinzu, wodurch auch die Konvergenz des Angebots des Multiplexers sehr langsam erfolgt. Um die Simulationszeit in realisierbaren Grenzen zu halten und einen Vergleich der Ergebnisse der hierarchischen Quellmodelle mit denen bei Verwendung der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen zu ermöglichen, wurde deswegen zuerst ein Testsimulationslauf (Simulation von mehr als 4 Stunden Realzeit) verwendet, um das in dieser Zeitspanne erreichbare Angebot zu bestimmen. Für den Produktionslauf mit identischer Länge und identischen Pseudozufallszahlen wurde dann das Angebot durch drei den mittleren Bildgrößen proportionale additive Konstanten für die Mittelwert-Parameter der Bildebene korrigiert. Diese Maßnahme bewirkt, daß sich das Angebot A des Produktionslaufs während der gewählten Simulationszeit relativ genau auf den gewünschten Wert einschwingt, die Korrelationsstruktur des hierarchischen Quellmodells aber nicht verändert wird. Die erzielten Angebote sind in Tabelle 5.1 zusammengefaßt.

Videodatenquelle	Angebot A
„Krieg der Sterne“-Bildgrößen	0,928
„Krieg der Sterne“-Bildgrößen + 1%	0,937
„Krieg der Sterne“-Bildgrößen - 1%	0,919
Lognormalverteilungen, iid	0,917
Lognormalverteilungen, ffGn: $B = 2, Q = 10, H = 0,856$	0,917

Tabelle 5.1: Vergleich der Angebote A der theoretischen Quellmodelle und der Videodatenströme der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen

Eine Veränderung des Angebots um $\pm 1\%$ durch skalieren der Mittelwerte der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen hat bei Puffern mit einer Kapazität von über 2000 Zellen bereits einen Unterschied in der Verlustwahrscheinlichkeit von etwa einer Größenordnung zur Folge (Abbildung 5.3 (b)). Obwohl das Angebot der hierarchischen Quellmodelle in etwa dem der reduzierten „Krieg der Sterne“-Bildgrößen entspricht, erhält man für den Bereich der Bildebene Verluste im Bereich der erhöhten „Krieg der Sterne“-Bildgrößen. Dies resultiert

aus der Überschätzung der Wahrscheinlichkeit für große Bilder durch die verwendeten Log-normalverteilungen (Abbildung 5.3 (a)). Für große Puffer ist, wie schon bei einer Quelle, das vereinfachte (iid) Modell nicht mehr in der Lage, das Verhalten der empirischen Bildgrößen adäquat zu modellieren, und die Verlustwahrscheinlichkeit wird um mehrere Größenordnungen unterschätzt. Das komplette Modell ist auch für den Bereich der Szenenebene in der Lage, das Verhalten der empirischen Videodatenströme nachzubilden. An dem stärkeren Abfall der Verlustwahrscheinlichkeit im Bereich der Szenenebene erkennt man jedoch im Vergleich zu den empirischen Daten, daß der Hurst-Parameter des Modells während der Simulation etwas zu niedrig ist. Dies wird bestätigt durch die R/S -Analyse in Abbildung C.5 in Anhang C.

5.3 Multiplexen mehrerer VBR MPEG-Quellen

5.3.1 Zellebene

Der Paketierungsmodus hat entscheidenden Einfluß auf die Verteilungsdichtefunktion $f_{X_z}(x)$ und die Autokorrelationsfunktion $r_{X_z X_z}(\tau)$ der Zellzwischenankunftsabstände X_z des Videodatenstroms auf der Zellebene. Die empirische Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}_z(x)$ der Zellzwischenankunftsabstände für die „Krieg der Sterne“-Daten bei verschiedenen Burst-Bitraten $R_{z,on}$ zeigt Abbildung 5.4. Es ist deutlich zu erkennen, daß mit steigender Burst-Bitrate der Hauptteil der Zellzwischenankunftsabstände hin zu kleinen Werten verschoben wird. Gleichzeitig entstehen mit geringer Wahrscheinlichkeit (ein Zwischenankunftsabstand pro Bild) Abstände mit Dauern bis zu $\Delta T = 40$ ms. Wird der deterministische Paketierungsmodus verwendet, erkennt man in Abbildung 5.5 die positiven Werte der Autokorrelationsfunktion der Bildebene auch auf der Zellebene bei ungefähr 580, 1160 und 1740 Zellabständen. Das entspricht der mittleren Anzahl von Zellen, die während der Dauer von 3, 6 und 9 Bildern erzeugt werden. Dieser Effekt verschwindet rasch mit zunehmender Bitrate der Bursts.

Die Verteilungsdichtefunktion $\tilde{f}_z(x)$ und die Autokorrelationsfunktion $\hat{r}_{z,k}$ der Zellzwischenankunftsabstände der Quellen beeinflussen die Leistungsfähigkeit des Multiplexers, so daß auch die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z stark vom gewählten Paketierungsmodus abhängig ist. Ein Beispiel für das Multiplexen von 40 Videostreamen zeigt Abbildung 5.6. Die geringsten Verluste erhält man für den deterministischen Modus (entspricht dem Blockmodus mit $R_{z,on} = 0$), bei dem die Zellströme über die Darstellungsdauer der Videobilder am besten geglättet sind. Wird die Blockbitrate $R_{z,on}$ größer als die mittlere Bitrate der B-Bilder von etwa 1,25 Mbit/s gewählt, bekommt der Zellstrom zunehmend eine On-Off-Charakteristik, und die Verlustwahrscheinlichkeit steigt zunächst stark an, um dann asymptotisch für sehr große Burst-Bitraten gegen Eins zu streben.

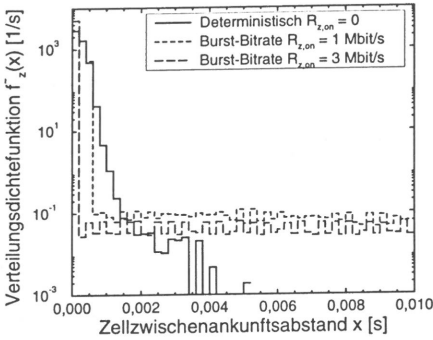


Bild 5.4: Verteilungsdichtefunktion der Zellzwischenankunftsabstände $\hat{f}_z(x)$ des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms

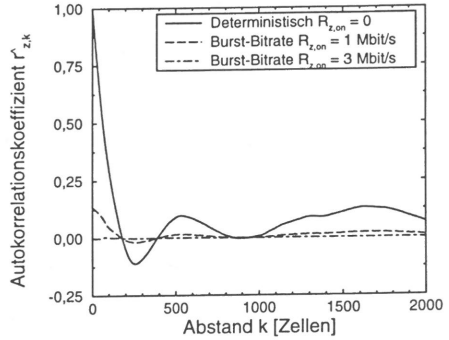


Bild 5.5: Autokorrelationsfunktion $\hat{r}_{z,k}$ der Zellzwischenankunftsabstände des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms

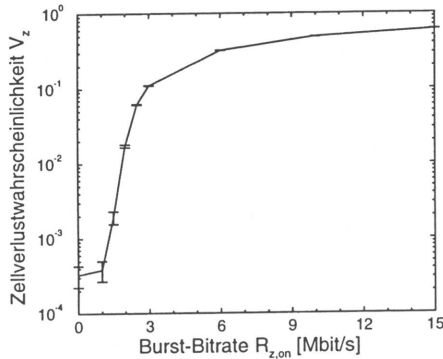


Bild 5.6: Einfluß der Burst-Bitrate $R_{z,on}$ auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z des „Krieg der Sterne“-Videodatenstroms ($A = 0,82$, $S = 50$, $N_{Mux} = 40$, $R_L = 100$ Mbit/s)

5.3.2 Bildebene

Durch die periodische Korrelationsstruktur der Bildebene, die durch die Verwendung von drei verschieden codierten Bildtypen verursacht wird, sind die Phasenverschiebungen $T_{P,i}$, $i \in \{1, 2, \dots, N_{Mux}\}$ der Videodatenströme eines Multiplexers von entscheidender Bedeutung für die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z . Die Phasenverschiebung beschreibt die zeitliche Verschiebung der Startzeitpunkte der Videodatenströme bezüglich des Startzeitpunkts der Simulation. Im folgenden sollen für $i \in \{1, 2, \dots, N_{Mux}\}$ drei Möglichkeiten verglichen

werden:

1. Videodatenströme in Phase:

$$T_{P,i} = N_{Mux}DX_1, \quad (5.3)$$

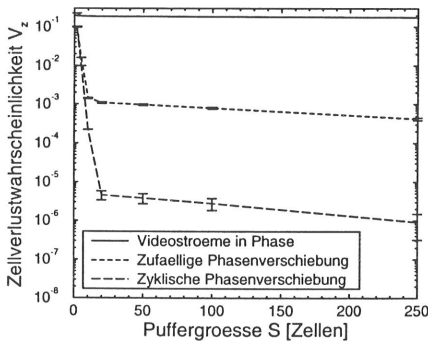
2. Videodatenströme mit zufälliger Phasenverschiebung:

$$T_{P,i} = N_{Mux}DX_1 + N_{MPBG}\Delta TX_2, \quad (5.4)$$

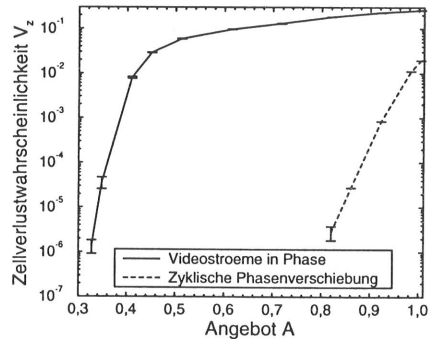
3. Videodatenströme mit zyklischer Phasenverschiebung:

$$T_{P,i} = N_{Mux}DX_1 + \Delta Ti. \quad (5.5)$$

Dabei bezeichnen X_1 und X_2 auf dem Intervall $]0,1[$ gleichverteilte Zufallsvariable. Um gleichzeitige Zellankünfte am Beginn jedes Bildes zu vermeiden, wird der Start aller Videodatenströme um die zufällige Zeitspanne $N_{Mux}DX_1$ verschoben. Wird keine weitere Verschiebung verwendet, ergibt sich die ungünstigste Überlagerung [3] der Videodatenströme, da jeder Strom mit einem I-Bild beginnt. Um eine zufällige Überlagerung zu erreichen, werden die Anfangszeitpunkte gleichverteilt innerhalb der Dauer eines GOP verschoben. Eine sehr günstige Überlagerung der Videodatenströme erhält man durch die zusätzliche zyklische Verschiebung der Anfangszeitpunkte um eine Bildarstellungsdauer ΔT .



(a) Angebot $A = 0,82$



(b) Puffergröße $S = 100$ Zellen

Bild 5.7: Einfluß der Phasenlage $T_{P,i}$ der VBR MPEG-Videodatenströme auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z eines Multiplexers ($R_L = 100$ Mbit/s)

Abbildung 5.7 (a) zeigt die Kurven für die Verlustwahrscheinlichkeit V_z in Abhängigkeit von der Puffergröße S für die drei Möglichkeiten der Phasenverschiebung unter Verwendung des vereinfachten Modells ohne Szenenebene. Durch die Wahl der Phasenverschiebung wird das Verlustniveau der Bildebene um mehr als vier Zehnerpotenzen verschoben. Den Einfluß

des Angebots auf die Verlustwahrscheinlichkeit für die Möglichkeiten 1 und 3 zeigt Abbildung 5.7 (b). Die günstige Wahl der Phasenverschiebungen ermöglicht etwa die 2,4-fache Anzahl von Videodatenverbindungen, d.h. durch eine geeignete geringe zeitliche Verschiebung (ein GOP entspricht in den verwendeten Beispielen 360 ms) des Übertragungsbeginns kann z.B. durch ein Video-On-Demand-System ein erheblicher Multiplexgewinn durch die kontrollierte Überlagerung der Videodatenströme erzielt werden.

5.3.3 Szenenebene

Das Verhalten der Videodatenströme auf der Szenenebene wird durch den Hurst-Parameter $H \in]0,5, 1,0[$ beschrieben. Dieser hängt hauptsächlich von der künstlerischen Gestaltung des Filmmaterials ab und bestimmt die Korrelationseigenschaften des Videodatenstroms auf der Szenenebene. Im folgenden soll untersucht werden, wie sich der Hurst-Parameter H und damit die Gestaltung des Filmmaterials auf die Verlustwahrscheinlichkeit V_z eines statistischen Multiplexers auswirken, der von N_{Mux} VBR MPEG-Videodatenströmen mit identischem Hurst-Parameter H gespeist wird. Für diese Untersuchungen wird das in Unterkapitel 4.3 beschriebene komplette VBR MPEG-Quellmodell verwendet, in dem die Szenenebene durch einen ffGn-Prozeß modelliert wird. Der Nachweis, daß der verwendete ffGn-Prozeß mit den hier gewählten Parametern in der Lage ist, das Langzeitkorrelationsverhalten korrekt zu modellieren, wird in Anhang C erbracht. Für die Modellierung der Bildebene werden die Parameter des Spielfilms „Krieg der Sterne“ aus Tabelle 4.2 und für die Zellebene der deterministische Paketierungsmodus verwendet.

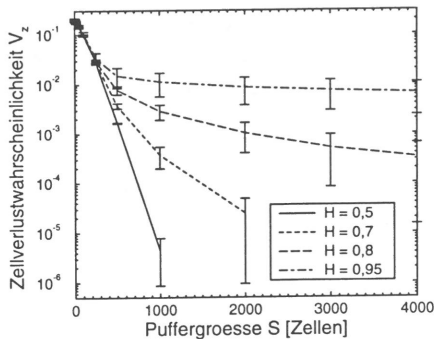


Bild 5.8: Einfluß der Puffergröße S auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z einer VBR MPEG-Quelle bei verschiedenen Hurst-Parametern H ($A = 0,80$, $D = 1,67 \cdot 10^{-4}$ s, $N_{Mux} = 1$)

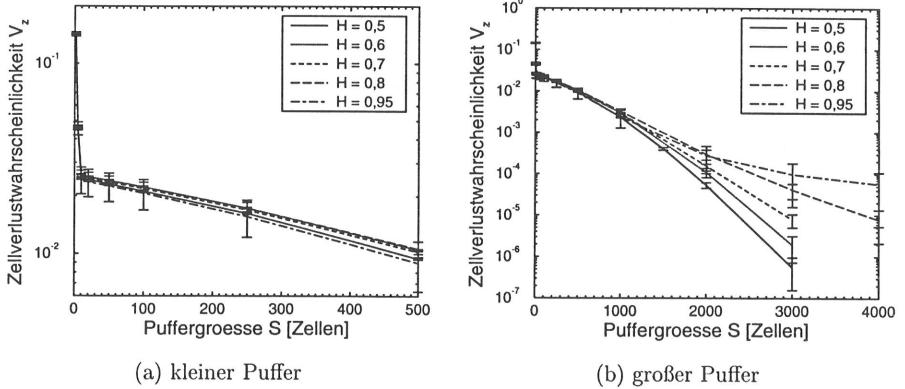


Bild 5.9: Einfluß der Puffergröße S eines Multiplexers auf die Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z von VBR MPEG-Quellen mit verschiedenen Hurst-Parametern H ($A = 0,93, N_{Mux} = 40$)

Abbildung 5.8 zeigt die Abhängigkeit der Verlustwahrscheinlichkeit V_z einer VBR MPEG-Quelle in einer Bedieneinheit mit konstanter Bediendauer D von der Wahl der Puffergröße S . Bei der Verwendung von nur einer Videoquelle wird durch den Multiplexer deren Spitzenbitrate auf etwa 2,25 Mbit/s begrenzt. Durch die starke Variabilität der Bitrate des Videodatenstroms und die Begrenzung der Spitzenbitrate auf das 1,25-fache der mittleren Bitrate ist ein relativ großer Pufferspeicher notwendig.

Im einfach logarithmischen Maßstab erhält man für $H = 0,5$ einen nahezu linearen Kurvenverlauf. Für Hurst-Parameter $H > 0,5$ unterscheidet sich das Verhalten für kleine Puffer ($S < 250$ Zellen) von dem für große Puffer ($S > 250$ Zellen). Bei einem kleinen Puffer ist die Verlustwahrscheinlichkeit unabhängig vom Hurst-Parameter des Videodatenstroms. Diese Verluste sind dem Verhalten der Quelle auf der Bild-Ebene zuzuordnen. Wird der Puffer größer gewählt, so daß auch längerfristige Schwankungen der Datenrate des Videodatenstroms ausgeglichen werden können, wird die Verlustwahrscheinlichkeit stark durch dessen Langzeitkorrelation beeinflusst. Je stärker die Langzeitkorrelation, d.h. je größer H , desto geringer ist der Rückgang der Verlustwahrscheinlichkeit mit steigender Puffergröße. Für $H \rightarrow 1$ erhält man bei nahezu beliebiger Vergrößerung des Puffers fast keine Verringerung der Verlustwahrscheinlichkeit.

Für das Multiplexen mehrerer VBR MPEG-codierter Videodatenströme ergeben sich für die Abhängigkeit der Zellverlustwahrscheinlichkeit V_z von der gewählten Puffergröße S drei Bereiche, die in Abbildung 5.9 dargestellt sind (vgl. auch Abbildung 5.3). Für Puffergrößen bis etwa 1000 Zellen ist die Zellverlustwahrscheinlichkeit unabhängig vom gewählten Hurst-Parameter H . Wie Abbildung 5.9 (a) zeigt, unterteilt sich der Verlauf der Verlustwahr-

scheinlichkeit für steigende Puffergrößen in diesem Bereich in einen sehr schnellen Abfall für Puffergrößen unter 20 Zellen und einen langsameren Abfall für größere Puffer. Schon durch Puffer mit einer Kapazität von wenigen Zellen können die asynchronen Zellankünfte mehrerer Videodatenströme ausgeglichen werden, und die Zellverluste nehmen sehr schnell ab (Verluste auf der Zellebene). Der langsamere Abfall für etwas größere Puffer resultiert aus der zufälligen Überlagerung mehrerer großer Bilder (Verluste auf der Bildebene). Um die Verluste in diesem Bereich zu verringern, werden bereits erhebliche Pufferkapazitäten benötigt.

Der Einfluß der Korrelation der Szenenebene zeigt sich erst für Puffer mit einer Kapazität von mehr als 1000 Zellen (Verluste auf der Szenenebene). Erst ein Puffer dieser Größe ist in der Lage, vorhandene Langzeitschwankungen in der Datenrate der Videodatenströme auszugleichen, und die Intensität dieser Schwankungen, d.h. der Hurst-Parameter H , beeinflusst die Zellverlustwahrscheinlichkeit, so daß für große H auch hier die Zellverlustwahrscheinlichkeit mit steigender Puffergröße langsamer sinkt. Werden alle Bilder identisch codiert (nur I-Bilder), existiert auf der Bildebene kein periodisches Verhalten. Dann entfällt der Bereich der Bild-Ebene auch für die Zellverlustwahrscheinlichkeit, und deren Kurven zeigen einen zweigeteilten Verlauf mit einem direkten Übergang von der Zell- zur Szenenebene (siehe [255]). Das absolute Niveau und die 'Knickpunkte' der Verlustkurven sind abhängig vom Angebot A des Multiplexers.

Kapitel 6

Leistungsuntersuchung eines verteilten Video-On-Demand-Systems

Der Erfolg der Einführung eines neuen Dienstes, wie z. B. Video-On-Demand, ist wesentlich von dessen Akzeptanz durch die Benutzer abhängig. Das bedeutet für ein Video-On-Demand-System (Videosever, VOD-System), daß es mit seinem Filmangebot und seiner Bedienungsfreundlichkeit mindestens den Stand heutiger Videotheken erreichen muß. So hat ein Videofilm, der 1,5 Stunden dauert, bei einer mittleren Bitrate von 1,5 Mbit/s einen Speicherbedarf von 966 Mbyte. Will man 1000 Filme anbieten, entspricht das einer Speichergröße von 943 Gbyte. Bei 4,5 Mbit/s, einer gängigen Datenrate für MPEG-2-codierte Videodatenströme, erhält man statt dessen bereits 2,9 Tbyte. Doch auch die für den Benutzer sichtbaren Leistungsdaten, wie zum Beispiel die Antwortzeit nach Auswahl eines Films oder Funktionen wie schneller Vor- und Rücklauf, müssen mit der Leistung eines Videokorders vergleichbar sein. Erste prototypische Implementierungen vernetzter VOD-Systeme und deren Anwendung wurden bereits in der Literatur vorgestellt [125, 241]. Feldversuche mit einer begrenzten Zahl von Teilnehmern werden momentan angestrebt.

In diesem Kapitel wird durch eine detaillierte Leistungsuntersuchung gezeigt, inwieweit ein VOD-System mit hierarchisch aufgebautem Speicher in der Lage ist, die obigen Forderungen zu erfüllen. Gleichzeitig wird untersucht, welche Ressourcen für die VBR MPEG-codierten Videodatenströme in den verschiedenen Systemkomponenten zur Verfügung gestellt werden müssen. Zur Untersuchung und Optimierung der Leistungsfähigkeit muß die Funktionalität des Videosevers abstrahiert werden. Daraus ergibt sich dann die Spezifikation des funktionalen Modells, das die Grundlage für die Leistungsuntersuchungen bildet. Auf Grund der Komplexität eines verteilten Videosevers sind dabei Vereinfachungen und Verallgemeinerungen zwingend notwendig, um die wichtigsten Systemparameter zu extrahieren und

schließlich Aussagen über das Verhalten des Gesamtsystems machen zu können. Eine stark vereinfachende Untersuchung eines Videoservers wurde in [47] vorgestellt. Eine Möglichkeit der Berücksichtigung von Videorekorderfunktionen, die in dieser Untersuchung nicht berücksichtigt werden, zeigt [53].

Nach der Vorstellung der Systemarchitektur des Videoservers in Abschnitt 6.1 wird in Unterkapitel 6.2 die Architektur und Funktionalität der Systemkomponenten erläutert. In Unterkapitel 6.3 wird das stark vereinfachte Protokoll vorgestellt, das für die Anforderung und Übermittlung der Videodaten zwischen den Komponenten des verteilten Videoservers verwendet wird. Die Modellierung der Funktionalität der Systemkomponenten des Videoservers und das daraus resultierende Gesamtmodell wird in Unterkapitel 6.4 erläutert. Eine Zusammenfassung der für die Leistungsuntersuchung verwendeten Werte der Modellparameter gibt Unterkapitel 6.5. Die Ergebnisse der Leistungsuntersuchung werden in Abschnitt 6.6 diskutiert und daraus die für die Leistung des Videoservers günstigsten Werte der Systemparameter bestimmt.

6.1 Systemarchitektur

Die verteilte Systemarchitektur des Videoservers, dessen Leistungsfähigkeit untersucht werden soll, zeigt Abbildung 6.1. Sie ist ähnlich zu den in [26, 46, 50, 56, 92] vorgestellten oder verwendeten Architekturen. Sie besteht aus dem Videosever-Management, das unter anderem die Benutzerschnittstelle des VOD-Dienstes zur Verfügung stellt sowie die Verwaltung der aktuellen Benutzer, die Kostenabrechnung und das Management neu ankommender

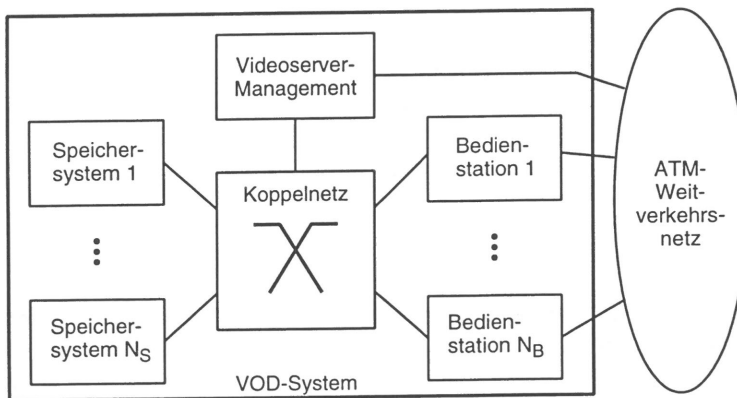


Bild 6.1: Systemarchitektur des Video-On-Demand-Systems

Benutzeranforderungen beinhaltet. Die Videodatenströme selbst werden durch die N_B Bedieneinheiten verwaltet, die nach Aufbau der Videodatenverbindung direkt mit den Datengeräten der Benutzer über das ATM-Weitverkehrsnetz kommunizieren. Die Videodaten befinden sich in einem Videoarchiv, das auf N_S Speichersysteme verteilt ist.

Alle Komponenten des Videoservers sind über ein Koppelnetz direkt miteinander verbunden. Durch die verteilte Architektur des Videoservers ist dessen Leistungsfähigkeit über die Anzahl der verwendeten Bedienstationen und Speichersysteme skalierbar.

Im Rahmen dieser Arbeit werden als Videodatenpeicher nur RAID-Systeme betrachtet. Durch das Koppelnetz und die Verwendung von Festplatten zur Datenzwischenspeicherung (*staging disks*) kann die Leistungsfähigkeit der Bandlaufwerke von den restlichen Komponenten des Videoservers weitgehend getrennt untersucht werden. Eine Bedienstation „sieht“ beim Zugriff auf Daten der Bandlaufwerke die Leistungsfähigkeit der Festplatten, wobei berücksichtigt werden muß, daß diese gleichzeitig die Schreibzugriffe der Bandlaufwerke zu bearbeiten haben. Durch geeignete Zugriffsstrategien kann gewährleistet werden, daß die Schreibzugriffe die zeitliche Bearbeitung der Lesezugriffe möglichst wenig beeinflussen. Die Modellierung und Untersuchung der quantitativen Leistungsfähigkeit eines Bandlaufwerk-Systems kann unabhängig von der Untersuchung der RAID-Systeme erfolgen und wird hier nicht weiter betrachtet.

6.2 Architektur und Funktionalität der Systemkomponenten

6.2.1 Bedienstation

Im folgenden soll zuerst der schematische Aufbau einer Bedienstation, wie sie für die Modellierung verwendet wird, skizziert werden. Dann werden das Management und die Steuerung der Videodatenströme beschrieben und Möglichkeiten für die Modellierung des Benutzerverhaltens bezüglich der Auswahl der Videofilme aus dem Archiv aufgezeigt.

6.2.1.1 Aufbau

Den schematischen Aufbau der Bedienstation und die gegenseitigen Abhängigkeiten ihrer logischen Komponenten zeigt Abbildung 6.2. Die Videodatenbank enthält Informationen über die Lage der verschiedenen Videos in den Speichersystemen, die für die Bedienstation verfügbar sind. Sie enthält auch die von der Bedienstation verwalteten Statusinformationen. Die zentrale Komponente bildet der Videostrom-Controller (CPU). Er verwaltet und steuert

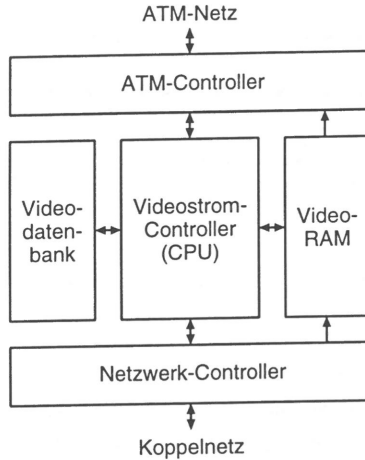


Bild 6.2: Schematischer Aufbau der Bedienstation

die Videodatenströme der Bedienstation. Dazu fordert er in regelmäßigen Abständen über den Netzwerk-Controller Videodaten von den Speichersystemen an. Diese werden im Video-RAM zwischengespeichert, bis der ATM-Controller vom Videostrom-Controller beauftragt wird, sie über das ATM-Netz zum Teilnehmerendgerät zu übermitteln. Im Videostrom-Controller sind auch die Videorekorderfunktionen realisiert, über die der Teilnehmer die Darstellung seines Videofilms kontrollieren kann, die jedoch bei der hier vorgestellten Untersuchung der Leistungsfähigkeit des Videosevers unberücksichtigt bleiben.

6.2.1.2 Management der Videodatenströme

Um für die Leistungsuntersuchung eine konstante Last des Videosevers zu erhalten, verwaltet und steuert der Videostrom-Controller der Bedienstation eine konstante Zahl von N_{BV} Videodatenströmen. Es wird angenommen, daß die Videodatenströme voneinander unabhängig sind (verschiedene Filme für mehrere Benutzer). Das der Bedienstation zur Verfügung stehende Videofilmarchiv enthält N_{BF} Videofilme. Jedem Videofilm ist über die Verteilung $p_{BF}(i)$, $i = 1, \dots, N_{BF}$ eine Wahrscheinlichkeit zugeordnet, mit der der Videofilm aus dem Archiv ausgewählt wird. Nach Beendigung eines Videofilms wird für den entsprechenden Videodatenstrom über die Verteilung $p_{BF}(i)$ der nächste Videofilm ausgewählt und nach einer kurzen zufälligen Zeitspanne gestartet.

Die Videodaten können auf viele verschiedene Arten von den RAID-Systemen angefordert werden, wovon die folgende für die Modellierung verwendet wird. Die Videodaten eines Videofilms sind in einem der RAID-Systeme in aufeinanderfolgenden logischen Speicherblöcken

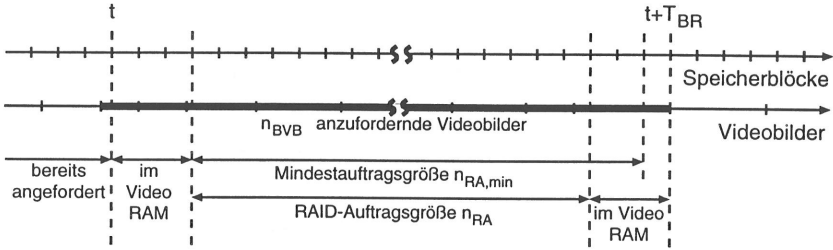


Bild 6.3: Generierung eines RAID-Auftrags

abgelegt. Da die Leistung der RAID-Systeme wesentlich von der Größe der Anforderungen abhängt, werden durch den Videostrom-Controller mit einem sogenannten RAID-Auftrag immer mehrere Videobilder zusammen in einer größeren Anzahl aufeinanderfolgender Blöcke angefordert. Dabei wird berücksichtigt, daß Blöcke, die bereits im Video-RAM bereitstehen, nicht wiederholt angefordert werden müssen.

Die Methode zur Generierung der RAID-Aufträge für einen Videodatenstrom ist in Abbildung 6.3 dargestellt. Der momentane Zeitpunkt, zu dem der Videostrom-Controller für den dargestellten Videodatenstrom die nächsten Bilder anfordert, sei t . Zuerst wird überprüft, ob Blöcke der nächsten anzufordernden Videobilder sich bereits im Video-RAM befinden. Im Normalfall ist immer der erste Block des nächsten anzufordernden Bildes bereits im Video-RAM gespeichert, da die Anforderung der Videodaten durch die RAID-Aufträge nur in ganzen Blöcken erfolgen kann, die Grenzen der Daten der einzelnen Videobilder aber nicht mit den Blockgrenzen übereinstimmen. Bei sehr vielen parallelen Videodatenströmen ist es auch möglich, daß die für einen anderen Videodatenstrom angeforderten Blöcke mitbenutzt werden können. Ab dem ersten Block, der sich nicht mehr im Video-RAM befindet, werden n_{BVB} Videobilder ausgewählt, bis sie zusammen eine Mindestauftragsgröße von $n_{RA,min}$ Blöcken ergeben. Die Wahrscheinlichkeit, die letzten Blöcke der Anforderung bereits im Video-RAM zu finden, ist sehr gering, doch wenn möglich, werden auch diese nicht erneut angefordert. Die verbleibenden n_{RA} Blöcke werden schließlich durch einen RAID-Auftrag vom entsprechenden RAID-System angefordert. Nach der Bearbeitungszeit T_{BRA} sind die angeforderten Videodaten komplett vom RAID-System zur Bedienstation übertragen. Die Zeitspanne T_{BR} bis zum nächsten RAID-Auftrag für einen Videodatenstrom ergibt sich aus der Anzahl n_{BVB} der Videobilder, die durch den jetzigen RAID-Auftrag angefordert werden, und der Darstellungsdauer ΔT eines Videobildes zu

$$T_{BR} = n_{BVB} \cdot \Delta T . \quad (6.1)$$

Für den Erwartungswert der Anzahl der Blöcke $\overline{n_{RA}}$, die durch einen RAID-Auftrag von der Bedienstation vom RAID-System angefordert werden, gilt mit der Blockgröße N_{Bl} bei

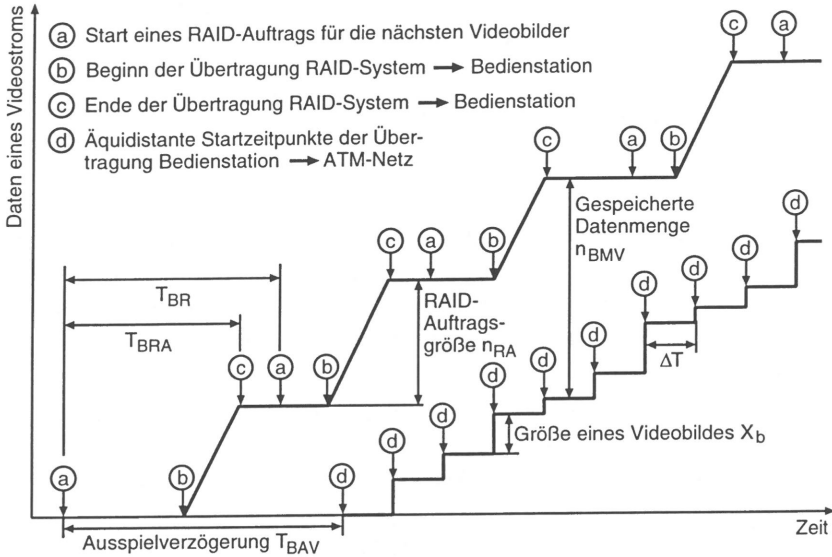


Bild 6.4: Anforderung, Zwischenspeicherung und Ausspielen der Videodaten

Vernachlässigung der am Ende der Anforderung bereits im Video-RAM gefundenen Blöcke die Abschätzung

$$\bar{n}_{RA} = E[n_{RA}] \approx \frac{\left\lceil \frac{n_{RA, \min}}{X_b} \right\rceil X_b}{N_{BI}} \quad (6.2)$$

Die Übermittlung der Videodaten zum Endteilnehmer durch den ATM-Controller geschieht periodisch Bild für Bild mit der Periodendauer ΔT , entsprechend der Darstellungsdauer der Bilder. Da die Bereitstellung der Daten in der Bedienstation die variable Bearbeitungszeit T_{BRA} benötigt, geschieht die Übermittlung mit der konstanten Ausspielverzögerung T_{BAV} . Die aufeinanderfolgenden Videobilder haben einen unterschiedlichen Informationsinhalt. Daraus resultiert ein Datenstrom mit variabler Bitrate, wie in Kapitel 4 beschrieben. Nachdem die Daten eines Videobildes komplett übertragen sind, werden diese im Video-RAM der Bedienstation gelöscht. Für die Zwischenspeicherung der Videodaten wird im Video-RAM eine zeitlich variable Anzahl von n_{BMV} Blöcken benötigt. Eine Zusammenstellung der Zusammenhänge der Größen zeigt Abbildung 6.4.

6.2.1.3 Benutzerverhalten

Die Auswahl eines bestimmten Videofilms aus dem Archiv des VOD-Servers ist vom Verhalten der Benutzer abhängig. Dieses wird durch die Wahl der Verteilung $p_{BF}(i), i = 1, \dots, N_{BF}$

für die Wahrscheinlichkeit, daß ein Benutzer den Videofilm mit der Nummer i auswählt, in das Modell einbezogen. Hierfür gibt es mehrere Möglichkeiten:

1. Für die Untersuchung eines Teils des Videoservers (z.B. ein einzelnes RAID-System) kann die gleichförmige Verteilung

$$p_{BF}(i) = \frac{1}{N_{BF}} \quad \text{für} \quad i = 1, \dots, N_{BF} \quad (6.3)$$

verwendet werden, bei der alle Filme mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgewählt werden. Durch diese Verteilung wird die Last gleichmäßig auf den gesamten untersuchten Speicherbereich verteilt. Die Leistung des Videoservers unter dieser Verteilung bildet die Grundlage für die Beurteilung des Einflusses der als nächstes vorgestellten schiefen Verteilungen.

2. Unter der Voraussetzung, daß die Videofilme in der Reihenfolge fallender Beliebtheit durchnummeriert sind, wurde gezeigt, daß sich die Verteilung $p_{BF}(i)$ für den Videoverleih in den Vereinigten Staaten durch Zipf's Gesetz [30, 214] beschreiben läßt. Danach gilt

$$p_{BF}(i) = \frac{C}{i} \quad \text{mit} \quad C = \frac{1}{\sum_{i=1}^{N_{BF}} \frac{1}{i}} \quad \text{für} \quad i = 1, \dots, N_{BF} . \quad (6.4)$$

Diese Möglichkeit hat den Nachteil, daß das Benutzerverhalten nicht über Parameter variierbar und dadurch die Untersuchung des Einflusses des Benutzerverhaltens auf die Leistungsfähigkeit des Videoservers nicht möglich ist.

3. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwendung der normalisierten geometrischen Verteilung [41, 56]. Diese kann beschrieben werden durch

$$p_{BF}(i) = \frac{(1 - \alpha)\alpha^{i-1}}{1 - \alpha^{N_{BF}}} \quad \text{mit} \quad \alpha \in]0, 1[\quad \text{für} \quad i = 1, \dots, N_{BF} . \quad (6.5)$$

Hier besteht durch den Schrägeparameter α die Möglichkeit, die Asymmetrie der Verteilung zu verändern und damit die Auswirkung der Präferenz weniger Filme durch die Benutzer auf die Leistungsfähigkeit des Videoservers zu untersuchen. Die Verteilung ist um so asymmetrischer, je kleiner α ist. Für die hier vorgestellten Leistungsuntersuchungen wurden die Möglichkeiten 1 und 3 verwendet. Werden keine Angaben bezüglich der Modellierung des Benutzerverhaltens gemacht, wurde die Möglichkeit 1 gewählt.

6.2.2 Koppelnetz

Das Koppelnetz wird auf der Burst-Ebene verbindungsindividuell für jede Bedienstation und die durch sie benutzten RAID-Systeme betrachtet. Es wird vorausgesetzt, daß zwischen den Bedienstationen und den RAID-Systemen jeweils eine Verbindung aufgebaut ist. Diese

Verbindung wird von allen Videodatenströmen der Bedienstation genutzt. Die Datenübertragung der Videodatenströme geschieht in Bursts. Jede Datenanforderung der Bedienstation von einem RAID-System durch einen RAID-Auftrag ergibt einen Videodatenburst, der vom RAID-System zur Bedienstation übertragen werden muß. Die Reservierung der dazu benötigten Bitrate kann bei Verwendung eines ATM-Koppelnetzes z. B. durch die in [17, 18, 45, 54, 43, 64, 140, 274, 287, 294] vorgestellten und untersuchten schnellen Reservierungsprotokolle erfolgen.

Die Anzahl der Videodatenbursts N_{KA} , die innerhalb einer Verbindung parallel übertragen werden können, ergibt sich aus der Burst-Bitrate eines Videodatenstroms C_{KB} und der Bitrate der Verbindung C_{KV} zu

$$N_{KA} = \frac{C_{KV}}{C_{KB}} . \tag{6.6}$$

Hierbei sollte die Burst-Bitrate C_{KB} so gewählt werden, daß eine günstige Verteilung der Verzögerungsdauern der Videodatenbursts erzielt wird.

6.2.3 RAID-System

6.2.3.1 Aufbau

Den Aufbau eines RAID-Systems, wie es der Modellierung des Videoservers zugrunde liegt, zeigt Abbildung 6.5. Jedes RAID-System besteht aus einer RAID-Steuerung, an die N_{RP} Peripheriebusse angeschlossen sind. Jeder Peripheriebus bedient N_{PF} Festplatten, wodurch dann ein RAID-System insgesamt $N_{RF} = N_{RP} \cdot N_{PF}$ Festplatten besitzt [21].

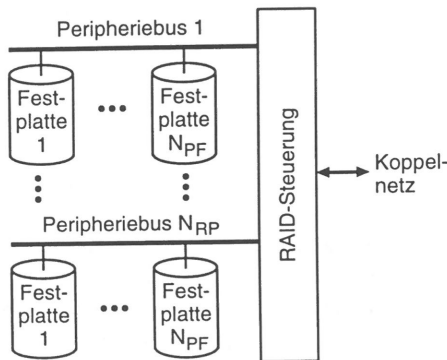


Bild 6.5: Aufbau eines RAID-Speichersystems

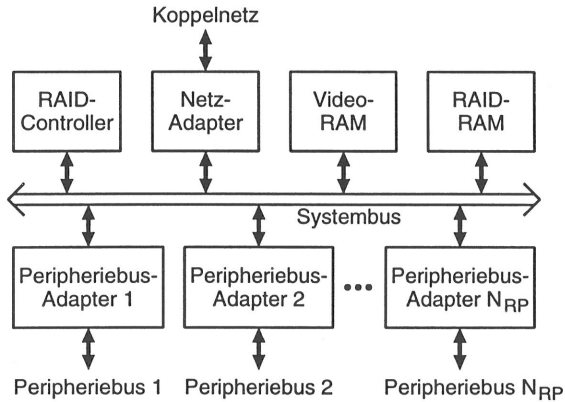


Bild 6.6: Hardware-Architektur der RAID-Steuerung

Eine mögliche Systemarchitektur der RAID-Steuerung (eine Erweiterung der in [273] vorgestellten Hardware-Architektur) zeigt Abbildung 6.6. Die wichtigste Komponente ist der RAID-Controller, der das gesamte RAID-System steuert. Die RAID-Steuerung verfügt über einen lokalen Speicher zur Verwaltung des RAID-Systems (RAID-RAM) und zur Zwischenspeicherung der Videodaten (Video-RAM), bis sie über das Koppelnetz an eine der Bedienstationen übermittelt werden. Die Festplatten sind mit der RAID-Steuerung durch mehrere Peripheriebus-Adapter verbunden. Auf der Basis dieser Architektur gibt es weitere Designvarianten. Um zu verhindern, daß bei einem Ausfall des RAID-Controllers das gesamte RAID-System ausfällt (*single point of failure*), wurden in [23, 277] Architekturen vorgestellt, die mehrere durch redundante Netzwerke miteinander verbundene Festplatten-Controller verwenden. Weitere redundante Architekturen mit mehreren Festplatten-Controllern werden in [210] verglichen. In [57] wird eine Architektur mit Koppelmatrix verwendet. Ein Vergleich der unterschiedlichen RAID-Systeme bezüglich ihrer Fehlertoleranz findet sich in [187].

6.2.3.2 Funktionen der RAID-Steuerung

Ein RAID-System erscheint den Bedienstationen als ein Speicher-System mit einheitlichem logischem Adreßraum. Es stellt einen linearen Speicherbereich mit N_{RB} Blöcken der Größe N_{Bl} zur Verfügung. Die Sektorgröße sei N_{Sk} . Das betrachtete RAID-System habe den RAID Level 0. Für die Anzahl der Sektoren N_{SPB} , die ein Block umfaßt, gilt

$$N_{Bl} = N_{SPB} \cdot N_{Sk} \quad \text{mit} \quad N_{SPB} \in \mathbb{N}, \quad (6.7)$$

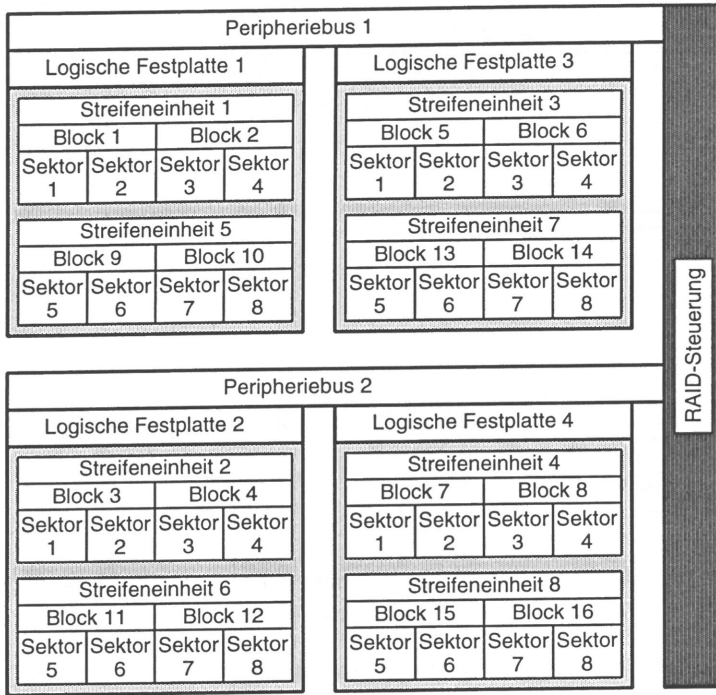


Bild 6.7: Beispiel für die Anordnung der Sektoren, Blöcke und Streifeneinheiten eines RAID-Systems

da keine Bruchteile eines Sektors von einer Festplatte angefordert werden können. Eine Streifeneinheit umfaßt N_{RBS} Blöcke entsprechend N_{RSS} Sektoren, d.h. es ist

$$N_{RSS} = N_{SPB} \cdot N_{RBS} \quad (6.8)$$

Somit können die N_{FS} Sektoren jeder Festplatte zu

$$N_{RSF} = \left\lfloor \frac{N_{FS}}{N_{RSS}} \right\rfloor \quad (6.9)$$

Streifeneinheiten gruppiert werden, d. h. der Adreßraum des RAID-Systems umfaßt N_{RSF} Streifen, und die Gesamtzahl der Streifeneinheiten N_{RS} des RAID-Systems und die Gesamtzahl der Blöcke N_{RB} ergeben sich zu

$$N_{RS} = N_{RF} \cdot N_{RSF} \quad \text{und} \quad (6.10)$$

$$N_{RB} = N_{RS} \cdot N_{RBS} \quad (6.11)$$

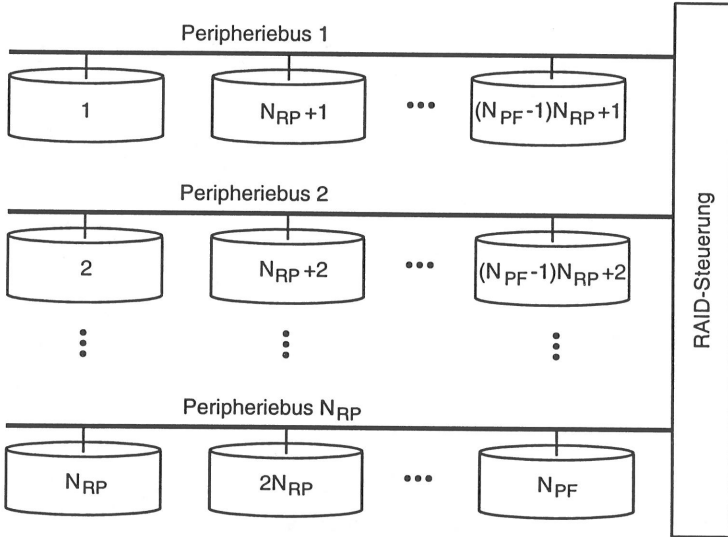


Bild 6.8: Abbildung der logischen Festplattenadressen auf die physikalischen Festplatten eines RAID-Systems

Die physikalische Aufteilung der Blöcke und Sektoren des Adreßraums des RAID-Systems auf die verschiedenen Festplatten wird durch das Beispiel in Abbildung 6.7 verdeutlicht. Das RAID-System besitzt hier $N_{RP} = 2$ Peripheriebusse mit je $N_{PF} = 2$ Festplatten, d. h. insgesamt stehen $N_{RF} = 4$ Festplatten zur Verfügung. Jede Festplatte besitzt $N_{FS} = 8$ Sektoren. Die Sektoren werden so gruppiert, daß $N_{SPB} = 2$ Sektoren zu einem Block zusammengefaßt werden und $N_{RSS} = 4$ Sektoren eine Streifeneinheit bilden. Damit ergeben sich $N_{RBS} = 2$ Blöcke pro Streifeneinheit. Insgesamt enthält der Adreßraum $N_{RS} = 8$ Streifeneinheiten mit $N_{RB} = 16$ Blöcken. Jede Festplatte enthält $N_{RSF} = 2$ Streifeneinheiten und somit der Adreßraum einer Festplatte zwei Streifen, die die Streifeneinheiten 1-4 und 5-8 enthalten.

Die N_{RB} Blöcke des RAID-Systems haben die Adressen $X_{RB} \in \{1, \dots, N_{RB}\}$. Die Blockadresse X_{RB} wird durch die RAID-Steuerung auf die logische Festplattenadresse $X_{RF} \in \{1, \dots, N_{RF}\}$ und die Sektornummer $X_{FS} \in \{1, \dots, N_{FS}\}$ dieser Festplatte abgebildet. Die logische Festplattenadresse X_{RF} ergibt sich aus der Adresse des Peripheriebusses X_{RP} und der Adresse der Festplatte des Busses X_{PF} durch

$$X_{RF} = (X_{PF} - 1)N_{RP} + X_{RP} \quad \text{für} \quad \begin{cases} X_{RP} \in \{1, 2, \dots, N_{RP}\} \\ X_{PF} \in \{1, 2, \dots, N_{PF}\} \end{cases} \quad (6.12)$$

Da sich benachbarte Streifeneinheiten auf Festplatten mit benachbarten logischen Adressen befinden, wird durch diese Wahl gewährleistet, daß bei der parallelen Anforderung mehrerer

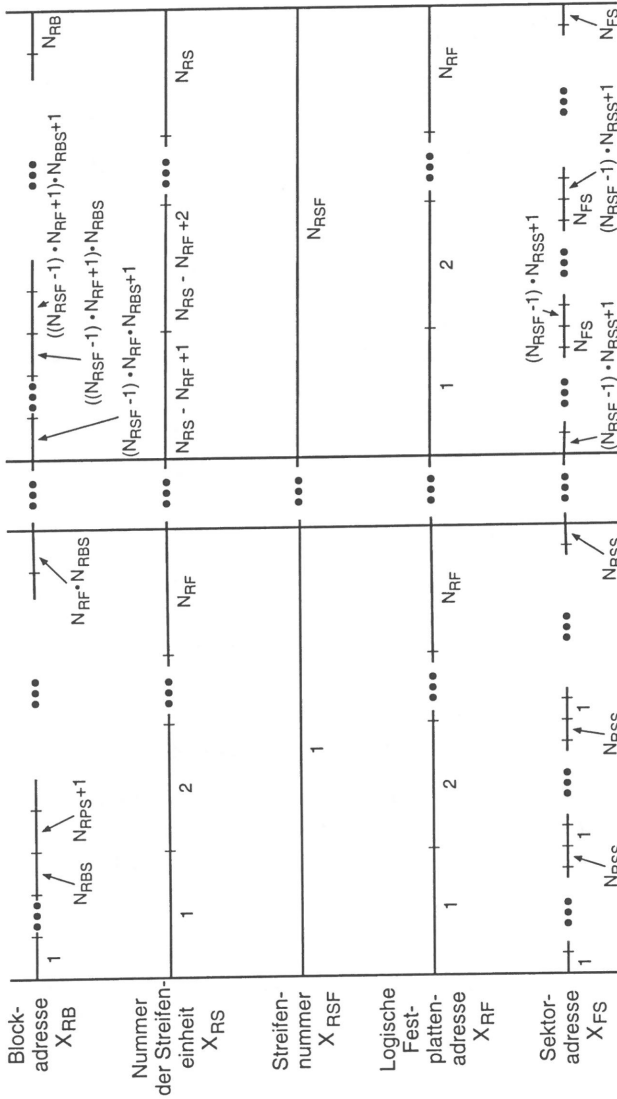


Bild 6.9: Abbildung der Blockadressen in logische Festplatten- und Sektoradressen

benachbarter Streifenheiten die Last so gleichmäßig wie möglich auf die N_{RP} Peripheriebusse verteilt wird, wie in Abbildung 6.8 dargestellt. Damit vermeidet man, daß die Bearbeitung paralleler Anforderungen durch die Übertragung der Daten über nur einen Peripheriebus doch nur seriell ausgeführt werden kann.

Aus der Blockadresse X_{RB} ergibt sich die Nummer der Streifenheit X_{RS} durch

$$X_{RS} = \begin{cases} \lfloor X_{RB}/N_{RBS} \rfloor + 1 & X_{RB}/N_{RBS} \notin \mathbb{N} \\ \lfloor X_{RB}/N_{RBS} \rfloor & X_{RB}/N_{RBS} \in \mathbb{N} \end{cases} \quad (6.13)$$

und die Blocknummer X_{RBS} innerhalb der Streifenheit zu

$$X_{RBS} = X_{RB} - (X_{RS} - 1)N_{RBS} . \quad (6.14)$$

Die Streifennummer X_{RSF} und damit die Nummer der Streifenheit der entsprechenden Festplatte, in der sich der Block befindet, erhält man aus der Streifenheitennummer und der Anzahl der Festplatten des RAID-Systems durch

$$X_{RSF} = \begin{cases} \lfloor X_{RS}/N_{RF} \rfloor + 1 & X_{RS}/N_{RF} \notin \mathbb{N} \\ \lfloor X_{RS}/N_{RF} \rfloor & X_{RS}/N_{RF} \in \mathbb{N} \end{cases} . \quad (6.15)$$

Schließlich erhält man die logische Festplattenadresse X_{RF} zu

$$X_{RF} = X_{RS} - (X_{RSF} - 1)N_{RF} \quad (6.16)$$

und die Adresse X_{FS} des ersten der N_{SPB} Sektoren, die zum Block mit der Adresse X_{RB} gehören, durch

$$X_{FS} = (X_{RSF} - 1)N_{RSS} + (X_{RBS} - 1)N_{SPB} + 1 . \quad (6.17)$$

Die allgemeine Anordnung der Streifenheiten ist in Abbildung 6.9 dargestellt.

Ein RAID-Auftrag beinhaltet die Anforderung von n_{RA} Sektoren. Dieser Auftrag wird durch die RAID-Steuerung in $n_{RF} \leq N_{RF}$ Festplattenaufträge aufgespalten, die jeweils die Anforderung von $n_{FA,i}$, $i \in \{1, 2, \dots, n_{RF}\}$ Sektoren beinhalten, so daß gilt

$$\sum_{i=1}^{n_{RF}} n_{FA,i} = n_{RA} . \quad (6.18)$$

Vernachlässigt man, daß die erste Streifenheit keinen Vorgänger und die letzte keinen Nachfolger hat, kann man den Vorgang der Aufspaltung eines RAID-Auftrags entsprechend Abbildung 6.10 an einem Kreis veranschaulichen.

Der Kreisumfang ist aufgeteilt in N_{RF} Kreisabschnitte, die jeweils der Größe einer Streifenheit entsprechen. Diese Kreisabschnitte sind nochmals unterteilt in jeweils N_{RSS} Kreisabschnitte, die dann den Sektoren der Streifenheiten zugeordnet sind. Insgesamt wird der Kreis also in $N_{RF} \cdot N_{RSS}$ Sektoren-Kreisabschnitte aufgeteilt, von denen immer N_{RSS} zu einem

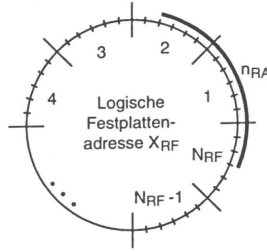


Bild 6.10: Aufspaltung eines RAID-Auftrags in Festplattenaufträge

Streifenheits-Kreisabschnitt zusammengefaßt werden. Die logischen Festplattenadressen aufeinanderfolgender Streifenheiten werden dann den entsprechenden Kreisabschnitten zugeordnet. Ein RAID-Auftrag, der n_{RA} Sektoren anfordert, fällt zufällig auf den Kreisumfang im diskreten Raster der Sektor-Kreisabschnitte. Die Anzahl der Streifenheits-Kreisabschnitte, die von einem RAID-Auftrag der Länge n_{RA} berührt werden, ergibt die Anzahl der Festplattenaufträge n_{RF} . Die Verteilung der Anzahl der Festplattenaufträge $p_{n_{RF}}(k) = P\{n_{RF} = k\}, k \in \{1, 2, \dots, N_{RF}\}$ ergibt sich

- für $n_{RA} \leq (N_{RF} - 1)N_{RSS} \wedge \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \notin \mathbb{N}$ zu

$$p_{n_{RF}}(k) = \begin{cases} 1 - \left[\frac{n_{RA}}{N_{RSS}} - \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor - \frac{1}{N_{RSS}} \right] & k = \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 1 \\ \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} - \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor - \frac{1}{N_{RSS}} & k = \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 2 \\ 0 & k \in \mathbb{N} \setminus \left\{ \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 1, \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 2 \right\} \end{cases}, \quad (6.19)$$

- für $n_{RA} \leq (N_{RF} - 1)N_{RSS} \wedge \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \in \mathbb{N}$ zu

$$p_{n_{RF}}(k) = \begin{cases} \frac{1}{N_{RSS}} & k = \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor \\ 1 - \frac{1}{N_{RSS}} & k = \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 1 \\ 0 & k \in \mathbb{N} \setminus \left\{ \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor, \left\lfloor \frac{n_{RA}}{N_{RSS}} \right\rfloor + 1 \right\} \end{cases}, \quad (6.20)$$

- und für $n_{RA} > (N_{RF} - 1)N_{RSS}$ zu

$$p_{n_{RF}}(k) = \begin{cases} 1 & k = N_{RF} \\ 0 & k \in \mathbb{N} \setminus \{N_{RF}\} \end{cases}. \quad (6.21)$$

Damit erhält man mit der mittleren Anzahl Sektoren $\overline{n_{RA}}$ eines RAID-Auftrags aus Gleichung 6.2 für den Mittelwert der Anzahl der Festplattenaufträge $\overline{n_{RF}}$

$$\overline{n_{RF}} = E[n_{RF}] = \begin{cases} \frac{\overline{n_{RA}} + N_{RSS} - 1}{N_{RSS}} & \overline{n_{RA}} \leq (N_{RF} - 1)N_{RSS} \\ N_{RF} & \overline{n_{RA}} > (N_{RF} - 1)N_{RSS} \end{cases} \quad (6.22)$$

Schließlich gilt für den Erwartungswert $\overline{n_{FA}}$ der Größe eines Festplattenauftrags

$$\overline{n_{FA}} = E[n_{FA}] = \frac{\overline{n_{RA}}}{\overline{n_{RF}}} = \begin{cases} \frac{\overline{n_{RA}} N_{RSS}}{\overline{n_{RA}} + N_{RSS} - 1} & \overline{n_{RA}} \leq (N_{RF} - 1)N_{RSS} \\ \frac{\overline{n_{RA}}}{N_{RF}} & \overline{n_{RA}} > (N_{RF} - 1)N_{RSS} \end{cases} \quad (6.23)$$

Der Nachweis hierfür läßt sich in ähnlicher Weise führen wie für die Anzahl der Festplattenaufträge. Durch die Wahl der Größe der Streifeneinheit N_{RSS} in Relation zur mittleren Größe $\overline{n_{RA}}$ eines RAID-Auftrags wird entschieden, wieviele Festplatten n_{RF} parallel einen RAID-Auftrag bearbeiten und wieviele RAID-Aufträge parallel von den Festplatten des RAID-Systems bearbeitet werden können. Gleichzeitig wird die mittlere Größe eines Festplattenauftrags $\overline{n_{FA}}$ festgelegt, die entscheidenden Einfluß auf die Auslastung ρ_F der Festplatten hat.

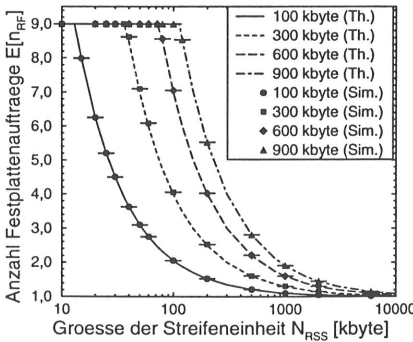


Bild 6.11: Erwartungswert $\overline{n_{RF}}$ der Anzahl der Festplattenaufträge pro RAID-Auftrag

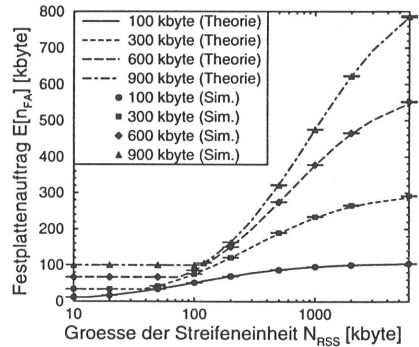


Bild 6.12: Erwartungswert $\overline{n_{FA}}$ der Größe eines Festplattenauftrags

Abbildung 6.11 zeigt die mittlere Anzahl der Festplattenaufträge $\overline{n_{RF}}$ eines RAID-Auftrags, aufgetragen über der gewählten Größe der Streifeneinheit N_{RSS} für minimale RAID-Auftragsgrößen $n_{RA,min} = 100, 300, 600$ und 900 kbyte für ein RAID-System mit $n_{RF} = 9$

Festplatten. Die Linien zeigen die Kurven nach Gleichung 6.22, und die Symbole kennzeichnen die Werte (einschließlich der verschwindend kleinen 95 %-Konfidenzintervalle), die mit Hilfe der ereignisgesteuerten Simulation des Videosevers ermittelt wurden. Man erkennt, daß für kleine Streifenheiten ($n_{RA} > (N_{RF} - 1)N_{RSS}$) ein RAID-Auftrag Festplattenaufträge an alle Festplatten des RAID-Systems umfaßt und dadurch maximal parallel bearbeitet wird. Für $N_{RSS} \rightarrow \infty$ wird jeder RAID-Auftrag durch nur eine Festplatte bearbeitet, so daß neun RAID-Aufträge gleichzeitig ausgeführt werden können.

In Abbildung 6.12 ist für die obengenannten Parameter die mittlere Größe der Festplattenaufträge $\overline{n_{FA}}$ aufgetragen. Auch hier entsprechen die Linien Gleichung 6.23 und die Symbole den Ergebnissen der Simulation des Videosevers. Für kleine Streifenheiten ($(N_{RF} - 1)N_{RSS} < n_{RA}$) wird die Größe des RAID-Auftrags durch die Anzahl der Festplatten geteilt. Für $N_{RSS} \rightarrow \infty$ geht die mittlere Größe der Festplattenaufträge gegen die mittlere Größe der RAID-Aufträge.

6.2.4 Peripheriegerätebus

Das Interface zwischen der RAID-Steuerung und den Festplatten des RAID-Systems bilden mehrere Peripheriebusse. Hier setzt sich der SCSI-Standard (*Small Computer Systems Interface*) [4, 5] mehr und mehr durch, weshalb dieser die Grundlage für die Modellierung bildet. Der SCSI-Bus ist ein paralleler Ein-/Ausgabebus mit *Multimaster*-Fähigkeit, das heißt die Rollenverteilung der Geräte am Bus ist nicht fest vorgegeben, sondern jedes Gerät kann *Master (Initiator)* oder *Slave (Target)* sein [95, 122, 208, 276]. Die Übertragungsrates des SCSI-1-Busses beträgt bei einer Breite von 8 bit im asynchronen Modus (unabhängig von einer vorgegebenen Taktfrequenz) 3,15 Mbyte/s, im Synchronbetrieb bis zu 4,77 Mbyte/s. Bei SCSI-2 werden bis zu 9,54 Mbyte/s erreicht (FAST-SCSI). Die Wide-SCSI-Option bietet dann bei einer Busbreite von 16 oder 32 bit Übertragungsrates bis zu 38,15 Mbyte/s. Für SCSI-3 wird unter Beibehaltung der SCSI-Befehlsstruktur der Einsatz serieller Schnittstellen angestrebt, mit denen dann Übertragungsrates über 100 Mbyte/s möglich sein werden [254, 268]. Je nach Busbreite können maximal $N_{PF} = 8$ (SCSI-1), 16 (16-Bit-Wide-SCSI) oder 32 (32-Bit-Wide-SCSI) Geräte am Bus betrieben werden, den *Host-Adapter* (Peripheriebus-Adapter) eingeschlossen. Buszugriffskonflikte werden über die Prioritäten der Geräte aufgelöst. Im Gegensatz dazu wird der Peripheriebus des RAID-System-Modells nach dem FIFO-Prinzip (*First In First Out*) vergeben. Bei geringer Auslastung des Busses ist der Leistungsunterschied gering, bei hoher Auslastung jedoch gewährleistet das FIFO-Prinzip, daß alle Festplatten gleichberechtigt ihre Daten übertragen können und damit die Varianz der Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags der RAID-Steuerung $\text{VAR}[T_{RFA}]$ geringer ist. Insbesondere wird vermieden, daß die Festplatte mit der niedrigsten Priorität warten muß, bis mehrere Übertragungen höherprioritärer Festplatten abgeschlossen sind.

6.2.5 Festplatte

Die Leistungsfähigkeit moderner Mikroprozessoren steigt momentan mit etwa 40 % bis 60 % jährlich. Dagegen steigt die Leistungsfähigkeit der Festplatten insgesamt nur um etwa 7 % bis 10 % jährlich, obwohl deren Speicherdichte um 60 % bis 80 % steigt [250]. Daher wird die Leistungsfähigkeit des Festplattensystems in Zusammenhang mit dem Ein- und Ausgabesystem zunehmend wichtiger für die Gesamtleistungsfähigkeit eines Computersystems. Dies trifft insbesondere auf vernetzte Videosever zu, da hier sehr große Datenmengen unter Echtzeitanforderungen bewegt werden müssen. Die exakte Modellierung der Festplatten ist deshalb von zentraler Bedeutung für die Aussagekraft des Gesamtmodells des Videosever.

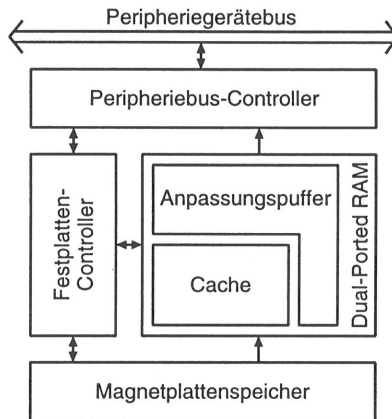


Bild 6.13: Modellierungsrelevante Festplattenkomponenten

Den schematischen Aufbau der Komponenten einer Festplatte, die für die Modellierung berücksichtigt werden, zeigt Abbildung 6.13. Neben dem Magnetplattenspeicher, der die in der Festplatte gespeicherten Daten enthält, umfasst das Modell der Festplatte einen Festplatten-Controller, der die gesamte Festplatte steuert, einen Peripheriebus-Controller als Schnittstelle zu den restlichen Komponenten des RAID-Systems und einen Halbleiterspeicher (*dual-ported static RAM*). Die Funktionalität der einzelnen Komponenten wird in den folgenden Unterabschnitten beschrieben.

6.2.5.1 Magnetplattenspeicher

Der Magnetplattenspeicher besteht aus N_{FP} übereinander angeordneten runden Platten, die mit der Drehzahl N_F (der Winkelgeschwindigkeit ω_F) um ihre gemeinsame Achse rotieren. Die Plattenoberflächen tragen eine magnetisierbare Schicht, auf der die Daten abgespeichert

werden können. Die Plattenoberflächen sind in N_{FZ} Spuren eingeteilt, die in konzentrischen Kreisen um die gemeinsame Rotationsachse angeordnet sind. Jeder Plattenoberfläche ist ein Lese-Schreibkopf zugeordnet. Die Köpfe sind an einem gemeinsamen beweglichen Arm befestigt. Alle übereinander angeordneten Spuren, die durch die Lese-Schreibköpfe mit einer vorgegebenen Einstellung des Arms erreicht werden können, nennt man Zylinder.

Jede Spur ist unterteilt in Sektoren der Größe N_{Sk} , die die kleinste adressierbare Dateneinheit bilden. Da die Spuren am äußeren Rand der Platten länger sind als an der Innenseite, können bei einer vorgegebenen maximalen Speicherdichte außen mehr Sektoren untergebracht werden. Deshalb werden die Zylinder in N_{FZo} Zonen mit jeweils konstanter Anzahl von Sektoren je Spur eingeteilt (*zone bit recording*, ZBR) [15, 250]. Der Zonenfaktor f_{Zo} gibt das Verhältnis der Anzahl der Sektoren pro Spur in der äußersten Zone zur innersten Zone an.

Da die Datenübertragungsrate des Laufwerks proportional zur Geschwindigkeit ist, mit der sich die Plattenoberflächen relativ zu den Köpfen bewegen, ist auch die maximal mögliche Datenübertragungsrate des Laufwerks zonenabhängig, und das Verhältnis zwischen äußerster und innerster Zone ergibt ebenfalls den Zonenfaktor. Um auch über Platten- und Zylindergrenzen hinweg die schnellstmögliche Datenübertragungsrate zu ermöglichen, werden die Sektoren versetzt angeordnet (*track skewing*). Während eines Kopf- bzw. Spurwechsels werden durch die Lese-Schreibköpfe im ungünstigsten Fall die Winkel α_{FKW} und α_{FSW} überstrichen. Diese ergeben sich aus der Winkelgeschwindigkeit ω_F und den maximal benötigten Zeiten für einen Kopfwechsel T_{FKW} bzw. für einen Spurwechsel T_{FSW} zu

$$\alpha_{FKW} = \omega_F T_{FKW} \quad \text{und} \quad (6.24)$$

$$\alpha_{FSW} = \omega_F T_{FSW} . \quad (6.25)$$

Da es zu teuer wäre, perfekte Magnetplatten herzustellen, besitzt jede Platte einige defekte Sektoren, die nicht benutzt werden können. Die logische lineare Liste adressierbarer Sektoren wird durch den Festplatten-Controller in eine lineare Folge von physikalischen Sektoren umgesetzt, wobei die unbrauchbaren Sektoren auf brauchbare abgebildet werden (*sparing*). Es gibt mehrere Abbildungsstrategien, die verschiedene Hersteller in unterschiedlichen Kombinationen verwenden. Eine Möglichkeit ist, unbrauchbare Sektoren zu überspringen (*slip sparing*). Die Leistungsfähigkeit der Festplatte wird bei hinreichend großen Anforderungen durch das Überspringen einzelner Sektoren nur unwesentlich beeinflusst. Daher werden unbrauchbare Sektoren im Modell des Magnetplattenspeichers nicht berücksichtigt.

Die Verteilung der Videodaten auf die Sektoren des Magnetplattenspeichers kann durch die verwendete Videodatenbank in unterschiedlicher Weise erfolgen. Besonders vorteilhaft ist die Speicherung der Videobilder in aufeinanderfolgenden Sektoren in der Reihenfolge, in der sie übertragen werden müssen. Ein Beispiel für das Layout der Sektoren einer Festplatte mit

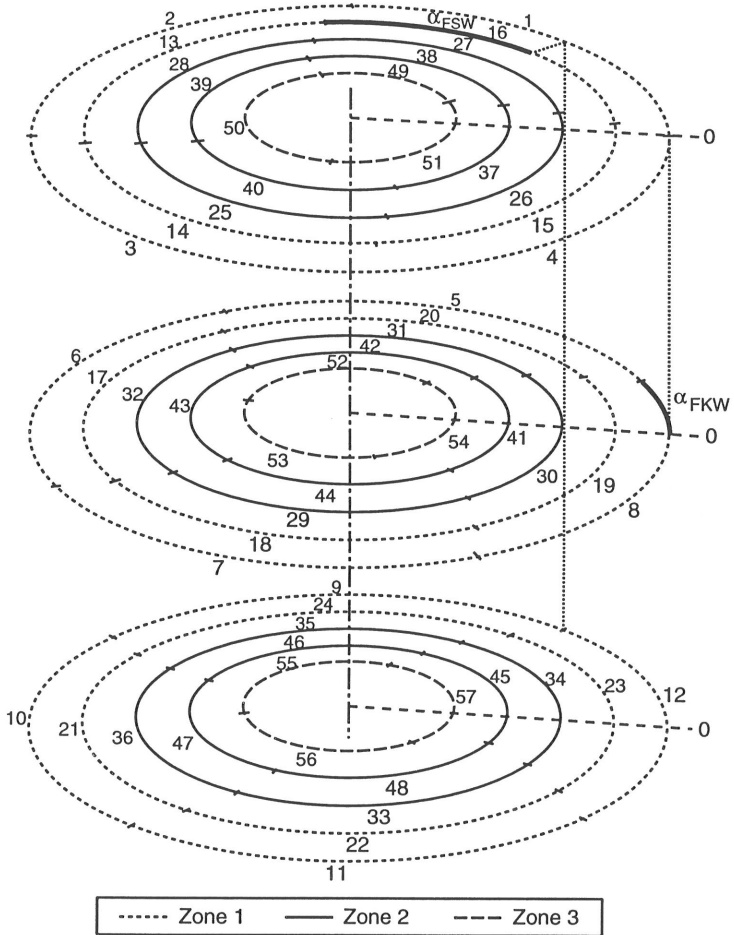


Bild 6.14: Beispiel für das Layout der Sektoren einer Festplatte

$N_{FZo} = 3$ Zonen zeigt Abbildung 6.14. Die beiden äußeren Zonen umfassen jeweils zwei Zylinder mit vier Sektoren pro Spur. Die innerste Zone besitzt nur einen Zylinder mit drei Sektoren pro Spur. Die Adressen $X_{FS} \in \{1, \dots, N_{FS} = 57\}$ beginnen am äußeren Rand der ersten Magnetplatte und durchlaufen die Zylinder Spur für Spur bis zum inneren Rand der letzten Platte.

Um auf die Daten eines Sektors zugreifen zu können, muß der Lese-Schreibarm auf den entsprechenden Zylinder positioniert werden. Die dafür benötigte Zeit wird als Einstellzeit T_{FE} (*seek time*) bezeichnet und ist abhängig von der Einstelldistanz n_{FE} (*seek distance*), das heißt

der Anzahl der Zylinder, die übersprungen werden müssen. Der Positioniervorgang kann im allgemeinen in vier Phasen unterteilt werden [250]:

1. Beschleunigungsphase bis zum Erreichen der halben Wegstrecke oder der maximalen Geschwindigkeit,
2. Freilaufphase (bei großen Positionierbewegungen), bei der der Arm mit maximaler Geschwindigkeit bewegt wird,
3. Bremsphase, bei der der Arm möglichst nahe an der gewünschten Position zur Ruhe gebracht wird,
4. Regelungsphase, in der der Festplatten-Controller den Lesekopf genau auf die gewünschte Position einregelt.

Die Abhängigkeit der Einstellzeit T_{FE} von der Einstelldistanz n_{FE} wird durch das Einstellprofil (*seek profile*) beschrieben, das die vier Phasen des Positioniervorgangs widerspiegelt. Bei sehr kleinen Positioniervorgängen über wenige Zylinder hinweg wird die Einstellzeit durch die Regelungsphase bestimmt. Die dafür benötigte Zeit kann als konstant betrachtet werden. Für längere Positioniervorgänge muß auch die Beschleunigungs- und Bremsphase sowie die Freilaufphase berücksichtigt werden.

Unter der Annahme einer gleichförmigen Beschleunigung und Bremsverzögerung gilt während der Beschleunigungs- und Bremsphase $T_{FE} \sim \sqrt{n_{FE}}$. Während der Freilaufphase kann die Kopfbewegung durch eine gleichförmige Bewegung beschrieben werden, so daß $T_{FE} \sim n_{FE}$ ist. In [23, 250] wird vorgeschlagen, das Einstellprofil durch eine abschnittsweise definierte Funktion mit zwei Abschnitten zu modellieren. In [28] wird eine stetige Funktion verwendet.

Ein Vergleich der beiden Möglichkeiten hat gezeigt, daß beide sehr gut geeignet sind, das Einstellprofil einer Festplatte zu beschreiben. Die zweite Variante kann aber wesentlich einfacher durch Parameter an die Leistungsfähigkeit verschiedener Festplatten angepaßt werden, weshalb diese für eine flexible Modellierung zu bevorzugen ist. Danach wird die Einstellzeit durch die Formel

$$T_{FE} = a + b\sqrt{n_{FE} - 1} + c(n_{FE} - 1) \quad \text{für} \quad n_{FE} \in \{1, 2, \dots, N_{FZ} - 1\} \quad (6.26)$$

beschrieben. Für die Bestimmung der Parameter a , b und c können die minimale Einstellzeit $T_{FE,min}$ (*single cylinder seek time*), die mittlere Einstellzeit $\overline{T_{FE}}$ (*average seek time*) und die maximale Einstellzeit $T_{FE,max}$ (*max-stroke seek time*) verwendet werden. Unter der mittleren Einstellzeit wird dabei die Zeit verstanden, die für eine Positionierung über eine Distanz von $N_{FZ}/3$ Zylinder benötigt wird. Dies ist die mittlere Distanz $\overline{n_{FE}}$, die bei der gleichverteilten Auswahl eines Zylinders der Festplatte durch unabhängige Anforderungen vom Lese-Schreibarm zurückgelegt werden muß (siehe Anhang D).

Damit berechnen sich die Parameter a , b und c für $N_{FZ} \geq 3$ zu

$$a = T_{FE,min} \quad (6.27)$$

$$b = \frac{(N_{FZ} - 3)T_{FE,max} - 3(N_{FZ} - 1)\overline{T_{FE}} + 2N_{FZ}T_{FE,min}}{\sqrt{N_{FZ} - 1}(N_{FZ} - 3) - \sqrt{3}N_{FZ} - 9(N_{FZ} - 1)} \quad (6.28)$$

$$c = \frac{\sqrt{3}N_{FZ} - 9 T_{FE,max} - 3\sqrt{N_{FZ} - 1} \overline{T_{FE}} + (3\sqrt{N_{FZ} - 1} - \sqrt{3}N_{FZ} - 9) T_{FE,min}}{\sqrt{3}N_{FZ} - 9 (N_{FZ} - 1) - \sqrt{N_{FZ} - 1} (N_{FZ} - 3)} \quad (6.29)$$

Für $N_{FZ} \gg 100$, was moderne Festplatten leicht erfüllen, können die Gleichungen 6.27 bis 6.29 durch die Näherungen

$$a = T_{FE,min} \quad (6.30)$$

$$b \approx \frac{3\overline{T_{FE}} - T_{FE,max} - 2T_{FE,min}}{(\sqrt{3} - 1)\sqrt{N_{FZ}}} \quad \text{und} \quad (6.31)$$

$$c \approx \frac{3\overline{T_{FE}} - \sqrt{3}T_{FE,max} - (3 - \sqrt{3})T_{FE,min}}{(\sqrt{3} - 1)N_{FZ}} \quad (6.32)$$

ersetzt werden. Das Einstellprofil, das sich bei den für die Untersuchungen in Abschnitt 6.6 verwendeten Festplattenparametern ergibt, zeigt Abbildung 6.15.

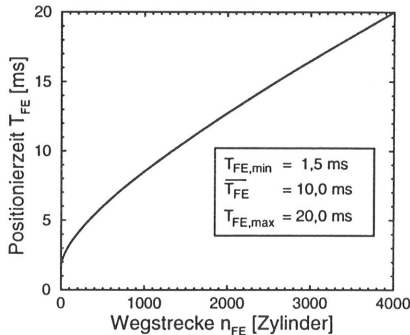


Bild 6.15: Einstellprofil einer Festplatte

Ist der Lese-Schreibarm auf den gewünschten Zylinder positioniert, muß gewartet werden, bis der gesuchte Sektor unter dem entsprechenden Lese-Schreibkopf hindurchläuft. Die Zeitspanne vom Abschluß des Positioniervorgangs bis zum Eintreffen des Beginns des gesuchten

Sektors wird als Latenzzeit T_{FL} (*latency*) bezeichnet. Diese ist abhängig von der Umdrehungszeit $T_{FU} = 1/n_F$ des Magnetplattenspeichers. Werden die gesuchten Sektoren zufällig ausgewählt, ist die Latenzzeit gleichverteilt, und die Verteilungsfunktion $F_{T_{FL}}(t)$ ergibt sich zu

$$F_{T_{FL}}(t) = P\{T_{FL} \leq t\} = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ n_F \cdot t & 0 \leq t \leq T_{FU} \\ 1 & t > T_{FU} \end{cases} \quad (6.33)$$

Die Einstellzeit und die Latenzzeit bilden zusammen die Zugriffszeit.

6.2.5.2 Controller

Der Peripheriebus-Controller ist sowohl für die Interpretation der Peripheriebusbefehle als auch für die Steuerung der Datenübertragung von der Festplatte zur RAID-Steuerung zuständig. Der Festplatten-Controller steuert sämtliche Komponenten der Festplatte, insbesondere den Magnetplattenspeicher, und verwaltet den Festplatten-Cache.

SCSI-2-Geräte bieten optional die Möglichkeit des *Command Queuing*, das heißt eine Festplatte kann bis zu 256 SCSI-Befehle [122] zwischenspeichern, die dann vom Festplatten-Controller nach einer beliebigen Strategie bedient werden können. Bei der einfachsten Bedienstrategie werden die Anforderungen in der Reihenfolge ihres Eintreffens bedient (FIFO). Daneben gibt es viele Möglichkeiten, die Anforderungen umzusortieren, um dadurch die Leistungsfähigkeit der Festplatte zu verbessern [237].

Die Strategie *Shortest Seek Time First* (SSTF) bietet eine optimale Auslastung der Festplatte, ist aber ungeeignet für Anwendungen mit Echtzeitbedingungen, da die Möglichkeit besteht, daß ein Auftrag nie bearbeitet wird (*starvation*). Der Algorithmus *Earliest Deadline First* (EDF) ist für Echtzeitanforderungen optimal, wenn die Bedienung der Aufträge ohne Overhead unterbrochen werden kann. Das ist jedoch bei Festplatten nicht möglich. Zudem ist die notwendige Restbedienzeit von der aktuellen Position der Schreib-Lese-Köpfe abhängig, was die Implementierung dieser Strategie sehr aufwendig macht. Durch eventuell ungünstige Suchvorgänge bei reinem EDF kann es zudem zu einer geringen maximal möglichen Auslastung der Festplatte kommen. Bedienstrategien, die ähnlich dem Fahrstuhlprinzip (SCAN, CSCAN) funktionieren, bilden einen Kompromiß, weil sie die Positioniervorgänge optimieren und gleichzeitig gewährleisten, daß alle Aufträge in endlicher Zeit bedient werden. In dieser Arbeit werden die Strategien FIFO und SCAN verglichen.

6.2.5.3 Halbleiterspeicher

Der Halbleiterspeicher einer modernen Festplatte besteht aus statischem *dual-ported* RAM und enthält einen Anpassungspuffer (*speed-matching buffer*), der benötigt wird, da im allgemeinen die Übertragungsrate des Peripheriebusses höher ist als die Übertragungsrate des

Magnetplattenspeichers. Damit man die höhere Übertragungsrate des Peripheriebusses ausnutzen kann, werden die Daten vom Magnetplattenspeicher zuerst in den Anpassungspuffer übertragen. Dann wird über den Peripheriebus eine Verbindung zum Peripheriebus-Adapter der RAID-Steuerung aufgebaut, und die Daten werden mit der maximal möglichen Übertragungsrate zur RAID-Steuerung übermittelt. Der Anpassungspuffer kann gleichzeitig vom Magnetplattenspeicher mit Daten beschrieben und vom Peripheriebus-Controller gelesen werden. Dadurch können sich die Übertragungen vom Magnetplattenspeicher zum Anpassungspuffer und vom Anpassungspuffer zur RAID-Steuerung überlappen. Um die Antwortzeit zu verbessern, können moderne Festplatten die Übertragung über den Peripheriebus bereits initiieren, bevor alle Daten vom Magnetplattenspeicher in den Anpassungspuffer übertragen sind (*fencing*). Dies wird im Modell jedoch nicht berücksichtigt.

Das statische *dual-ported* RAM, das den Anpassungspuffer enthält, ist bei allen modernen Festplatten erweitert, um einen zusätzlichen Cache (Schnellspeicher, Pufferspeicher) für Lese- und Schreibzugriffe aufzunehmen. Da im Rahmen der Modellierung des Videoservers das Aufspielen der Videofilme auf die Festplatten nicht modelliert wird, genügt es hier, den Cache für Leseanforderungen zu betrachten. Die Größe des Caches wird durch den relativ hohen Preis des statischen *dual-ported* RAM und den an der Festplatte zur Verfügung stehenden Platz begrenzt. Momentan sind 64 kbyte bis 1 Mbyte gängige Größen für Festplatten-Caches.

Durch geeignete Strategien wird versucht, Daten im Cache zu halten, von denen man erwartet, daß sie demnächst benötigt werden. Das heißt, der Festplatten-Controller überprüft bei jeder Leseanforderung, ob sich die gewünschten Daten im Cache befinden. Die Daten einer Leseanforderung, die sich vollständig im Cache befinden (*cache hit*), stehen sofort zur Übertragung bereit. Es treten keinerlei Verzögerungen durch die mechanischen Komponenten des Magnetplattenspeichers auf, weshalb die Daten des Caches wesentlich schneller verfügbar sind als die, die erst vom Magnetplattenspeicher gelesen werden müssen. Daher ist die Modellierung des Caches und der eingesetzten Cache-Strategie von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit des Festplattenmodells [250]. Trifft eine Leseanforderung den Cache nur teilweise, gibt es mehrere Möglichkeiten für deren Bearbeitung. Entweder werden die Daten im Cache ignoriert und alle vom Magnetplattenspeicher gelesen, oder es werden nur die Daten vom Plattenspeicher gelesen, die sich nicht im Cache befinden. Für die Modellierung wird die zweite Variante verwendet (vergleiche auch Abbildung 6.23).

Auch für die Auswahl der Daten, die in den Cache geschrieben werden, gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei den ersten Festplatten mit Cache wurde versucht, die Latenzzeit für das Lesen kompletter Spuren zu minimieren (*on-arrival read-ahead, zero-latency read*), indem sofort nach der Positionierung mit dem Lesen begonnen wurde, so daß nach einer Umdrehung die gesamte Spur zur Übertragung bereitstand. Da jedoch die Speicherdichte der Magnetplattenspeicher schneller wächst als die Größe der Anforderungen, die deswegen meist nur einen Teil einer Spur benötigen, wird diese Art des Caching bei heutigen Festplatten kaum

mehr angewendet. Dagegen ist in vielen Festplatten eine Read-Ahead-Strategie implementiert. Dabei wird davon ausgegangen, daß auch die Daten in unmittelbarer Nachbarschaft der gerade gelesenen in nächster Zeit benötigt werden. Deshalb werden nach dem Lesen der durch die aktuelle Anforderung gewünschten Daten auch die sich daran anschließenden Daten in den Cache geschrieben. Hier wird unterschieden zwischen einfachem Read-Ahead und aggressivem Read-Ahead. Beim einfachen Read-Ahead wird maximal so lange weitergelesen, bis die aktuelle Spur zu Ende ist. Beim aggressiven Read-Ahead werden auch Spur- und Kopfwechsel in Kauf genommen, um weitere Sektoren zu lesen. Aggressives Read-Ahead ist besonders für Anwendungen geeignet, die sequentiell auf Daten zugreifen, also insbesondere auch für sequentielles Lesen von Videodatenströmen.

Da der Cache eine endliche Größe besitzt, müssen bei jedem Schreibvorgang Daten, die sich bereits im Cache befinden, überschrieben werden. Hierfür gibt es mehrere Strategien [149], z. B.:

- RR: Ersetzung zufällig ausgewählter Daten (*Random Replacement*),
- LRU: Ersetzung der am längsten nicht mehr benutzten Daten (*Least Recently Used*),
- LFU: Ersetzung der Daten mit der geringsten Benutzungshäufigkeit (*Least Frequently Used*).

Durch die Strategien LRU und LFU wird versucht, die zeitliche Lokalität einer Anwendung bezüglich ihrer Datenanforderungen auszunutzen. Dabei wird davon ausgegangen, daß schon länger nicht mehr benötigte Daten auch in der nächsten Zukunft nicht benötigt werden. Dadurch läßt sich gegenüber der Strategie RR die Effizienz des Caches steigern, weil die Wahrscheinlichkeit erhöht wird, daß sich die gewünschten Daten im Cache befinden.

Für die Festplatten des Videoservertmodells wird angenommen, daß durch aggressives Read-Ahead bei jeder Anforderung, die Daten vom Magnetplattenspeicher benötigt, n_{FRA} Sektoren (Read-Ahead-Größe) in den Cache geschrieben werden, nicht jedoch die momentan gewünschten Daten. Diese werden nur in den Anpassungspuffer übertragen, weil man davon ausgehen kann, daß beim kontinuierlichen Abspielen eines Videofilms als nächstes die folgenden Bilder benötigt werden und nicht die momentan angeforderten noch einmal. Als Ersetzungsstrategie für die Daten im Cache wird LRU verwendet, wobei einzelne Sektoren im Cache ersetzt werden können.

Damit der Cache möglichst effektiv genutzt werden kann, ist anzustreben, daß die Videodaten durch die Videodatenbank in aufeinanderfolgenden Sektoren gespeichert werden [261]. Da dies durch die Fragmentierung der Festplatte durch wiederholtes Löschen alter und Aufspielen neuer Filme nicht immer möglich ist, wird in [27] vorgeschlagen, den Videofilm in sogenannte Mediensegmente zu unterteilen, die aus einem oder mehreren GOPs bestehen. Eine Unterbrechung kann dann nur an einer Mediensegmentgrenze erfolgen. In [281] wird

ein Layout vorgestellt, bei dem mehrere Videofilme ineinander verschachtelt werden. Eine Möglichkeit für die Verteilung skalierbarer Videodaten (ein Videodatenstrom ist in mehrere Unterströme unterschiedlicher Qualität aufgeteilt) wird in [26] vorgestellt. Da das Abspeichern eines neuen Films oder das Löschen eines alten relativ selten geschieht, wird die dadurch entstehende Fragmentierung der Festplatte vernachlässigt und für die Modellierung vereinfachend davon ausgegangen, daß jeder Videofilm einen zusammenhängenden Adreßbereich einnimmt.

Zusätzlich wird für die Modellierung vorausgesetzt, daß für die Bestimmung der Lage eines physikalischen Sektors keine Zugriffe auf den Magnetplattenspeicher notwendig sind. Schließlich wird vernachlässigt, daß die für die Positionierbewegungen des Lese-Schreibarms benötigten Tabellen für die Motorleistung und deren Zeitdauer wegen der thermischen Ausdehnung einzelner Komponenten von Zeit zu Zeit rekaliert werden müssen. Eine Rekalibrierung wird normalerweise durch Temperatursensoren oder Timer initiiert und kann bis zu 800 Millisekunden dauern. Da dies bei einem Echtzeitsystem, wie einem Videoserver, zu Problemen führen kann, gibt es bereits Bestrebungen, diese Kalibrierungen zu vermeiden oder durch das Betriebssystem des *Host*-Rechners (hier die RAID-Steuerung) zu geeigneten Zeitpunkten zu initiieren [250].

6.3 Protokollarchitektur

Durch den hierarchischen Aufbau des Videoservers müssen die von den Bedienstationen benötigten Videodaten über das Koppelnetz von den Speichersystemen angefordert werden. Die Speichersysteme sind als RAID-Systeme mit lokalem Videodaten-RAM ausgeführt und müssen die Videodaten wiederum von ihren Festplatten anfordern.

Den zeitlichen Ablauf einer Videodatenanforderung durch die Bedienstation bis zum Erhalt der gewünschten Daten zeigt Abbildung 6.16. Der Meldungsablauf ist so dargestellt, wie er im Modell erfolgt. Dabei wird zur Vereinfachung der Modellierung und der Reduktion der Kommunikation zwischen den Modellkomponenten der Beginn einer Datenübertragung und die Übertragungszeit in den Modellkomponenten Peripheriebus und Koppelnetz bestimmt. Diese melden das Ende der Übertragung der jeweils sendenden Komponente (vgl. die Abbildungen 6.16, 6.20, und 6.22).

Der in einer realen Implementierung mögliche Meldungsablauf der Datenübertragung von der Festplatte zur RAID-Steuerung ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Der wesentliche Unterschied zum Meldungsablauf des Modells besteht darin, daß die Festplatte bei erfolgreicher Zuteilung (Arbitrierung) des Busses die Meldung **Bus zugeteilt** für die Zuteilung des Peripheriebusses bekommt und daraufhin der RAID-Steuerung die Meldung **Daten bereit**

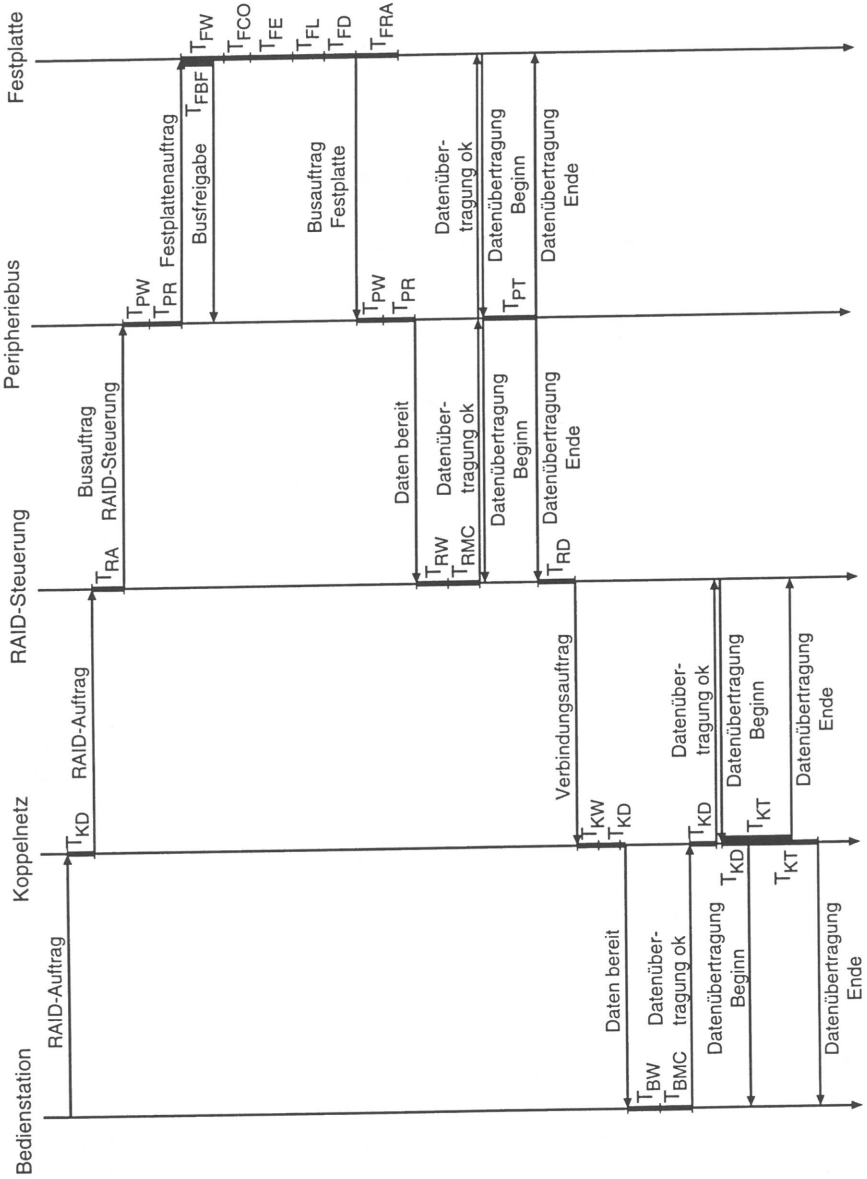


Bild 6.16: Protokoll des Simulationsmodells

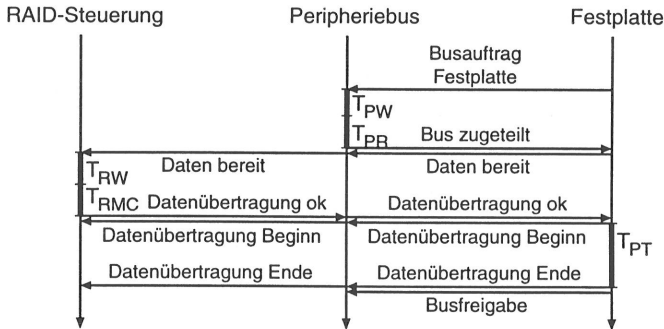


Bild 6.17: Realer Meldungsablauf RAID-Steuerung ↔ Festplatte

schickt. Nach Erhalt der Meldung **Datenübertragung ok** beginnt die Festplatte mit der Datenübertragung (**Datenübertragung Beginn**). Das Ende der Übertragung wird durch die zu übertragende Datenmenge bestimmt (**Datenübertragung Ende**) und schließlich durch **Busfreigabe** der Bus durch die Festplatte wieder freigegeben.

Ein Vergleich der Abbildungen 6.16 und 6.17 zeigt, daß beide Protokolle bezüglich ihres zeitlichen Verhaltens äquivalent sind. Entsprechende Überlegungen lassen sich auch auf die Kommunikation zwischen RAID-Steuerung und Bedienstation anwenden. Die eingetragenen Zeitdauern mit Index W bezeichnen Wartezeiten, bis die entsprechende Komponente in der Lage ist, den eingegangenen Auftrag zu bearbeiten. Alle anderen Zeitdauern kennzeichnen Bearbeitungszeiten.

Für das Protokoll des Peripheriebusses wird davon ausgegangen, daß ein synchroner Paketübertragungsmodus für den Datentransfer verwendet wird, wie er in den Standards SCSI-2 und SCSI-3 vorgesehen ist [268]. Hierbei werden komplette Datenpakete von Puffer zu Puffer übertragen und pakeweise quittiert im Gegensatz zu den ersten Versionen des SCSI-Protokolls, bei denen jeder Übertragungszyklus quittiert werden mußte. Es wird vorausgesetzt, daß pro Auftrag nur ein Datenpaket notwendig ist. Die verschiedenen Zeitdauern werden im nächsten Unterkapitel bei der Modellierung der verschiedenen Systemkomponenten erläutert.

6.4 Modellierung der Systemkomponenten

Einen Überblick über analytische Modellierungsmöglichkeiten für Magnetschichtspeicher gibt [35]. Um die Anwendung analytischer Methoden zu ermöglichen, müssen vereinfachende Annahmen getroffen werden. Die häufigste Annahme ist, daß bei vielen Benutzern die Zwischenankunftsabstände der Anforderungen an den Speicher voneinander unabhängig und

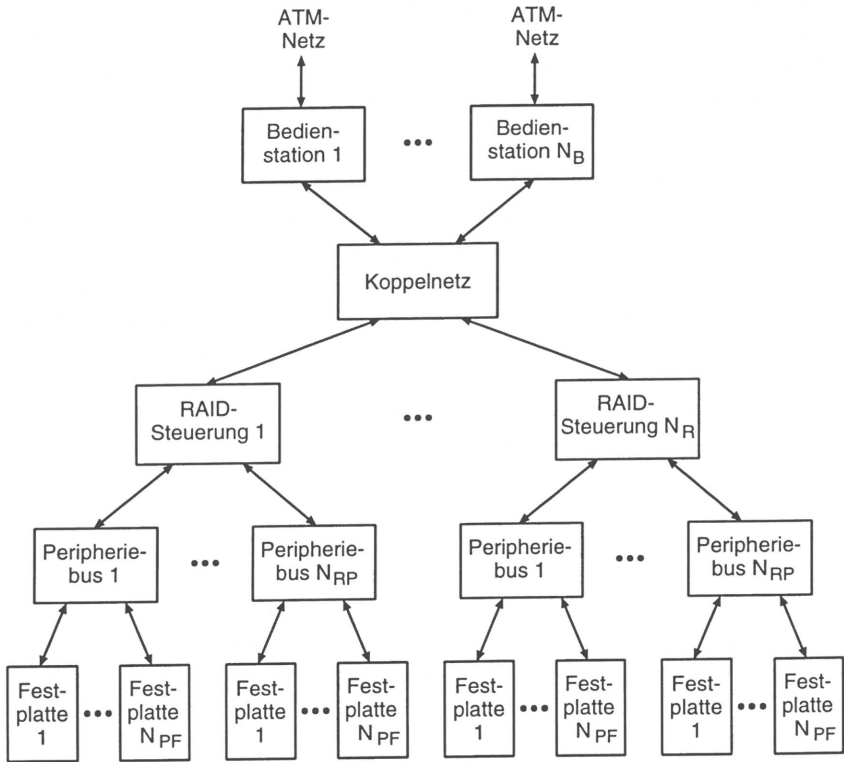


Bild 6.18: Architektur der Modellkomponenten des Videoservers

negativ-exponentiell verteilt sind, das heißt der Ankunftsprozeß einem zeitkontinuierlichen Poisson-Prozeß entspricht. Zusätzlich wird meistens vorausgesetzt, daß die Anforderungen einen zufälligen Bereich des Adreßraums des Speichers auswählen. Beide Annahmen treffen im Fall eines Videoservers nicht zu, da durch jeden Videodatenstrom periodisch Daten angefordert werden, um einen kontinuierlichen Datenfluß zu gewährleisten. Dabei werden durch jeden Videodatenstrom aufeinanderfolgende Adreßbereiche angesprochen (Funktionen wie schneller Vor- und Rücklauf werden nicht berücksichtigt). Durch das nichtlineare und vom Systemzustand abhängige Verhalten einer Festplatte bei derart korrelierten Anforderungen liefern analytische Modelle nur unzureichende Ergebnisse. Zudem besitzen moderne Festplatten schnelle Cache-Speicher, die die Leistungsfähigkeit stark verbessern, aber in analytischen Modellen nicht berücksichtigt werden können.

Werden mehrere Festplatten in einem RAID-System zusammengefaßt, wird die analytische Behandlung des Systems durch die Aufspaltung einer Anforderung und deren synchrone

Abarbeitung durch mehrere Festplatten zusätzlich erschwert. Ein System mit zwei Festplatten (*two server fork-join queue*) ist unter Voraussetzung von Poisson-Ankünften und unabhängigen Bedienzeiten analytisch lösbar. Für mehr als zwei Festplatten ist eine Lösung mit zusätzlichen Näherungen möglich [165, 168, 171, 202].

Da das Ziel dieser Arbeit eine möglichst detaillierte Modellierung aller relevanten Einflußgrößen ist, kann das Gesamtmodell nicht mit analytischen Methoden gelöst werden, sondern wird mit Hilfe der Methoden der ereignisgesteuerten Simulation untersucht. Die hierfür notwendige Abstraktion der Systemkomponenten des Videosevers erfolgt durch ein gemischtes Warteschlangennetz mit Hilfe der Strukturkomponenten aus Tabelle 3.3 in Abschnitt 3.5. Aus Gründen der Übersichtlichkeit gliedert sich das Gesamtmodell in Teilmodelle für die verschiedenen Videosever-Systemkomponenten. Die Schnittstellen zwischen den Teilmodellen bilden mit Namen versehene Aufträge oder Meldungen, die ein Pendant im realen Videosever besitzen. Die hierarchische Architektur des Gesamtmodells und die Anordnung der Modellkomponenten zeigt Abbildung 6.18.

6.4.1 Bedienstation

Das Modell der Bedienstation ist in Abbildung 6.19 dargestellt und umfaßt die Erzeugung der Festplattenaufträge für N_{BV} Videodatenströme sowie die Verwaltung dieser Ströme und des Videodatenspeichers. Die Erzeugung der Festplattenaufträge für die N_{BV} Videodatenströme erfolgt durch die N_{BV} Generatoren G_1 bis $G_{N_{BV}}$. Diese erzeugen RAID-Aufträge, die entsprechend dem in Abbildung 6.3 beschriebenen Algorithmus n_{RA} Blöcke von einem RAID-System anfordern. Zwischen der Erzeugung der RAID-Aufträge liegt die Zeitspanne T_{BR} , deren Dauer von der Anzahl n_{BVB} der angeforderten Videobilder abhängt.

Der Videodatenspeicher wird durch die beiden Warteschlangen **Video-RAM frei** und **Video-RAM belegt** mit wahlfreier Abfertigungsstrategie modelliert. Die Anzahl der Warteplätze N_{BM} entspricht der maximalen Anzahl der Blöcke, die sich im Videodatenspeicher befinden können. Die Warteschlange **Video-RAM frei** wird mit N_{BM} Anforderungen (Synchronisatinstoken) initialisiert, was einem leeren Videodatenspeicher entspricht.

Stehen die durch einen RAID-Auftrag angeforderten Videodaten im RAID-System bereit, wird dies der Bedienstation durch die Meldung **Daten bereit** angezeigt, die in die Eingangswarteschlange eingetragen wird. Enthält die Warteschlange **Video-RAM frei** noch n_{RA} Synchronisatinstoken, das heißt ist im Videodatenspeicher noch Platz für n_{RA} Blöcke vorhanden, wird nach der Bearbeitungszeit T_{BMC} an das entsprechende RAID-System die Meldung **Datenübertragung ok** geschickt. Daraufhin werden die Videodaten über das Koppelnetz vom RAID-System zur Bedienstation übertragen. Den Beginn der Übertragung markiert die Meldung **Datenübertragung Beginn** und das Ende die Meldung **Datenübertragung Ende**.

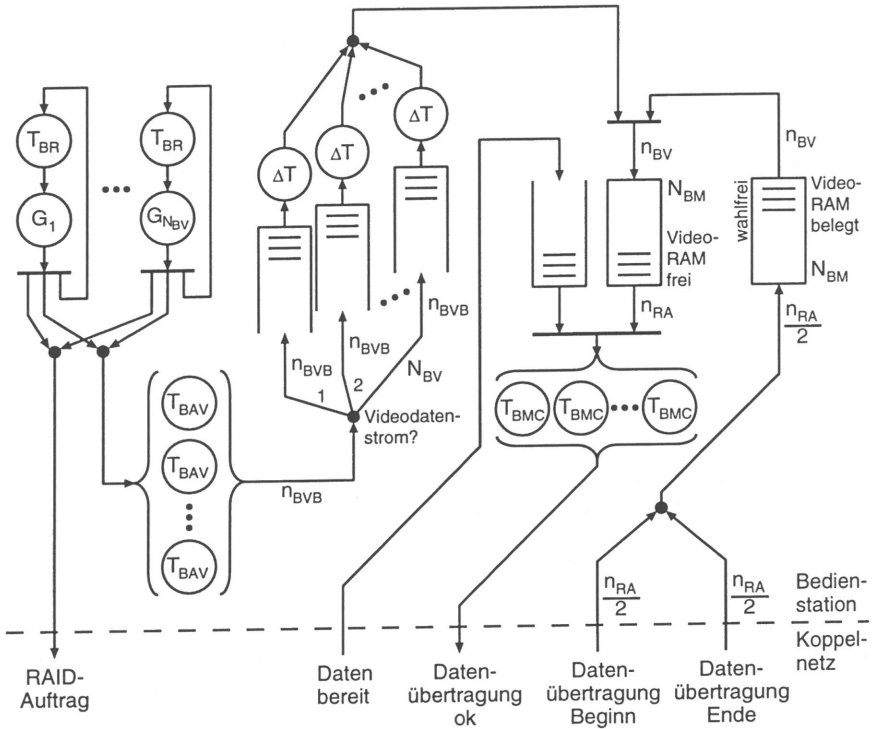


Bild 6.19: Modell einer Bedienstation

Nach der Übertragung hat sich die Anzahl der Anforderungen in der Warteschlange Video-RAM belegt entsprechend den n_{RA} Blöcken, die der RAID-Auftrag angefordert hat, um n_{RA} erhöht.

Die Funktionen des ATM-Controllers werden durch N_{BV} Warteschlangen und Bedieneinheiten mit der konstanten Bediendauer ΔT modelliert. Jedem Videodatenstrom ist eine Warteschlange mit Bedieneinheit zugeordnet. Nach der konstanten Ausspielverzögerung T_{BAV} werden durch jeden Generator eines Videodatenstroms bei der Generierung eines RAID-Auftrags n_{BVB} Anforderungen, die n_{BVB} Videobildern entsprechen, in die Warteschlange eingereiht, die der Nummer des Videodatenstroms entspricht. Das Bedienende markiert den Zeitpunkt, zu dem ein Videobild vollständig gesendet ist. Zu diesem Zeitpunkt können die n_{BV} Blöcke des Videobilds aus dem Videodatenspeicher gelöscht werden, die von keinem anderen Bild benötigt werden. Dies geschieht durch die auf die Bedieneinheiten des ATM-Controllers folgende Transition, die beim „Feuern“ n_{BV} Anforderungen aus der Warteschlange Video-RAM belegt in die Warteschlange Video-RAM frei transferiert.

Unter Umständen können die Videodaten durch das Speichersystem nicht rechtzeitig zur Verfügung gestellt werden (*time out*). In diesem Fall, der bei einem realen Videoserver nicht oder nur äußerst selten auftreten sollte, müssen vom Videoserver in Zusammenarbeit mit dem Endgerät des Kunden entsprechende Maßnahmen getroffen werden, wie z. B. das Wiederholen des vorhergehenden Bildes. Für die Modellierung wird angenommen, daß die zu spät eintreffenden Videodaten aus dem Video-RAM gelöscht werden, sobald die Übertragung beendet ist. Dieser Vorgang ist aus Gründen der Übersichtlichkeit in Abbildung 6.19 nicht enthalten.

6.4.2 Koppelnetz

Das Modell des Koppelnetzes beschreibt die Ende-zu-Ende-Verzögerung T_{KD} zwischen den Bedienstationen und den RAID-Systemen, die Wegesuche der Meldungen sowie die Aufteilung der Verbindung auf verschiedene Videodatenströme. In Abbildung 6.20 ist das Modell für die Verbindung zwischen einer Bedienstation und deren RAID-Systemen dargestellt.

Da bis zu N_{KA} Videodatenströme eine Verbindung zwischen einer Bedienstation und einem RAID-System parallel benutzen können, wird die geschlossene Warteschlange des Modells mit N_{KA} Synchronisationstoken initialisiert. Der Bitratenbedarf der Signalisiermeldungen wird gegenüber dem Bedarf der Videodatenübertragung im Modell vernachlässigt. Daher werden die Meldungen **RAID-Auftrag** und **Datenübertragung ok** der Bedienstation durch Bedieneinheiten mit der konstanten Bedienzeit T_{KD} verzögert, bis sie an die entsprechende RAID-Steuerung weitergeleitet werden. Stehen in einem RAID-System Daten zur Übertragung bereit, wird dies durch die Meldung **Verbindungsauftrag** signalisiert. Ist noch mindestens ein Synchronisationstoken vorhanden, ist die Datenübertragung möglich. Die Anzahl der Synchronisationstoken wird um eins verringert, und nach der Signalverzögerung T_{KD} erhält die Bedienstation die Meldung **Daten bereit**.

Das RAID-System zeigt den Beginn der Datenübertragung durch den Auftrag **Datenübertragung Beginn** an. Dieser wird nach der Signallaufzeit T_{KD} an die Bedienstation weitergeleitet. Nach der Übertragungsdauer T_{KT} wird dem RAID-System das Ende der Datenübertragung durch die Meldung **Datenübertragung Ende** mitgeteilt. Beide Aufträge enthalten jeweils $n_{RA}/2$ Anforderungen, die der Übertragung von $n_{RA}/2$ Blöcken entsprechen. Somit stehen nach der Übertragung $n_{RA}/2$ Blöcke im Speicher der Bedienstation bereit. Zudem kann durch diese Art der Aufspaltung der Anforderungen mit einer einfachen zeitdiskreten Integral-Statistik die mittlere Auslastung des Video-RAMs der Bedienstation bestimmt werden, die sich bei der kontinuierlichen Übertragung der Videodaten über das Koppelnetz ergibt. Nach der Zeit $T_{KT} + T_{KD}$ sind alle Videodaten an der Bedienstation angekommen, und auch sie erhält die Meldung **Datenübertragung Ende**. Gleichzeitig mit dem Ende der

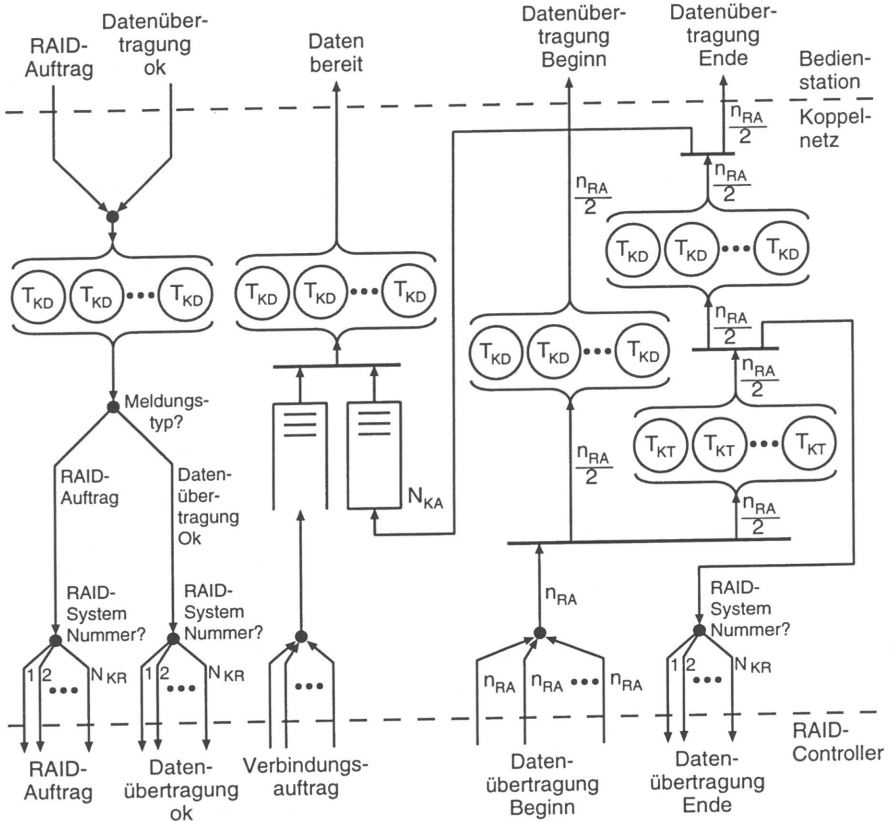


Bild 6.20: Modell eines Koppelnetzes

Datenübertragung wird ein Synchronisationstoken in die Synchronisations-Warteschlange zurückgegeben.

6.4.3 RAID-Steuerung

Die Modellierung der RAID-Steuerung umfaßt die Bearbeitung der RAID-Aufträge und die Verwaltung des Video-RAMs. Dabei wird angenommen, daß die Bestimmung der Sektoradressen lokal in der RAID-Steuerung geschieht, also die Verzeichnis-Struktur des RAID-Systems im RAID-RAM zur Verfügung steht, so daß hierfür keine Festplattenzugriffe notwendig sind. Weiterhin wird angenommen, daß die Leistungsfähigkeit des Systembusses ausreichend ist, damit die Datenübertragungen von den Peripheriebus-Adaptoren ins Video-RAM

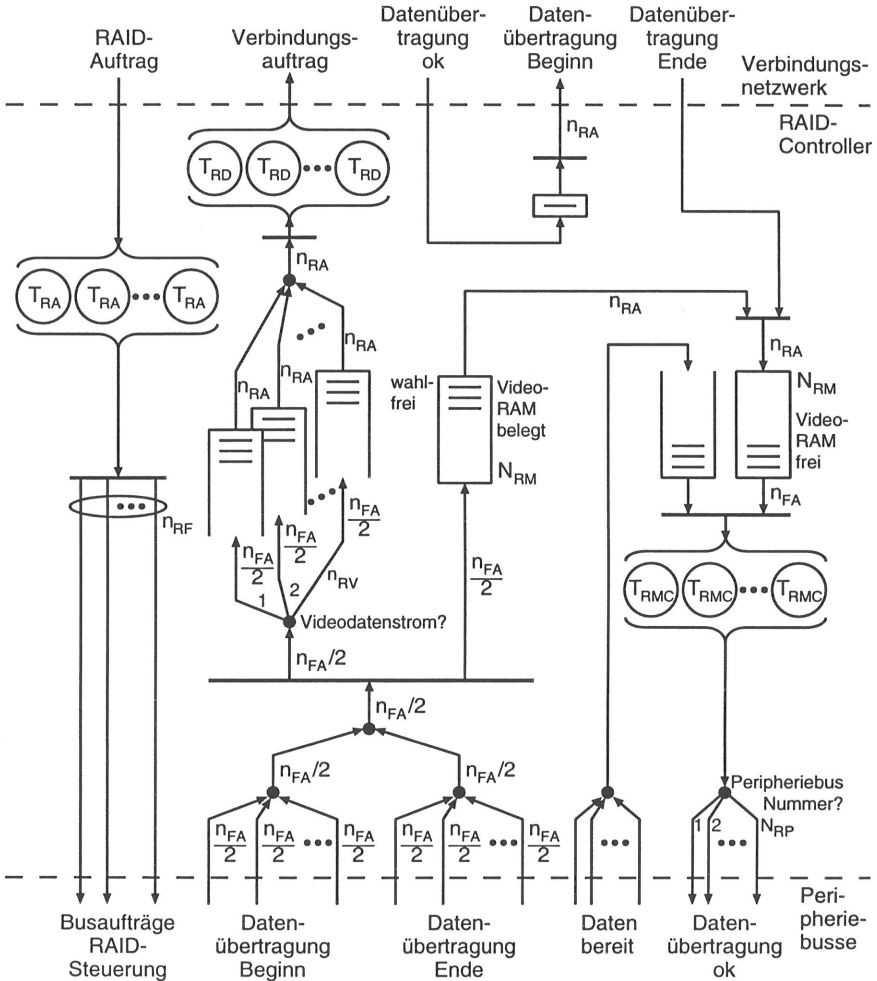


Bild 6.21: Modell einer RAID-Steuerung

und vom Video-RAM zum Netz-Adapter unabhängig und parallel erfolgen können und die Erzeugung der Festplattenaufträge durch den RAID-Controller dadurch nur unwesentlich beeinträchtigt wird.

Das Modell der RAID-Steuerung zeigt Abbildung 6.21. Die Bearbeitung der RAID-Aufträge wird durch n_{RV} Verwaltungswarteschlangen modelliert, wobei n_{RV} die Anzahl der Videodatenströme ist, die vom RAID-System Daten anfordern. Das Video-RAM wird durch zwei

Warteschlangen, davon eine mit wahlfreier Abfertigungsstrategie, modelliert. Die eine (**Video-RAM belegt**) enthält Anforderungen, die den von den Festplatten übertragenen Sektoren entsprechen. Die andere (**Video-RAM frei**) enthält so viele Anforderungen (Synchronisationstoken), wie noch freie Sektoren im Video-RAM zur Verfügung stehen. Diese Warteschlange wird vor Simulationsbeginn mit N_{RM} Synchronisationstoken initialisiert, die dem leeren Videodatenpeicher entsprechen.

Ein eintreffender RAID-Auftrag wird durch die RAID-Steuerung in n_{RF} Festplattenaufträge aufgeteilt, wobei n_{RF} unterschiedliche Werte annehmen kann (n_{RF} ist eine Zufallsvariable). Diese werden als **Busaufträge RAID-Steuerung** an die entsprechenden Modellkomponenten der Peripheriebusse weitergegeben. Für die Umsetzung eines RAID-Auftrags benötigt die RAID-Steuerung die Zeit T_{RA} .

Hat eine Festplatte die angeforderten n_{FA} Sektoren zur Übertragung bereitgestellt, schickt sie über ihren Peripheriebus die Meldung **Daten bereit** an die RAID-Steuerung, die in die Eingangswarteschlange eingetragen wird. Enthält die Warteschlange **Video-RAM frei** die n_{FA} notwendigen Synchronisationstoken, d.h. können die Daten noch vom Video-RAM aufgenommen werden, wird nach der Bearbeitungszeit T_{RMC} über den entsprechenden Peripheriebus die Meldung **Datenübertragung ok** an die Festplatte geschickt.

Der Beginn der Datenübertragung wird durch die Meldung **Datenübertragung Beginn** angezeigt. Dadurch werden in die Warteschlange **Video-RAM belegt** $n_{FA}/2$ Anforderungen eingetragen. Die restlichen $n_{FA}/2$ Anforderungen werden bei Beendigung der Übertragung (**Datenübertragung Ende**) eingetragen. Gleichzeitig werden jeweils $n_{FA}/2$ Anforderungen in die dem anfordernden RAID-Auftrag entsprechende Verwaltungswarteschlange eingetragen.

Ein RAID-Auftrag ist komplett, wenn die entsprechende Verwaltungswarteschlange n_{RA} Anforderungen (entsprechend den n_{RA} angeforderten Sektoren) enthält. Daraufhin wird durch die RAID-Steuerung nach der Bearbeitungsdauer T_{RD} durch einen **Verbindungsauftrag** vom Koppelnetz eine Verbindung für die Übertragung der bereitstehenden Daten angefordert. Nach Erhalt der Meldung **Datenübertragung ok** wird dem Modell des Koppelnetzes durch die Meldung **Datenübertragung Beginn** der Beginn der Datenübertragung angezeigt. Nach Beendigung der Datenübertragung (**Datenübertragung Ende**) werden die n_{RA} übertragenen Sektoren in der **Video-RAM belegt** Warteschlange gelöscht, und in die **Video-RAM frei** Warteschlange werden n_{RA} Synchronisationstoken zurückgegeben.

6.4.4 Peripheriebus

Die Modellierung des Peripheriebusses zeigt Abbildung 6.22. Sie umfaßt die Zuteilung (Arbitrierung) des Busses an die anfordernden Festplatten oder die RAID-Steuerung, die Auswahl

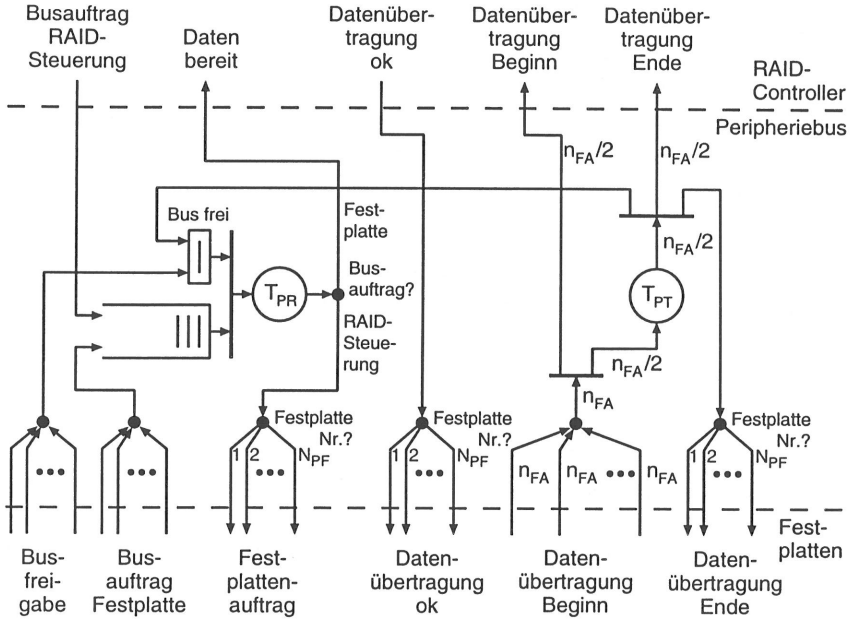


Bild 6.22: Modell eines Peripheriebusses

der entsprechenden Festplatte und die Datenübertragung von der Festplatte zur RAID-Steuerung. Das Modell wird zu Beginn mit einem Bus frei-Token initialisiert, das dann während des weiteren Simulationsverlaufs im Modell kreist. Alle Busaufträge werden in eine Warteschlange eingereiht. Ist die Warteschlange Bus frei mit dem Bus frei-Token belegt, kann die nachfolgende Transition „feuern“, und der nächste Busauftrag wird bearbeitet. Nach der für die Reservierung notwendigen Reservierungszeit T_{PR} wird dann die Busreservierung der entsprechenden Festplatte durch einen Festplattenauftrag oder der RAID-Steuerung durch eine Daten bereit-Meldung angezeigt. Die Reservierungszeit T_{PR} beinhaltet auch den Overhead, der für die Datenübertragung notwendig ist.

Nach der Zuteilung des Busses an eine Festplatte wird der Beginn einer Datenübertragung von n_{FA} Sektoren von der Festplatte durch die Meldung Datenübertragung Beginn angezeigt. Diese Meldung wird durch eine Transition in zwei Meldungen mit jeweils $n_{FA}/2$ Sektoren aufgespalten, wovon die erste direkt (Datenübertragung Beginn) und die zweite (Datenübertragung Ende) um die Übertragungszeit $T_{PT} = n_{FA} \cdot N_{Sk} / \lambda_P$ verzögert an die RAID-Steuerung weitergegeben wird. Dabei ist λ_P die Nutzdatenübertragungsrates des Peripheriebusses. Das Ende der Übertragung wird der Festplatte mitgeteilt (Datenübertragung Ende) und das Bus frei-Token wird in die Warteschlange Bus frei zurückgegeben. Verzöge-

rungen der Signale durch Laufzeiten auf dem Peripheriebus werden nicht berücksichtigt, da diese bei einer Ausdehnung des Busses von wenigen Metern um Größenordnungen kleiner sind als die Übertragungszeiten der Videodatenpakete.

Wurde der momentane Busauftrag von der RAID-Steuerung initiiert, wird durch die angesprochene Festplatte nach Bearbeitung des Festplattenauftrags (vergleiche Abbildung 6.23) durch die Meldung *Busfreigabe* das *Bus frei*-Token zurückgegeben.

6.4.5 Festplatte

Das Modell der Festplatte zeigt Abbildung 6.23. Es umfaßt die im Blockschaltbild (Abbildung 6.13) enthaltenen Komponenten Peripheriebus-Controller, Festplatten-Controller, Halbleiterspeicher und Magnetplattenspeicher. Es enthält vier begrenzte Warteschlangen mit einem Warteplatz für Synchronisationstoken. Die beiden Warteschlangen des Festplatten-Controllers werden mit einem Token initialisiert, um dadurch dem Festplatten-Controller zu signalisieren, daß im Moment weder eine Datenübertragung über den Peripheriebus stattfindet noch Daten vom Magnetplattenspeicher in den Halbleiterspeicher übertragen werden.

Kommt ein Festplattenauftrag an, wird dieser durch den Peripheriebus-Controller in die Warteschlange des Festplatten-Controllers eingereiht, und der Peripheriebus wird nach der Busfreigabezeit T_{FBF} , die der Peripheriebus-Controller zur Protokollbearbeitung benötigt, wieder freigegeben.

Wird durch die Festplatte gerade keine Anforderung bearbeitet (beide Synchronisationstoken des Festplatten-Controllers vorhanden), wird durch den Festplatten-Controller aus der Warteschlange der nächste Auftrag ausgewählt. Ist keiner der gewünschten n_{FA} Sektoren im Cache vorrätig, wird ein Auftrag an den Magnetplattenspeicher geschickt. Sind die Sektoren teilweise vorrätig, wird ein Auftrag an den Magnetplattenspeicher und ein Synchronisationstoken für das Auslesen der vorrätigen gewünschten n_{FC} Sektoren des Caches abgeschickt. Das Synchronisationstoken wird benötigt, weil die Warteschlange, die den Cache modelliert, i. allg. vollständig gefüllt ist und damit die folgende Transition ohne Synchronisationstoken ständig aktiviert wäre und Daten für die Übertragung bereitstellen würde. Befinden sich alle Daten im Cache, wird gleichzeitig mit dem Synchronisationstoken durch einen *Busauftrag Festplatte* eine Verbindung über den Peripheriebus angefordert. Die Zeit, die der Festplatten-Controller zur Bearbeitung einer Anforderung und zur Veranlassung der erforderlichen Aktionen benötigt, wird durch die Bedieneinheit mit der konstanten Controller-Overhead-Zeit T_{FCO} modelliert.

Ein Auftrag an den Magnetplattenspeicher durchläuft zuerst drei Bedieneinheiten für die Einstellzeit T_{FE} , die Latenzzeit T_{FL} und die Datenlesezeit T_{FD} . Die Einstellzeit und die Latenzzeit sind abhängig von der Lese-Schreibarm-Position nach Bearbeitung des letzten

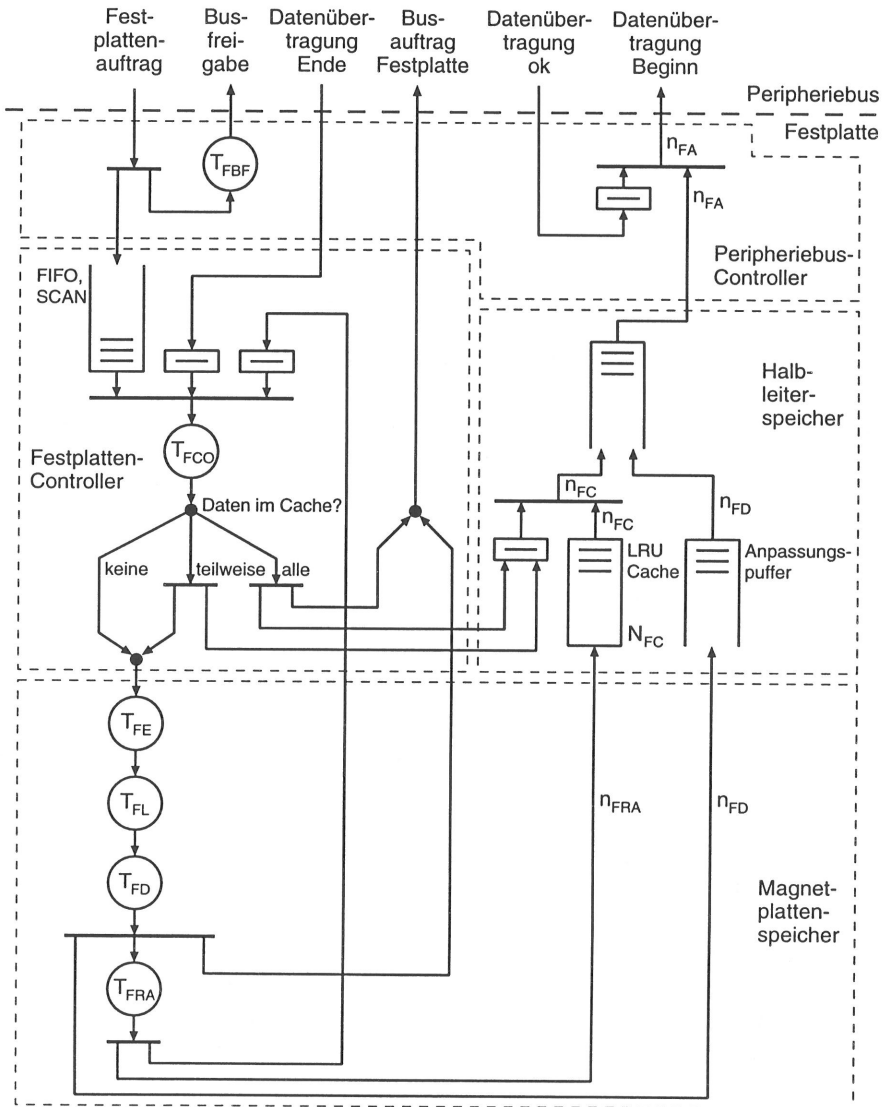


Bild 6.23: Modell einer Festplatte

Auftrags und der Lage des ersten gewünschten Sektors des momentan zu bearbeitenden Auftrags. Die Datenlesezeit hängt ab von der Anzahl der zu lesenden Sektoren n_{FD} und der Anzahl der notwendigen Kopf- und Spurwechsel.

Nach dem Lesevorgang werden die n_{FD} Sektoren zum Anpassungspuffer übertragen und gleichzeitig ein **Busauftrag Festplatte** an den Peripheriebus geschickt. Nach dem Lesen der benötigten Sektoren wird bei jedem Magnetplattenspeicherzugriff ein aggressives Read-Ahead durchgeführt. Während der Zeitspanne T_{FRA} werden n_{FRA} weitere Sektoren gelesen und in den Cache geschrieben, wobei die Sektoren im Cache, die am längsten nicht mehr benutzt wurden, überschrieben werden (LRU).

Der Halbleiterspeicher wird durch drei Warteschlangen modelliert. Eine begrenzte Warteschlange mit Platz für N_{FC} Anforderungen modelliert den Cache, wobei jede Anforderung jeweils einem Sektor entspricht. Da bei der Modellierung davon ausgegangen wird, daß der Anpassungspuffer groß genug ist, um die Daten einer beliebigen Anforderung aufzunehmen, wird dieser durch eine unbegrenzte Warteschlange modelliert. Zusätzlich braucht man für die Modellierung eine dritte unbegrenzte Warteschlange, die in der Realität keine direkte Entsprechung hat. Sie dient zur Aufnahme der zur Übertragung über den Peripheriebus bereitstehenden Daten und wird benötigt, damit die beliebige Aufteilung der gewünschten n_{FA} Sektoren in n_{FC} Sektoren aus dem Cache und n_{FD} Sektoren vom Magnetplattenspeicher möglich ist, wobei gelten muß

$$n_{FA} = n_{FC} + n_{FD} \quad \text{mit} \quad \begin{cases} n_{FC} \in \{0, 1, \dots, N_{FC}\} \\ n_{FD} \in \{0, 1, \dots, N_{FS}\} \end{cases} . \quad (6.34)$$

Ein **Busauftrag Festplatte** wird durch das Modell des Peripheriebusses mit der Meldung **Datenübertragung ok** beantwortet, sobald der Bus für die Festplatte verfügbar ist. Erst dann wird der Beginn der Datenübertragung der n_{FA} Sektoren dem Peripheriebus durch die Meldung **Datenübertragung Beginn** angezeigt. Sind alle Sektoren übertragen, meldet dies das Peripheriebusmodell dem Festplattenmodell durch die Meldung **Datenübertragung Ende**, und die Festplatte ist zur Bearbeitung des nächsten Festplattenauftrags bereit.

6.5 Modellparameter

In diesem Abschnitt werden die Werte der Parameter des Modells des Videoservers aus Abschnitt 6.4 zusammengestellt, die für die Leistungsuntersuchungen in Abschnitt 6.6 Verwendung finden.

6.5.1 Bedienstation und Videofilmarchiv

Die statistischen Bildgrößen des Videofilmarchivs, das den Bedienstationen zur Verfügung steht, werden unter Verwendung des ffGn-Zufallszahlengenerators aus Abschnitt 3.3.4 erzeugt. Die Parameter des Generators sind so gewählt, daß die Videofilme des Archivs ähnliche Eigenschaften besitzen wie die in Abschnitt 4.2 untersuchten empirischen MPEG-codierten Videodaten. Eine Übersicht der Parameter des ffGn-Zufallszahlengenerators, die für die Erzeugung des Videofilmarchivs verwendet wurden, gibt Tabelle 6.1.

Parameter	Variable	Wert
Hurst-Parameter	H	0,856
Basis	B	1,1
Qualität	Q	20
Anzahl Zufallszahlen	n_{ffGn}	10000

Tabelle 6.1: Parameter des ffGn-Zufallszahlengenerators

Die statistischen Eigenschaften der Videodatenströme, die sich aus den Videofilmen des Archivs ergeben, zeigt Tabelle 6.2.

Parameter	Variable	Wert
Bilddarstellungsdauer [ms]	ΔT	40
Mittlere Datenrate [Mbit/s]	$\overline{R_V}$	1,8125
Mittlere codierte Bildgröße [kbit]	$E[X_b]$	72,5
Mittlere Größe der I-Bilder [kbit]	$E[X_{b,I}]$	181,66
Mittlere Größe der P-Bilder [kbit]	$E[X_{b,P}]$	103,12
Mittlere Größe der B-Bilder [kbit]	$E[X_{b,B}]$	44,11
Varianz der I-Bilder [kbit^2]	$\text{VAR}[X_{b,I}]$	1931,1
Varianz der P-Bilder [kbit^2]	$\text{VAR}[X_{b,P}]$	1192,4
Varianz der B-Bilder [kbit^2]	$\text{VAR}[X_{b,B}]$	198,7
GOP-Folge		IBBPBBPBB

Tabelle 6.2: Statistische Kenngrößen der Videofilme

Die Zeit T_{BMC} , die der Videostrom-Controller für die Bearbeitung einer Meldung **Daten bereit** benötigt, wird zu 100 μs gewählt. Die Ausprägung der Zufallsvariablen T_{BR} ergibt sich automatisch bei der Generierung der RAID-Anforderungen durch die Generatoren G_1 bis $G_{N_{BV}}$. Die minimal notwendige Ausspielverzögerung T_{BAV} ist abhängig von der Auslastung der RAID-Systeme, die die Bedienstation benutzt (siehe Abschnitt 6.6.3).

Für die Leistungsuntersuchungen werden zwei Videofilmarchive verwendet, die sich auf einer Festplatte oder neun Festplatten unterbringen lassen. Diese Videofilmarchive wurden

unabhängig von den Leistungsuntersuchungen erzeugt und sind realitätsnah in mehrere Videofilme untergliedert. Dadurch wird gewährleistet, daß alle Untersuchungen miteinander vergleichbar sind und diese bei mehreren Videodatenströmen auch denselben Videofilm auswählen können. Die Parameter der jeweils verwendeten Videofilmarchive zeigt Tabelle 6.3. Die Länge L_V der Videofilme wurde für die Untersuchung einer einzelnen Festplatte konstant gewählt. Für die Untersuchung des RAID-Systems und der Bedienstation sind die Längen über den angegebenen Bereich gleichverteilt.

Parameter	Variable	Wert
1 Festplatte		
Archivgröße [Gbyte]	N_A	4
Gesamtzahl der Videobilder	N_{AB}	474282
Anzahl der Videofilme	N_{BF}	32
Länge eines Videofilms [min]	L_V	10
9 Festplatten		
Archivgröße [Gbyte]	N_A	36
Gesamtzahl der Videobilder	N_{AB}	4266242
Anzahl der Videofilme	N_{BF}	50
Länge eines Videofilms [min]	L_V	30 ... 90

Tabelle 6.3: Parameter der Videofilmarchive

6.5.2 Koppelnetz

Für die Wahl der Parameter des Koppelnetzes wird angenommen, daß dieses für jede Verbindung zu einer Bedienstation oder einem RAID-System eine physikalische Bitrate von 622,08 Mbit/s zur Verfügung stellt. Jede 27. ATM-Zelle ist für OAM-Maßnahmen der Bitübertragungsschicht reserviert. Bei einer Nutzlast von 47 byte für die verbleibenden Zellen ergibt sich damit eine Nutzbitrate für eine Verbindung von $C_{KV} = 532$ Mbit/s. Vergleiche haben gezeigt, daß für die in Abschnitt 6.6 untersuchte Konfiguration die Burst-Bitrate der Videodatenströme am günstigsten gleich der Nutzbitrate der Verbindung gewählt wird. Die

Parameter	Variable	Wert
Nutzbitrate einer Verbindung [Mbit/s]	C_{KV}	532
Burst-Übertragungsbitrate [Mbit/s]	C_{KB}	532
Ende-zu-Ende-Verzögerung [ms]	T_{KD}	1,0

Tabelle 6.4: Parameter des Koppelnetzes

Ende-zu-Ende-Verzögerung wird auf 1,0 ms festgesetzt. Die verwendeten Parameter sind in Tabelle 6.4 zusammengefaßt.

6.5.3 RAID-Steuerung

Da für RAID-Systeme, wie sie für die Modellierung des Videosevers verwendet werden, in der Literatur bisher keine Leistungsdaten veröffentlicht wurden, wird für alle Bearbeitungszeiten ein Wert von 100 μs angenommen. Die Blockgröße wird auf $N_{BI} = 1024$ byte festgesetzt. Eine Übersicht über die gewählten Parameter gibt Tabelle 6.5.

Parameter	Variable	Wert
Blockgröße [byte]	N_{BI}	1024
Bearbeitungszeit RAID-Auftrag [μs]	T_{RA}	100
Bearbeitungszeit Video-RAM Überprüfung [μs]	T_{RMC}	100
Bearbeitungszeit Datenübertragung [μs]	T_{RD}	100

Tabelle 6.5: Parameter der RAID-Steuerung

6.5.4 Peripheriegerätebus

Die Parameter des Peripheriebusses werden entsprechend der Leistung eines SCSI-Busses [5, 250] gewählt und sind in Tabelle 6.6 zusammengestellt. Die Datenübertragungsrate $\lambda_P = 9,54$ Mbyte/s, mit der die Daten eines Festplattenauftrags von der Festplatte zur RAID-Steuerung übertragen werden, wurde für einen SCSI-2-Bus mit Synchronbetrieb gewählt.

Parameter	Variable	Wert
Datenübertragungsrate [Mbyte/s]	λ_P	9,54
Reservierungs-Overhead [μs]	T_{PR}	5

Tabelle 6.6: Parameter des Peripheriebusses

6.5.5 Festplatte

Für die Bestimmung der Parameter einer Festplatte gibt es mehrere Möglichkeiten. Sie können den technischen Beschreibungen der Festplatten oder Veröffentlichungen [15, 23, 28, 237, 250, 266] entnommen werden, bei denen fehlende Parameter durch Messungen ermittelt wurden. Bei Festplatten mit SCSI-Interface gibt es auch die Möglichkeit, Parameter zu „erfragen“ oder empirisch durch Testaufträge zu ermitteln [288]. Das Ziel dieser Arbeit

Parameter	Variable	Wert
Kapazität [Sektoren]	N_{FS}	4194000
Sektorgröße [byte]	N_{Sk}	1024
Anzahl Zylinder	N_{FZ}	4000
Anzahl Platten	N_{FP}	15
Anzahl Zonen	N_{FZo}	10
Zonenfaktor	f_{Zo}	1,5
Anzahl Sektoren/Spur der innersten Zone	$N_{FSS,i}$	56
Mittlere Anzahl Sektoren/Spur	$\overline{N_{FSS}}$	69,9
Anzahl Sektoren/Spur der äußersten Zone	$N_{FSS,a}$	84
Drehzahl [1/min]	n_F	7200
Datenübertragungsrate der innersten Zone [Mbyte/s]	$\lambda_{F,i}$	6,72
Mittlere Datenübertragungsrate [Mbyte/s]	$\overline{\lambda_F}$	8,4
Datenübertragungsrate der äußersten Zone [Mbyte/s]	$\lambda_{F,a}$	10,08
Kopfwechselzeit [ms]	T_{FKW}	1,0
Spurwechselzeit [ms]	T_{FSW}	1,5
Minimale Einstellzeit [ms]	$T_{FE,min}$	1,5
Mittlere Einstellzeit [ms]	$\overline{T_{FE}}$	10,0
Maximale Einstellzeit [ms]	$T_{FE,max}$	20,0
Busfreigabezeit [ms]	T_{FBF}	0,2
Controller Overhead [ms]	T_{FCO}	1,5
Cache Größe [Mbyte]	N_{FC}	1,0

Tabelle 6.7: Parameter der Festplatte

soll nicht die möglichst exakte Nachbildung eines bestimmten Festplattentyps sein, sondern die Modellierung der charakteristischen Verhaltensweisen eines solchen Geräts. Deshalb wurden die Parameter für die Untersuchungen des Videoservers in Anlehnung an die momentan existierenden technischen Möglichkeiten gewählt. Eine Zusammenstellung zeigt Tabelle 6.7.

6.6 Leistungsuntersuchung und Dimensionierung

Da die Auswahl eines Videos durch den Benutzer zufällig geschieht, spielt es für die Speichersysteme keine Rolle, von welcher Bedienstation die Videodatenströme verwaltet werden, solange das Koppelnetz ausreichend dimensioniert ist und keinen Engpaß darstellt. Für die Auslegung der Bedienstation wiederum ist es wichtig, welche Antwortzeiten die Speichersysteme haben. Die Anzahl der Speichersysteme spielt besonders dann eine Rolle, wenn die Last asymmetrisch verteilt ist. Exemplarisch wird im folgenden die Leistungsfähigkeit eines

Videoservers mit $N_B = 1$ Bedienstation und $N_S = 1$ RAID-Speichersystem untersucht. Zuerst wird das Verhalten nur einer Festplatte unter den Anforderungen eines oder mehrerer Videodatenströme untersucht. Für die Untersuchung des RAID-Systems und der Bedienstation wird ein RAID-System mit $N_{RF} = 9$ Festplatten verwendet.

6.6.1 Festplatte

In diesem Abschnitt wird die Leistungsfähigkeit einer einzelnen Festplatte untersucht, d.h. das verwendete RAID-System besitzt $N_{RP} = 1$ Peripheriebus, an dem $N_{PF} = 1$ Festplatte betrieben wird. Die Untersuchungen an einer einzelnen Festplatte sollen zeigen, inwieweit diese in der Lage ist, die sequentiellen Datenanforderungen mehrerer Videodatenströme zu bearbeiten.

Von entscheidender Bedeutung für die Leistung einer Festplatte ist die Größe der Festplattenaufträge n_{FA} , die bei nur einer Festplatte der Größe der RAID-Aufträge n_{RA} entspricht, und die Position der angeforderten Daten auf dem Magnetplattenspeicher. Die relative Position der angeforderten Daten ist verantwortlich für die Einstellzeit, die pro Auftrag benötigt wird. Durch einen Cache-Speicher kann die Leistung einer Festplatte erheblich gesteigert werden, wenn die Daten eines ausreichenden Teils der Anforderungen sich im Cache befinden und nicht vom Magnetplattenspeicher gelesen werden müssen. Ein Maß für die Ausnutzung des Caches ist die Cache-Trefferrate r_{FC} , die definiert ist als das Verhältnis der Anzahl der Sektoren eines Festplattenauftrags, die sich im Cache befinden, zu der Gesamtzahl der Sektoren des Auftrags. Mit der Anzahl der Sektoren n_{FRA} , die nach jedem Lesezugriff auf den Magnetplattenspeicher in den Cache geschrieben werden, hat man einen weiteren Parameter zur Optimierung der Leistung einer Festplatte mit Cache.

Die wichtigsten Leistungsdaten einer Festplatte sind die Antwortzeit T_{FA} eines Festplattenauftrags und die mittlere Auslastung ρ_F . Die Antwortzeit wird gemessen vom Eintreffen eines Festplattenauftrags bis zur Bereitstellung von dessen angeforderten Daten im Anpassungspuffer. Die Auslastung ergibt sich aus dem Quotienten der Zeitspanne, die die Festplatte zur Bearbeitung der Aufträge benötigt, und der gesamten Zeitspanne, die ihr für die Bearbeitung zur Verfügung steht.

6.6.1.1 Ein Videodatenstrom

Zuerst wird nur $N_{BV} = 1$ Videodatenstrom betrachtet. Da dieser während eines Videofilms auf hintereinanderliegende Sektoren zugreift, wird nur beim Wechsel auf einen anderen Videofilm eine längere Einstellzeit benötigt. Dadurch geben diese Untersuchungen Aufschluß über die maximal mögliche Leistung einer Festplatte bei sequentielltem Datenzugriff.

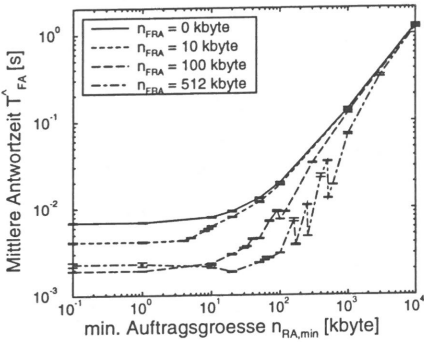


Bild 6.24: Einfluß der Auftragsgröße n_{RA} und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die mittlere Antwortzeit \hat{T}_{FA}

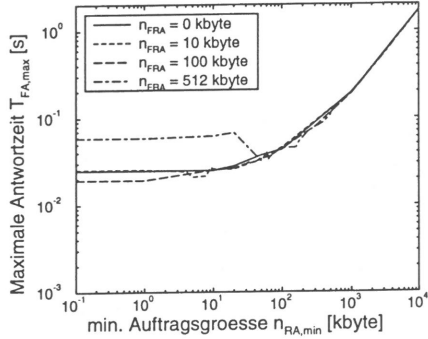


Bild 6.25: Einfluß der Auftragsgröße n_{RA} und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die max. Antwortzeit $T_{FA,max}$

Die Abbildungen 6.24 und 6.25 zeigen die mittlere und maximale während der Simulation aufgetretene Antwortzeit der Festplatte. Für kleine Auftragsgrößen wird die mittlere Antwortzeit hauptsächlich durch den Bearbeitungs-overhead der Festplatte bestimmt. Ohne die Verwendung eines Caches ($n_{FRA} = 0$ kbyte) sind dies $T_{FCO} = 1,5$ ms für die Auftragsbearbeitung durch den Festplatten-Controller und die mittlere Latenzzeit $\overline{T_{FL}} = 4,1\overline{6}$ ms des Magnetplattenspeichers. Durch die Verwendung eines Caches kann der Anteil der Latenzzeit stark reduziert werden, je mehr Aufträge direkt aus dem Cache bedient werden können. Für $n_{FRA} = 512$ kbyte steigt jedoch im Vergleich zu $n_{FRA} = 100$ kbyte die mittlere Antwortzeit wieder. Der Grund ist, daß die Zeitspanne T_{FRA} , die benötigt wird, um die Daten in den Cache zu schreiben, für zu große Read-Ahead-Größen länger ist als der mittlere Zwischenankunftsabstand der Festplattenaufträge. Dadurch treten Wartezeiten auf, obwohl die angeforderten Daten bereits im Cache vorhanden wären. Für große Aufträge wird die mittlere Antwortzeit durch die mittlere Datenlesezeit $\overline{T_{FD}} = \overline{n_{FA}}/\overline{\lambda_F}$ bestimmt. Das sägezahnartige Verhalten wird durch schwankende Cache-Trefferraten verursacht, die sich durch das Verhältnis zwischen Auftragsgröße n_{RA} und Read-Ahead-Größe n_{FRA} ergeben.

Die maximale Antwortzeit unterscheidet sich für große Aufträge nur wenig von der mittleren Antwortzeit, weil die Varianz der Auftragsgrößen für große Aufträge durch den Algorithmus, der für die Generierung verwendet wird, klein ist. Für kleine Auftragsgrößen ist die maximale Antwortzeit abhängig von der Lesezeit für ein großes Videobild ($T_{FD,max} = 10$ ms) und dem maximal möglichen Overhead ($T_{FCO} = 1,5$ ms, $T_{FE,max} = 1,5$ ms, $T_{FL,max} = 8,3$ ms). Bei $n_{FRA} = 512$ kbyte kommt wiederum die Wartezeit bis zum Ende des Read-Ahead hinzu.

Die Cache-Trefferrate ist in Abbildung 6.26 dargestellt. Liegt die mittlere Größe der Auf-

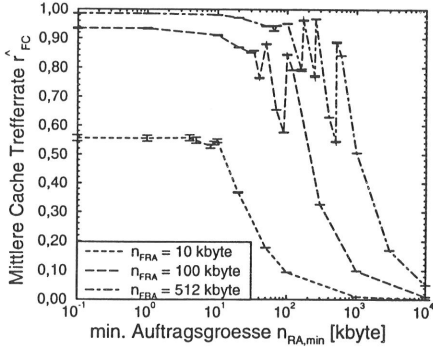


Bild 6.26: Einfluß der Auftragsgröße n_{RA} und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die mittlere Cache-Trefferrate \bar{r}_{FC}

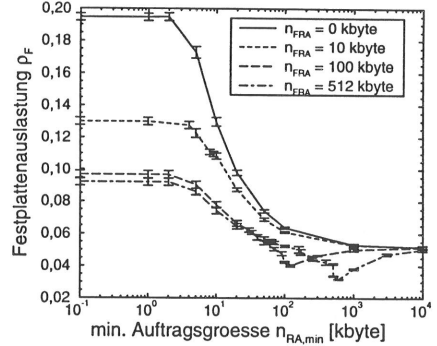


Bild 6.27: Einfluß der Auftragsgröße n_{RA} und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die Festplattenauslastung ρ_F

träge \bar{n}_{RA} über der Read-Ahead-Größe n_{FRA} , befindet sich jeweils ein Teil der Daten der Aufträge im Cache, und die Cache-Trefferrate läßt sich durch $r_{FC} \approx n_{FRA}/\bar{n}_{FA}$ abschätzen. Ist die Mindestauftragsgröße $n_{RA,min}$ kleiner als die minimale Größe $X_{b,min}$ eines Videobilds, wird durch jeden Festplattenaufrag ein einzelnes Bild angefordert. Die mittlere Cache-Trefferrate ergibt sich dann aus der Relation der mittleren Bildgröße $\bar{X}_b = 8,85$ kbyte zur Read Ahead Größe n_{FRA} . Als Abschätzung für die mittlere Cache-Trefferrate \bar{r}_{FC} gilt hier

$$\bar{r}_{FC} = \frac{n_{FRA}}{\left\lceil \frac{n_{FRA}}{\bar{X}_b} \right\rceil \bar{X}_b} \quad (6.35)$$

Damit ergeben sich für $n_{FRA} = 10, 100$ und 512 kbyte mittlere Cache-Trefferraten von $\bar{r}_{FC} = 0, 56, 0,94$ und $0,98$. Bei Mindestauftragsgrößen $n_{RA,min}$ im Bereich von $10-1000$ kbyte zeigen die Cache-Trefferraten starke Sprünge für alle Parameter-Kombinationen, für die gilt $n_{FRA} = k \cdot \bar{n}_{FA}$ mit $k \in \mathbb{N}$. Ist die mittlere Auftragsgröße minimal kleiner als n_{FRA}/k , bleiben nach k Cache-Treffern nur wenige Sektoren im Cache für den $k + 1$ -ten Auftrag übrig, so daß für die mittlere Cache-Trefferrate in etwa $\bar{r}_{FC} \approx \frac{k}{k+1}$ gilt. Ist die mittlere Auftragsgröße minimal größer, kann der k -te Auftrag nicht vollständig aus dem Cache bedient werden, und es müssen wenige Sektoren vom Magnetplattenspeicher gelesen werden. Hierbei wird jedoch der Cache neu gefüllt, so daß sich insgesamt eine größere Cache-Trefferrate ergibt als bei geringfügig kleinerer mittlerer Auftragsgröße.

Die Abhängigkeit der mittleren Auslastung ρ_F von der minimalen Auftragsgröße $n_{RA,min}$ und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} zeigt Abbildung 6.27. Für kleine minimale Auftragsgrößen wird alle $T_{BR} = \Delta T = 40$ ms ein Videobild angefordert. Um die Daten eines mittleren Bildes

$\overline{X}_b = 8,85$ kbyte vom Magnetplattenspeicher zu lesen, wird die Zeit $\overline{T_{FD}} \approx 1,0$ ms benötigt. Die Übertragung der Daten über den Peripheriebus dauert im Mittel $\overline{T_{PT}} \approx 0,9$ ms. Unter Vernachlässigung der Einstellzeit kann die mittlere Auslastung damit durch

$$\rho_F \approx \frac{T_{FCO} + (\overline{r_{FC}}\overline{T_{PT}} + (1 - \overline{r_{FC}})(\overline{T_{FL}} + \overline{T_{FD}} + \overline{T_{FRA}})}{\Delta T} \quad (6.36)$$

abgeschätzt werden. Dabei sind in $\overline{T_{FRA}}$ die für das Lesen der Read-Ahead-Daten notwendigen Spur- und Kopfwechselzeiten enthalten. Für $n_{FRA} = 0, 10, 100$ und 512 kbyte erhält man durch die Abschätzung mittlere Auslastungen von $\rho_F = 18,9\%, 12\%, 8,6\%$ und $9,6\%$. Für sehr große minimale Auftragsgrößen ($n_{RA,min} \geq 10$ Mbyte) ist die Übertragungszeit des Peripheriebusses T_{PT} größer als die für einen Read-Ahead benötigte Zeit T_{FRA} . Die Anzahl n_{FC} der Sektoren, die im Cache gefunden werden, kann man vernachlässigen. Der mittlere Zwischenankunftsabstand der Festplattenaufträge ergibt sich aus

$$\overline{T_{BR}} = \frac{\overline{n_{RA}}N_{Sk}}{\overline{R_V}}, \quad (6.37)$$

die mittlere Datenlesezeit des Magnetplattenspeichers aus

$$\overline{T_{FD}} \approx \overline{n_{RA}} \left(\frac{1}{\lambda_F} + \frac{T_{FKW}}{N_{FSS}N_{Sk}} \right). \quad (6.38)$$

Damit ergibt sich für die mittlere Auslastung

$$\rho_F \approx \frac{\overline{T_{FD}} + \overline{T_{PT}}}{\overline{T_{BR}}}. \quad (6.39)$$

Für $n_{RA,min} = 10$ Mbyte ergibt sich so eine Auslastung von $\rho_F = 5,0\%$. Insgesamt sinkt für steigende minimale Auftragsgrößen die Auslastung der Festplatte. Zusätzlich kann die Auslastung optimiert werden, indem die Datenübertragung und das Read-Ahead zeitlich aufeinander abgestimmt werden, damit diese Vorgänge ideal parallel ablaufen können. Hierfür muß gelten $T_{PD} = T_{FRA}$. Daraus ergibt sich das optimale Verhältnis der mittleren Auftragsgröße $\overline{n_{FA}}$ und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} zu

$$\frac{\overline{n_{FA}}}{n_{FRA}} \approx \frac{\lambda_P}{\lambda_F} \approx 1,16. \quad (6.40)$$

Bei diesem Verhältnis macht sich zudem positiv bemerkbar, daß die Cache-Trefferrate ein lokales Maximum einnimmt. Bei $n_{FRA} = 10$ kbyte ist das lokale Minimum nur sehr schwach ausgeprägt, da hier der Overhead der Festplatte noch einen dominierenden Einfluß auf die Auslastung hat.

Ein Vergleich der Abbildungen 6.24, 6.25 und 6.27 zeigt, daß sich die Wahl für die minimale Auftragsgröße $n_{RA,min}$ und die Read-Ahead-Größe n_{FRA} aus einem Kompromiß ergeben muß. Um eine gute, d.h. geringe Auslastung der Festplatte zu erreichen, sollten die minimale Auftragsgröße und die Read-Ahead-Größe so groß wie möglich gewählt werden. Um eine geringe Antwortzeit zu erzielen, muß die minimale Auftragsgröße so klein wie möglich gewählt werden, und die Read-Ahead-Größe darf nicht zu groß sein.

6.6.1.2 Mehrere Videodatenströme

Muß eine Festplatte die Aufträge mehrerer Videodatenströme bedienen, so wird deren Leistung, neben den in Abschnitt 6.6.1.1 für einen Videodatenstrom untersuchten Parametern, zusätzlich durch die Bedienstrategie des Festplatten-Controllers für wartende Aufträge beeinflusst. Im folgenden werden die Bedienstrategien FIFO und SCAN (Abarbeiten der Aufträge nach dem Fahrstuhlprinzip bezüglich ihrer Zylindernummer) verglichen.

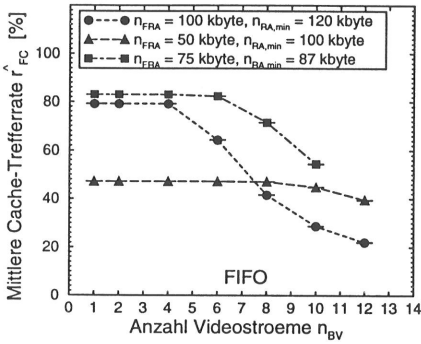


Bild 6.28: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} , der minimalen Auftragsgröße $n_{RA,min}$ und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die mittlere Cache-Trefferrate \hat{r}_{FC} unter der Bedienstrategie FIFO

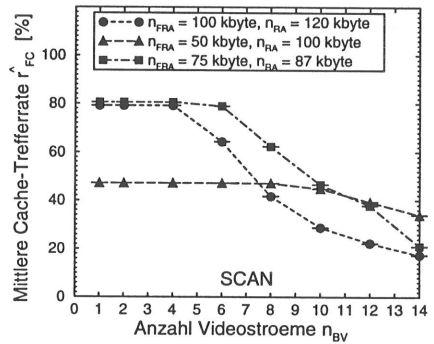


Bild 6.29: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} , der minimalen Auftragsgröße $n_{RA,min}$ und der Read-Ahead-Größe n_{FRA} auf die mittlere Cache-Trefferrate \hat{r}_{FC} unter der Bedienstrategie SCAN

Um die Leistung der Festplatte auch für viele Videodatenströme zu optimieren, ist es notwendig, eine möglichst hohe Cache-Trefferrate zu erzielen. Die Abbildungen 6.28 und 6.29 zeigen die Abhängigkeit der Cache-Trefferrate ρ_F von der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} , der Read-Ahead-Größe n_{FRA} und der minimalen Auftragsgröße $n_{RA,min}$ für drei Parameterkombinationen für eine Cache-Größe von $N_{FC} = 1$ Mbyte. Zur besseren Unterscheidung sind die Simulationsergebnisse für die verschiedenen Parameterkombinationen durch gestrichelte Linien verbunden, obwohl nur ganzzahlige Werte für die Anzahl der Videodatenströme möglich sind. Bei allen Parameterkombinationen zeigt sich ein ähnliches Verhalten. Durch die endliche Größe des Caches werden ab einer bestimmten Anzahl von Videodatenströmen Videodaten eines Stroms durch die eines anderen aus dem Cache verdrängt, bevor sie gelesen werden können. Dadurch sinkt die mittlere Cache-Trefferrate ab einer bestimmten Zahl von Videodatenströmen. Je größer die Read-Ahead-Größe, um so früher wird dieser Punkt erreicht und um so steiler ist der Abfall.

Einen Kompromiß zeigt die Parameter-Kombination $n_{FRA} = 50$ kbyte und $n_{RA,min} = 100$ kbyte. Hier ist die Read-Ahead-Größe klein genug gewählt, damit nur für mehr als 10 Videodatenströme ein Abfall der Cache-Trefferrate eintritt. Gleichzeitig wird durch die Wahl der minimalen Auftragsgröße noch eine gute Auslastung der Festplatte erzielt. Dafür muß man in Kauf nehmen, daß auch für wenige Videodatenströme eine Cache-Trefferrate über $\overline{T_{FC}} = 0,5$ nicht möglich ist, bedingt durch das Verhältnis $n_{RA,min}/n_{FRA}$. Die Bedienstrategie hat kaum Einfluß auf die Cache-Trefferrate. Die Bedienstrategie SCAN erlaubt die Bedienung von maximal 14 Videodatenströmen, bei FIFO sind nur 12 möglich. Für die Parameter-Kombination $n_{FRA} = 75$ kbyte und $n_{RA,min} = 87$ kbyte sind nur maximal 12 beziehungsweise 10 Videodatenströme möglich, weshalb diese Kombination nicht weiter berücksichtigt wird. Die verbleibenden Parameter-Kombinationen werden im weiteren durch die Abkürzungen 50/100 und 100/120 bezeichnet.

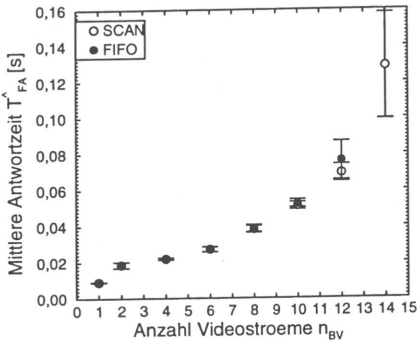


Bild 6.30: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} und der Bedienstrategie auf die mittlere Antwortzeit \hat{T}_{FA} bei $n_{FRA} = 100$ kbyte und $n_{RA,min} = 120$ kbyte

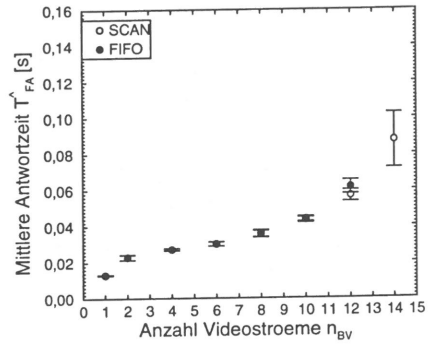


Bild 6.31: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} und der Bedienstrategie auf die mittlere Antwortzeit \hat{T}_{FA} bei $n_{FRA} = 50$ kbyte und $n_{RA,min} = 100$ kbyte

Den Einfluß der Cache-Trefferrate auf die mittlere Antwortzeit zeigen die Abbildungen 6.30 und 6.31. Für weniger als 8 Videodatenströme ist die mittlere Antwortzeit bei 100/120 durch die deutlich höhere Cache-Trefferrate geringer als bei 50/100. Für mehr als 8 Videodatenströme ist die mittlere Antwortzeit bei 50/100 geringer. Deutlich zu erkennen ist auch, daß sich ab 2 Videodatenströmen die mittlere Antwortzeit um die mittlere Einstellzeit $\overline{T_{FE}} = 10$ ms erhöht. Die Bedienstrategie SCAN bietet erst ab 10 Videodatenströmen einen Vorteil gegenüber der Strategie FIFO, da bei weniger Videodatenströmen nur wenige Aufträge warten müssen, so daß ein Sortieren kaum möglich ist.

Den Nachteil der Strategie SCAN gegenüber FIFO zeigen die Abbildungen 6.32 und 6.33.

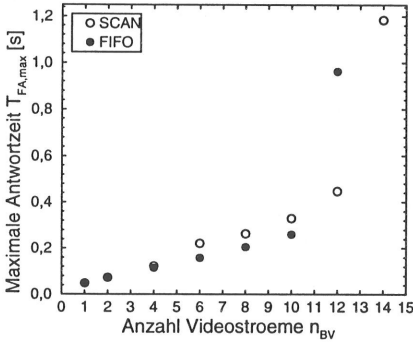


Bild 6.32: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} und der Bedienstrategie auf die maximale Antwortzeit $T_{FA,max}$ bei $n_{FRA} = 100$ kbyte und $n_{RA,min} = 120$ kbyte

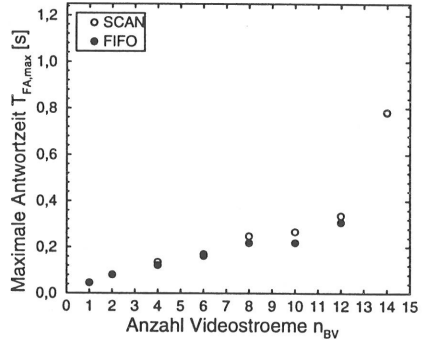


Bild 6.33: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} und der Bedienstrategie auf die maximale Antwortzeit $T_{FA,max}$ bei $n_{FRA} = 50$ kbyte und $n_{RA,min} = 100$ kbyte

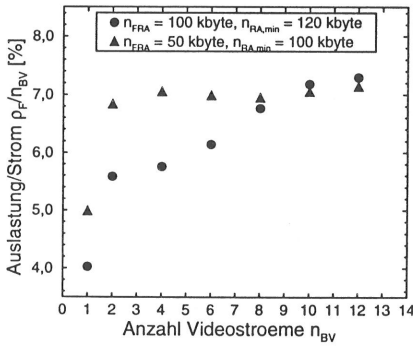


Bild 6.34: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Auslastung ρ_F bei Bedienstrategie FIFO

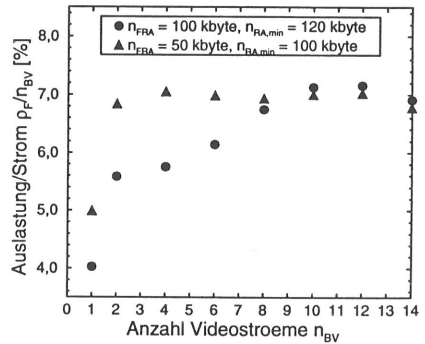


Bild 6.35: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Auslastung ρ_F bei Bedienstrategie SCAN

Durch das Sortieren der Aufträge muß ein eintreffender Auftrag im ungünstigsten Fall warten, bis der Lese-Schreibarm einen kompletten Zyklus durchlaufen hat. Dadurch erhöht sich die maximale Wartezeit. Die Auslastung der Festplatte pro Videodatenstrom ρ_F/n_{BV} ist in Abhängigkeit von der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} in den Abbildungen 6.34 und 6.35 für die Bedienstrategien FIFO und SCAN aufgetragen. Auf die Darstellung der Konfidenz-

intervalle wurde verzichtet, da deren Größe bei allen Werten unter 3 % des Mittelwerts liegt. Wie schon bei den Diagrammen für die mittleren Antwortzeiten, ist der Einfluß der Einstellzeit T_{FE} beim Vergleich der Auslastungen für einen und zwei Videodatenströme deutlich zu erkennen. Für die Parameter-Kombination 100/120 ist zudem ein deutlicher Anstieg der Auslastung pro Strom für mehr als 4 Videodatenströme zu erkennen, der durch die sinkende Cache-Trefferrate verursacht wird. Durch die Kombination 50/100 wird für mehr als 2 Videodatenströme eine nahezu konstante Auslastung pro Strom erreicht.

Durch die Bedienstrategie SCAN ergibt sich gegenüber FIFO erst für mehr als 10 Videodatenströme eine minimal geringere Auslastung. Die geringe Verbesserung der Auslastung steht der Verschlechterung der maximalen Antwortzeit und dem größeren Bearbeitungsaufwand durch den Festplatten-Controller gegenüber. Da ein RAID-Auftrag aus mehreren Festplattenaufträgen besteht und dessen Bearbeitungszeit vom Maximum der Antwortzeiten der Festplattenaufträge abhängt, wird die Strategie SCAN für die weiteren Untersuchungen des RAID-Systems und der Bedieneinheit nicht weiter verfolgt.

6.6.2 RAID-System

Für die Untersuchungen über die Leistungsfähigkeit eines kompletten RAID-Systems werden $N_{RF} = 9$ Festplatten verwendet. Jeweils drei Festplatten werden über einen Peripheriebus mit der RAID-Steuerung verbunden ($N_{PF} = 3$). Die Größe N_{RM} des Video-RAMs wurde so groß gewählt, daß alle von den Festplatten bereitgestellten Daten sofort in das Video-RAM übertragen werden können und nicht warten müssen, bis ältere Daten gelöscht werden. Für die Festplatten wird auf Grund der Untersuchungen in Abschnitt 6.6.1.2 eine Read-Ahead-Größe von $n_{FRA} = 50$ kbyte verwendet.

Der entscheidende Parameter für die Leistungsfähigkeit des RAID-Systems ist die Größe der Streifeninheit N_{RSS} . Daher wird in den folgenden zwei Abschnitten deren Einfluß auf die Leistung des RAID-Systems bei geringer Belastung des Videosevers durch 10 Videodatenströme und bei hoher Belastung durch 70 Videodatenströme untersucht, um daraus einen günstigen Bereich für die Wahl der Größe der Streifeninheit zu bestimmen. Schließlich wird das Verhalten des Videosevers bei einer günstigen Wahl für eine unterschiedliche Anzahl von Videodatenströmen aufgezeigt. Die optimale Streifeninheit für lese-intensive Anwendungen bei einem RAID-System mit RAID Level 0, wie hier verwendet, kann auf ein System mit RAID Level 5 übertragen werden [28].

Die wichtigsten Leistungsgrößen eines RAID-Systems sind die Auslastung der Peripheriebusse und der Festplatten, die Bearbeitungszeiten für einen RAID-Auftrag und dessen Festplattenaufträge sowie die benötigte Größe und die Auslastung des Video-RAMs. Die Bearbeitungszeit T_{RFA} eines Festplattenauftrags wird definiert als die Zeitspanne zwischen der Ankunft eines RAID-Auftrags und dem Zeitpunkt, zu dem die Daten eines daraus resultierenden

Festplattenauftrags vollständig im Video-RAM verfügbar sind. Die Bearbeitungszeit T_{RRA} eines RAID-Auftrags wird definiert als die Zeitspanne zwischen der Ankunft des Auftrags und dem Zeitpunkt, zu dem alle von diesem Auftrag angeforderten Daten im Video-RAM zur Verfügung stehen.

Durch das sequentielle Layout der Videodaten über alle Festplatten ist gewährleistet, daß alle Festplatten und Peripheriebusse im Mittel das gleiche Verhalten zeigen. Somit ist es ausreichend, jeweils eine Festplatte und einen Peripheriebus zu betrachten.

6.6.2.1 Geringe Auslastung (10 Videodatenströme)

Für alle Untersuchungen dieses Abschnitts werden $n_{BV} = 10$ Videodatenströme verwendet, die eine geringe Auslastung der Festplatten und Peripheriebusse des RAID-Systems bewirken. Die Diagramme zeigen Vergleiche für minimale RAID-Auftragsgrößen von $n_{RA,min} = 100, 300, 600$ und 900 kbyte.

Durch die Wahl der Größe der Streifeninheit N_{RSS} wird bei einer gegebenen Raid-Auftragsgröße n_{RA} die Größe der Festplattenaufträge n_{FA} durch die Gleichungen 6.19, 6.20 und 6.21 festgelegt. Dadurch wird direkt die Auslastung der Peripheriebusse und der Festplatten des RAID-Systems bestimmt. Die Abbildungen 6.36 und 6.37 zeigen die Abhängigkeit der Auslastung ρ_F einer der 9 Festplatten und der Auslastung ρ_P eines der Peripheriebusse für verschiedene Größen der Streifeninheit N_{RSS} . Für sehr kleine Streifenheiten wird

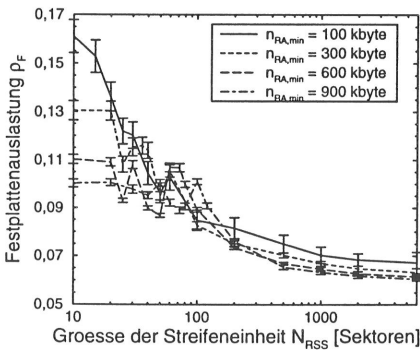


Bild 6.36: Einfluß der Größe der Streifen-
einheit N_{RSS} und der minima-
len Größe der RAID-Aufträge
 $n_{RA,min}$ auf die Festplattenaus-
lastung ρ_F

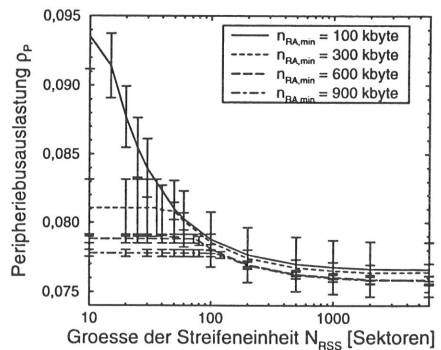


Bild 6.37: Einfluß der Größe der Streifen-
einheit N_{RSS} und der minima-
len Größe der RAID-Aufträge
 $n_{RA,min}$ auf die Peripheriebus-
auslastung ρ_P

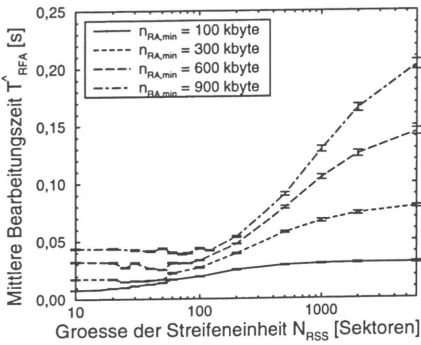


Bild 6.38: Einfluß der Größe der Streifen-einheit N_{RSS} und der minimalen Größe der RAID-Aufträge $n_{RA,min}$ auf die mittlere Bearbeitungszeit \hat{T}_{RFA} eines Festplattenauftrags

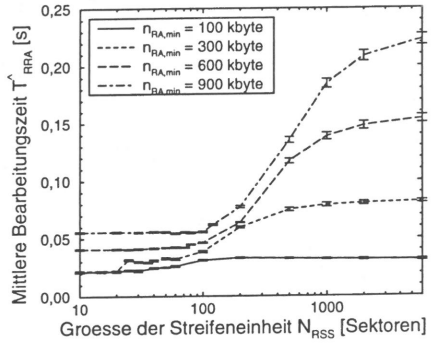


Bild 6.39: Einfluß der Größe der Streifen-einheit N_{RSS} und der minimalen Größe der RAID-Aufträge $n_{RA,min}$ auf die mittlere Bearbeitungszeit \hat{T}_{RRA} eines RAID-Auftrags

ein RAID-Auftrag in 9 Festplattenaufträge aufgeteilt, und die mittlere Auslastung wird bestimmt durch ein Neuntel der mittleren Requestgröße $\overline{n_{RA}}$ und die Read-Ahead-Größe $n_{FRA} = 50$ kbyte.

Für große Streifen-einheiten erhält man für die meisten RAID-Aufträge nur einen Festplattenauftrag, so daß die Auslastung direkt durch die mittlere Größe der RAID-Aufträge bestimmt wird. Für den Peripheriebus ergibt sich aus der Übertragungsdauer der Videodaten eine minimale Auslastung von 7,55 %, die für große Streifen-einheiten und große mittlere RAID-Aufträge nahezu erreicht wird.

Für Streifen-einheiten im Bereich von 20–500 Sektoren ist die Auslastung ρ_F der Festplatte zudem abhängig vom Verhältnis der Größe der Streifen-einheit N_{RSS} zur Read-Ahead-Größe n_{FRA} und der mittleren Größe der RAID-Aufträge. Von Ausnahmen abgesehen, ist es günstig, wenn die Read-Ahead-Größe ein ganzzahliges Vielfaches der Streifenlänge ist, bei den vorliegenden Parameterwerten also N_{RSS} zu 25 oder 50 Sektoren gewählt wird. Bei einer minimalen RAID-Auftragsgröße $n_{RA,min} = 900$ kbyte ist jedoch die Wahl von $N_{RSS} = 25$ oder 50 Sektoren ungünstig, da durch die große mittlere RAID-Auftragsgröße jeweils 100 kbyte pro Platte angefordert werden und damit die maximale Cache-Trefferrate nur 50 % beträgt. Hier ist die Wahl $N_{RSS} = 55$ Sektoren relativ günstig, da dann eine maximale Cache-Trefferrate von 75 % möglich ist.

Die Bearbeitungszeiten für die Festplattenaufträge ergeben sich bei geringer Auslastung der Peripheriebusse und ausreichend dimensioniertem Video-RAM der RAID-Steuerung aus der

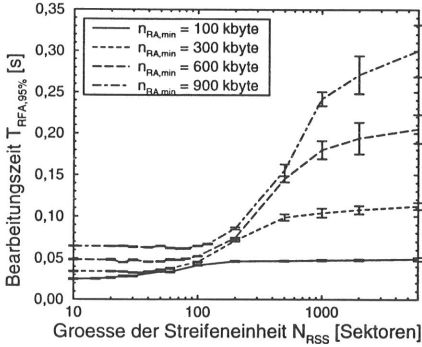


Bild 6.40: 95%-Quantil $T_{RFA,95\%}$ der Bearbeitungszeit eines Festplatten-auftrags

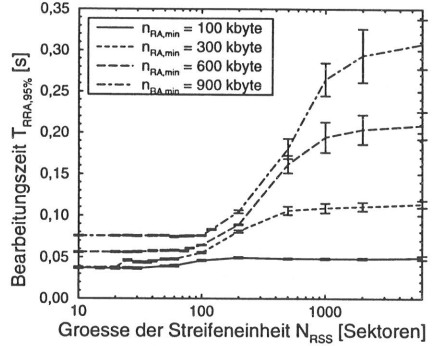


Bild 6.41: 95%-Quantil $T_{RRA,95\%}$ der Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags

Antwortzeit T_{FA} der Festplatten und der Übertragungszeit T_{PT} der Daten über den Peripheriebus. Die mittlere Bearbeitungsdauer T_{RFA} eines Festplatten-auftrags ist in Abbildung 6.38 dargestellt. Bei kleinen Streifen-einheiten N_{RSS} ist die Bearbeitungsdauer durch einen relativ hohen zeitlichen Overhead der Festplatten und Peripheriebusse gekennzeichnet. Unterschiede in der mittleren Bearbeitungsdauer ergeben sich bei der Aufteilung eines RAID-Auftrags in 9 Festplatten-aufträge bei verschiedenen Größen der Streifen-einheit durch das Verhältnis der Größe der Festplatten-aufträge zur Read-Ahead-Größe. Bei steigender Größe der Streifen-einheit nimmt der Overhead ab, gleichzeitig aber auch die Cache-Trefferrate. Insgesamt steigt die Bearbeitungszeit, da pro Auftrag mehr Daten vom Magnetplattenspeicher gelesen und übertragen werden müssen. Für sehr große Streifen-einheiten kann die Bearbeitungszeit durch die Summe der Datenlesezeit T_{FD} des Magnetplattenspeichers und der Übertragungszeit T_{PT} des Peripheriebusses abgeschätzt werden.

Die Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags ergibt sich aus dem Maximum der Bearbeitungszeiten seiner n_{RF} Festplatten-aufträge. Die mittlere Bearbeitungszeit \hat{T}_{RRA} eines RAID-Auftrags ist in Abbildung 6.39 dargestellt. Für große Streifen-einheiten wird ein RAID-Auftrag auf nur einen Festplatten-auftrag abgebildet. In diesem Fall entspricht die mittlere Bearbeitungszeit der RAID-Aufträge der der Festplatten-aufträge. Bei kleinen Streifen-einheiten machen sich günstige Parameter-Kombinationen kaum mehr bemerkbar, da auf den langsamsten Festplatten-auftrag gewartet werden muß. Für $n_{RA,min} = 100$ oder 300 kbyte und Streifen-einheiten unter 20 Sektoren ist es möglich, alle Festplatten-aufträge aus den Caches zu bedienen, da hier die Größe aller Festplatten-aufträge eines Raid-Auftrags kleiner ist als die Read-Ahead-Größe von 50 kbyte. Bei $n_{RA,min} = 300$ kbyte und $N_{RSS} = 25$ Sektoren treten dagegen in jedem Fall Festplatten-aufträge mit mindestens 50 kbyte auf. Da

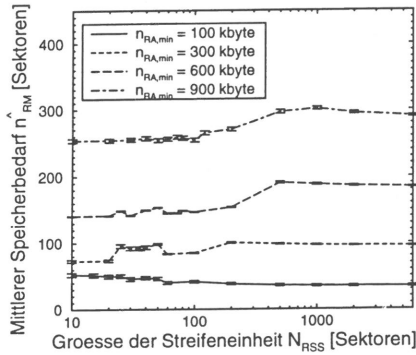


Bild 6.42: Mittlerer Speicherbedarf \hat{n}_{RM} für $n_{BV} = 10$ Videodatenströme

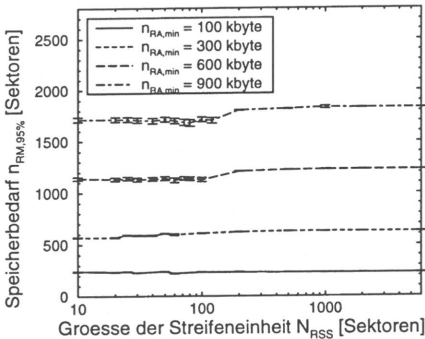


Bild 6.43: 95%-Quantil $n_{RM,95\%}$ des Speicherbedarfs für $n_{BV} = 10$ Videodatenströme

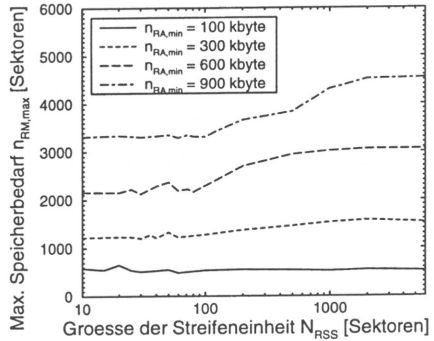


Bild 6.44: Max. Speicherbedarf $n_{RM,max}$ für $n_{BV} = 10$ Videodatenströme

das RAID-System unter Echtzeitbedingungen eingesetzt wird, sind in Abbildungen 6.40 und 6.41 die 95%-Quantile der Bearbeitungszeiten der Festplatten- und RAID-Aufträge dargestellt. Die Kurven zeigen das gleiche prinzipielle Verhalten wie die Kurven der mittleren Bearbeitungszeiten.

Die Abbildungen 6.42, 6.43 und 6.44 geben einen Überblick über die Größe des Video-RAMs, die für $n_{BV} = 10$ Videodatenströme notwendig ist. Man erkennt, daß der benötigte Speicherplatz mit der mittleren Größe der RAID-Aufträge wächst, jedoch kaum von der gewählten Größe der Streifeneinheit abhängt. Ein Vergleich der Abbildungen 6.43 und 6.44 zeigt, daß während 95 % der Zeit höchstens die Hälfte des maximalen Speicherplatzes benötigt wird. Simulationsstudien mit einer Reduktion des zur Verfügung stehenden Video-RAMs haben

aber gezeigt, daß schon bei einer Reduktion um ca. 15 % unter den maximal benötigten Speicherplatz erhebliche Leistungseinbußen des RAID-Systems zu verzeichnen sind. Diese gehen soweit, daß keiner der momentan bearbeiteten RAID-Aufträge fertig bearbeitet werden kann, weil die Daten mindestens eines Festplattenauftrags pro RAID-Auftrag nicht mehr übertragen werden können und das System sich in einer Verklemmung (*deadlock*) befindet. Daher ist die ausreichende Dimensionierung der Größe des Video-RAMs sehr kritisch für die Funktion des RAID-Systems.

6.6.2.2 Hohe Auslastung (70 Videodatenströme)

In diesem Abschnitt soll nun im Vergleich zu Abschnitt 6.6.2.1 das RAID-System durch $n_{BV} = 70$ Videodatenströme bei hoher Last betrieben werden. Wie schon im vorhergehenden Abschnitt zeigen die Diagramme Vergleiche für minimale RAID-Auftragsgrößen von $n_{RA,min} = 100, 300, 600$ und 900 kbyte.

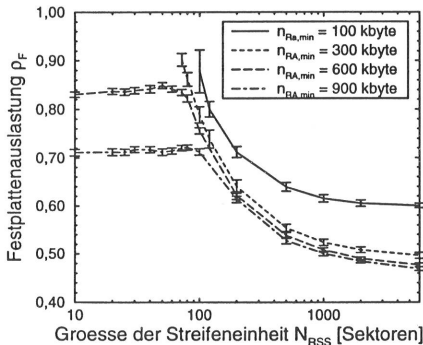


Bild 6.45: Auslastung ρ_F der Festplatten

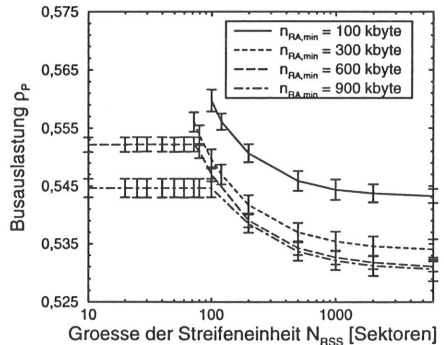


Bild 6.46: Auslastung ρ_P der Peripheriebusse

Den Einfluß der Größe der Streifenweite N_{RSS} und der minimalen Größe $n_{RA,min}$ der RAID-Aufträge auf die Auslastungen ρ_F und ρ_P der Festplatten und Peripheriebusse zeigen die Abbildungen 6.45 und 6.46. Für kleine Streifenweiten ist die Auslastung der Festplatten für 70 Videodatenströme kaum vom Verhältnis der Größe der Streifenweite zur Read-Ahead-Größe abhängig, da sich für 70 Videodatenströme die Begrenzung der Cache-Größe auf $N_{FC} = 1$ Mbyte durch eine verminderte Cache-Trefferrate bemerkbar macht. Für Streifenweiten kleiner als 100 bzw. 72 Sektoren sind die Festplatten bei einer minimalen RAID-Auftragsgröße von 100 bzw. 300 kbyte überlastet. Dagegen erreicht man bei hinreichend großen Streifenweiten eine mittlere Festplattenauslastung unter 50 %.

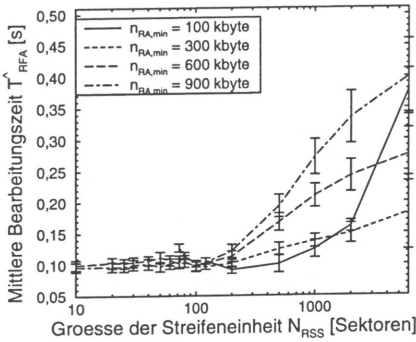


Bild 6.47: Mittlere Bearbeitungszeit \hat{T}_{RFA} eines Festplattenauftrags

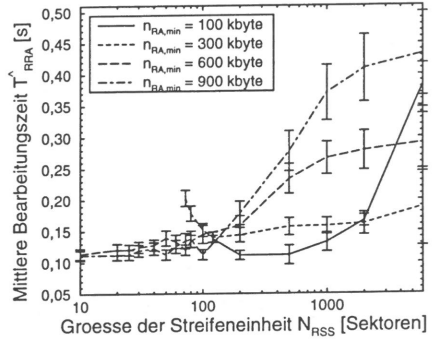


Bild 6.48: Mittlere Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags \hat{T}_{RRA}

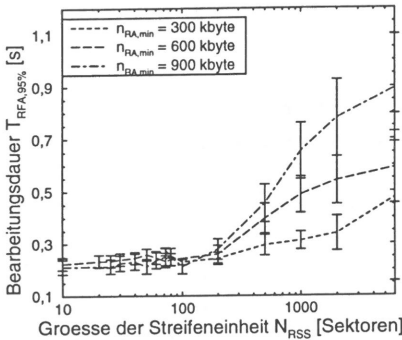


Bild 6.49: 95%-Quantil $T_{RFA,95\%}$ der Bearbeitungszeit eines Festplattenauftrags

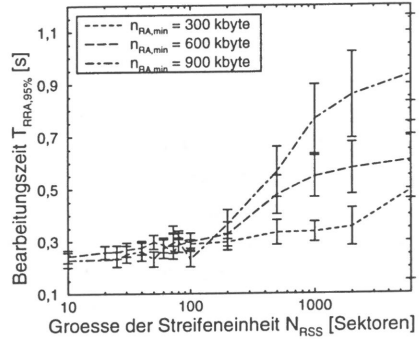


Bild 6.50: 95%-Quantil $T_{RRA,95\%}$ der Bearbeitungszeit eines RAID-Auftrags

Die Auslastung der Peripheriebusse zeigt ein ähnliches Verhalten wie die Auslastung der Festplatten, nur in einem wesentlich schmäleren Bereich. Dies liegt daran, daß sich das Verhältnis zwischen Overhead und Nutzlast durch die Wahl der Größe der Streifenheit nicht so stark verändert wie bei den Festplatten.

Die mittleren Bearbeitungszeiten der Festplatten- und RAID-Aufträge sowie deren 95%-Quantile zeigen die Abbildungen 6.47 bis 6.50. Ein Vergleich mit den Abbildungen 6.38 bis 6.41 mit nur 10 Videodatenströmen zeigt, daß die Größe der Streifenheit bei großen minimalen RAID-Aufträgen auch für 70 Videodatenströme ($n_{RA,min} = 600$ oder 900 kbyte) die Bearbeitungszeiten in ähnlicher Weise beeinflusst. Für kleine minimale RAID-Aufträge

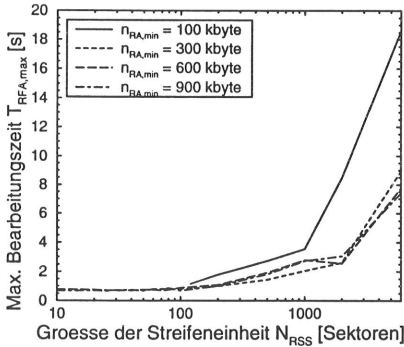


Bild 6.51: Maximal benötigte Bearbeitungszeit $T_{RFA,max}$ eines Festplatten- oder RAID-Auftrags

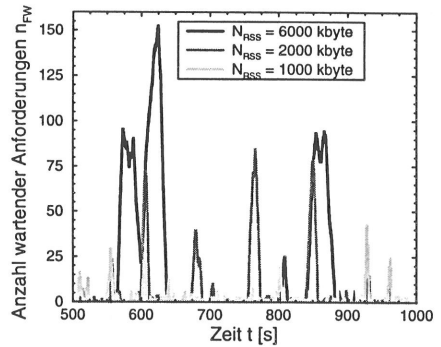


Bild 6.52: Zeitlicher Verlauf der Anzahl der Festplattenaufträge n_{FW} in der Warteschlange des Festplatten-Controllers für $n_{RA,min} = 100$ kbyte

($n_{RA,min} = 100$ oder 300 kbyte) macht sich jedoch für relativ kleine Streifeneinheiten die starke Auslastung der Festplatten bemerkbar, so daß sowohl die mittlere Bearbeitungszeit als auch die 95%-Quantile der Bearbeitungszeiten mit abnehmender Größe der Streifeneinheit zunehmen. Auch für sehr große Streifeneinheiten sind die Bearbeitungszeiten bei $n_{RA,min} = 100$ kbyte größer als für größere minimale Auftragsgrößen. Die Bearbeitungszeiten steigen mit der Größe der Streifeneinheit, obwohl sich die Anzahl und die Größe der Festplattenaufträge für Streifeneinheiten über 500 kbyte kaum ändern. Bemerkenswert ist auch, daß die maximalen Bearbeitungszeiten, die während der Simulation auftraten, für $n_{RA,min} = 100$ kbyte deutlich über denen liegen, die für die anderen Werte der minimalen Größen der RAID-Aufträge erreicht wurden (siehe Abbildung 6.51).

Den Grund für dieses Verhalten zeigen die Abbildungen 6.52 und 6.53. In Abbildung 6.52 ist die Anzahl der wartenden Festplattenaufträge n_{FW} in der Warteschlange des Festplatten-Controllers über einem Ausschnitt der Simulationszeit t für die minimale RAID-Auftragsgröße $n_{RA,min} = 100$ kbyte aufgetragen. Je größer das Verhältnis der Größe der Streifeneinheit N_{RSS} zur minimalen RAID-Auftragsgröße $n_{RA,min}$ wird, desto mehr aufeinanderfolgende RAID-Aufträge eines Videodatenstroms werden auf einen Festplattenauftrag für ein und dieselbe Festplatte abgebildet. Dabei ist der Festplattenauftrag jeweils größer als die Read-Ahead-Größe, wodurch jeder Festplattenzugriff Daten vom Magnetplattenspeicher benötigt. Durch dieses zyklische Eintreffen der Aufträge sind die Festplatten nicht in der Lage, diese sofort zu bedienen, und die Aufträge erfahren zyklische Wartezeiten, obwohl die Festplatten insgesamt nur mäßig ausgelastet sind. Erst nachdem die RAID-Aufträge eines Videodaten-

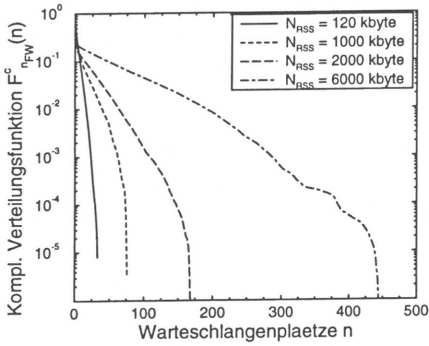


Bild 6.53: Komplementäre Verteilungsfunktion $F_{n_{FW}}^c(n)$ der Anzahl wartender Festplattenaufträge für $n_{RA,min} = 100$ kbyte

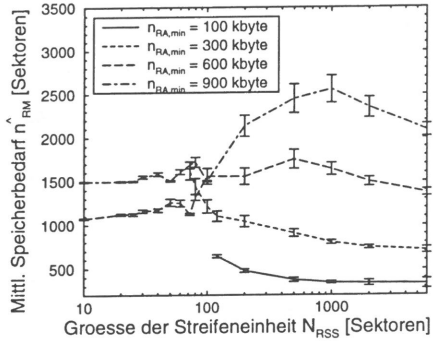


Bild 6.54: Mittlerer Speicherbedarf \hat{n}_{RM} für $n_{BV} = 70$ Videodatenströme

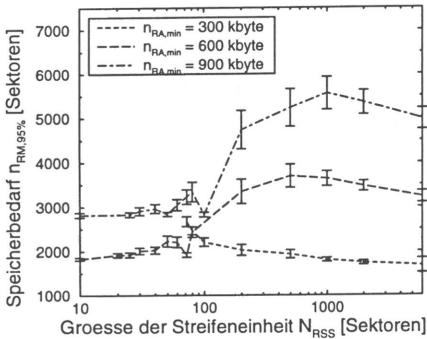


Bild 6.55: 95%-Quantil des Speicherbedarfs $n_{RM,95\%}$ der Videodatenströme

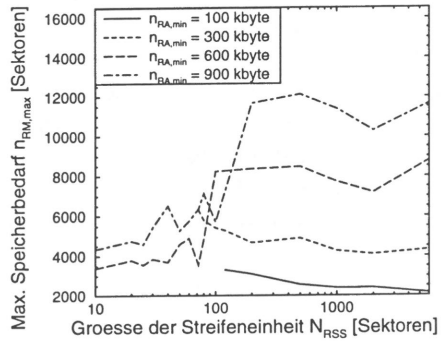


Bild 6.56: Maximal notwendiger Speicherbedarf $n_{RM,max}$ für 70 Videodatenströme

stroms in die nächste Streifeneinheit fallen und dadurch auf eine andere Festplatte abgebildet werden, ist es möglich, die wartenden Aufträge abzuarbeiten. Die Periodendauer und die Amplitude der Wartezeiten steigen dabei mit dem Verhältnis N_{RSS} zu $n_{RA,min}$. Die aus diesem zyklischen Ankunftsprozeß resultierende komplementäre Verteilungsfunktion $F_{n_{FW}}^c(n)$ der Anzahl n_{FW} der Festplattenaufträge, die sich bei der Ankunft eines Auftrags bereits in der Warteschlange des Festplatten-Controllers befinden, zeigt Abbildung 6.52. Mit zunehmender Größe der Streifeneinheit N_{RSS} steigt die Wahrscheinlichkeit, eine größere Anzahl wartender

Aufträge vorzufinden, stark an. Aus diesen Ergebnissen folgt, daß die maximale Größe der Streifeninheit in der Größenordnung der mittleren Größe der RAID-Aufträge liegen muß, um die Bildung zyklischer Schwankungen der Warteschlangenlänge zu vermeiden.

Den Einfluß der Größe der Streifeninheit N_{RSS} und der minimalen Größe der RAID-Aufträge $n_{RA,min}$ auf den von 70 Videodatenströmen benötigten Speicherplatz im Video-RAM zeigen die Abbildungen 6.54, 6.55 und 6.56. Im Gegensatz zu den Abbildungen 6.42, 6.43 und 6.44 für 10 Videodatenströme ist bei 70 Videodatenströmen eine deutliche Abhängigkeit des Speicherbedarfs sowohl von der Größe der Streifeninheit als auch von der minimalen Größe der RAID-Aufträge zu erkennen. Der Speicherbedarf liegt während 95 % der Zeit unter der Hälfte des maximal aufgetretenen Bedarfs. Auch hier gilt, wie schon für 10 Videodatenströme, daß schon eine geringe Verringerung der Größe des zur Verfügung stehenden Video-RAMs starke Einbußen der Leistungsfähigkeit des RAID-Systems zur Folge hat.

6.6.2.3 Richtlinien für die Parameterwahl des RAID-Systems

In diesem Abschnitt werden die Erfahrungen aus den beiden vorangegangenen Abschnitten für die Wahl der minimalen Größe $n_{RA,min}$ der RAID-Aufträge und die Größe der Streifeninheit N_{RSS} zusammengefaßt. Es wird eine günstige Parameter-Kombination ausgewählt, die dann im nächsten Abschnitt für die Untersuchungen der Leistung des RAID-Systems bei einer unterschiedlichen Anzahl von Videodatenströmen verwendet wird. Einen qualitativen Überblick über den Einfluß der beiden Parameter auf die entscheidenden Leistungsgrößen des RAID-Systems gibt Tabelle 6.8.

Leistungsgröße des RAID-Systems	minimale Größe der RAID-Aufträge $n_{RA,min}$ Größe der Streifeninheit N_{RSS}	
	klein	groß
Festplattenauslastung ρ_F	-	+
Peripheriebusauslastung ρ_P	-	+
Bearbeitungszeit T_{RRA}	+	-
Speicherbedarf n_{RM}	+	-

Tabelle 6.8: Abhängigkeit der Leistung des RAID-Systems von der minimalen Größe der RAID-Aufträge

Von besonderem Interesse ist die Bearbeitungszeit der RAID-Aufträge und eine niedrige Auslastung der Festplatten. Um die Bearbeitungszeiten klein zu halten, sollten die Größe der Streifeninheit und die minimale Größe der RAID-Aufträge so klein wie möglich gewählt werden. Für eine niedrige Auslastung der Festplatten sollten sie dagegen so groß wie möglich sein. Einen guten Kompromiß erzielt man durch die Wahl $N_{RSS} = 200$ Sektoren und

$n_{RA,min} = 300$ kbyte. Damit erhält man eine mittlere Größe der Festplattenaufträge von 120 kbyte. Bei einer Read-Ahead-Größe von $n_{FRA} = 50$ kbyte ergibt sich noch eine akzeptable maximal mögliche Cache-Trefferrate von $41,6\%$. Dieser Wert ließe sich durch die Verwendung größerer Festplatten-Caches und eine dadurch mögliche größere Read-Ahead-Größe noch verbessern.

6.6.2.4 Variable Auslastung bei günstiger Parameterwahl

Nun soll die Leistungsfähigkeit des RAID-Systems bei variabler Auslastung durch bis zu 95 Videodatenströme untersucht werden. Alle Untersuchungen wurden mit den nach Abschnitt 6.6.2.3 gewählten Parametern $N_{RSS} = 200$ Sektoren, $n_{RA,min} = 300$ kbyte und $n_{FRA} = 50$ kbyte durchgeführt, die ein günstiges Leistungsverhalten gewährleisten.

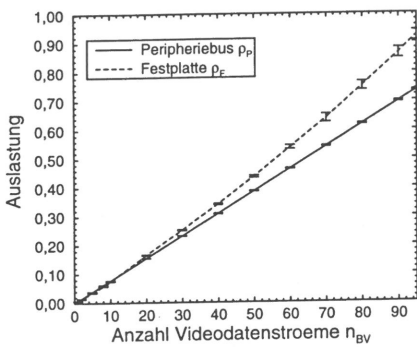


Bild 6.57: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Auslastung der Festplatten ρ_F und der Peripheriebusse ρ_P

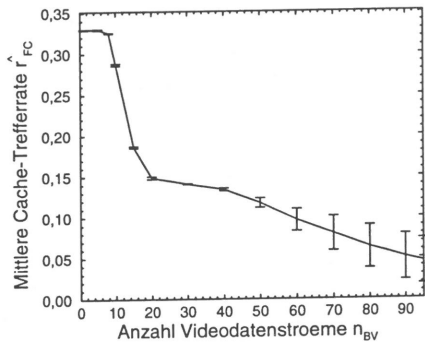


Bild 6.58: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die mittlere Cache-Trefferrate \hat{r}_{FC} der Festplatten

Abbildung 6.57 zeigt den Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Auslastung der Festplatten und Peripheriebusse des RAID-Systems. Da die Peripheriebusse durch die Festplatten nach Erhalt eines Festplattenauftrags sofort wieder freigegeben werden und der Videodatenpeicher der RAID-Steuerung ausreichend dimensioniert ist, um keinen Engpaß zu bilden, steigt die Auslastung ρ_P der Peripheriebusse linear mit der Anzahl der Videodatenströme. Die Auslastung ρ_F der Festplatten steigt mit zunehmender Zahl der Videodatenströme etwas stärker als linear, da durch die begrenzte Größe des Festplatten-Caches die Cache-Trefferrate sinkt. Die mittlere Cache-Trefferrate \hat{r}_{FC} in Abhängigkeit der Anzahl der Videodatenströme zeigt Abbildung 6.58. Bis zu 10 Videodatenströme können durch die gewählte Read-Ahead-Größe von $n_{FRA} = 50$ kbyte sehr gut unterstützt werden (vgl. Abbildung 6.28). Im Bereich von 10 bis 30 Videodatenströmen könnte die Cache-Trefferrate durch

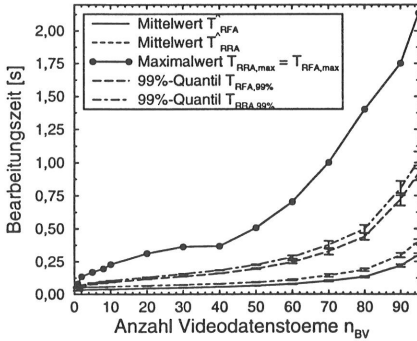


Bild 6.59: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Bearbeitungszeiten T_{RFA} und T_{RRA} der RAID- und Festplattenaufträge

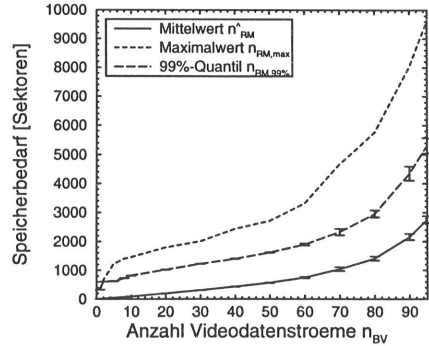


Bild 6.60: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf den Speicherbedarf n_{RM}

Verwendung einer kleineren Read-Ahead-Größe auf Kosten der Cache-Trefferrate im Bereich unter 10 Videodatenströmen noch optimiert werden.

In den Abbildungen 6.59 und 6.60 sind jeweils die Mittelwerte, die 99%-Quantile und die Maximalwerte für die Bearbeitungszeiten der Festplatten- und RAID-Aufträge und den Speicherbedarf dargestellt. Mit zunehmender Auslastung der Festplatten steigt nicht nur die mittlere Bearbeitungsdauer, sondern auch die Variabilität der Bearbeitungsdauer. So ergibt sich für 10 Videodatenströme ein Variationskoeffizient von 0,57, für 90 Videodatenströme aber einer von 0,75. Da die Daten eines RAID-Auftrags erst an die Bedienstation übermittelt werden können, wenn dessen Festplattenaufträge vollständig bearbeitet sind, steigt mit zunehmender Variabilität der Bearbeitungszeiten der Festplatten auch der Speicherbedarf der RAID-Steuerung für die Zwischenspeicherung der Videodaten. Abbildung 6.60 zeigt, daß das 99%-Quantil des Speicherbedarfs weit unterhalb des während der Simulation aufgetretenen maximalen Speicherbedarfs liegt. Auch hier gilt jedoch, daß bereits eine Reduzierung des verfügbaren Video-RAMs auf etwa 85 % des maximalen Speicherbedarfs zu Blockierungen des RAID-Systems führen kann.

6.6.3 Bedienstation

In diesem Abschnitt wird die Leistung der Bedienstation und damit die Leistung des gesamten verteilten Videoservers untersucht. Dabei soll aufgezeigt werden, unter welchen Randbedingungen die vorgestellte verteilte Architektur des Videoservers in der Lage ist, mehrere kontinuierliche Videodatenströme zur Verfügung zu stellen.

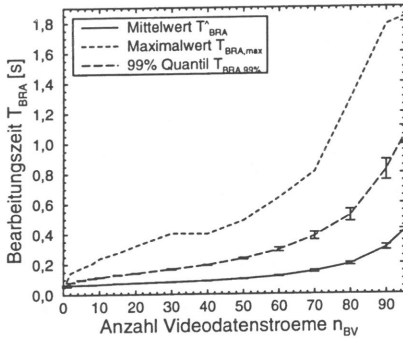


Bild 6.61: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Bearbeitungszeit T_{BRA}

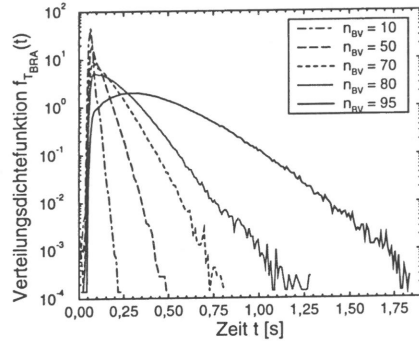


Bild 6.62: Einfluß der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Verteilungsdichtefunktion $f_{T_{BRA}}(t)$ der Bearbeitungszeit der RAID-Aufträge

Eine wesentliche Leistungsgröße des Videoservers ist die Bearbeitungszeit T_{BRA} eines RAID-Auftrags der Bedienstation. Sie ist definiert als die Zeitspanne zwischen dem Zeitpunkt des Abschickens eines RAID-Auftrags und dem Zeitpunkt, zu dem die durch den RAID-Auftrag angeforderten Daten sich komplett im Video-RAM der Bedienstation befinden. Die Verteilungsdichtefunktion $f_{T_{BRA}}(t)$ der Bearbeitungszeit T_{BRA} ist entscheidend für die Wahl der Ausspielverzögerung T_{BAV} . Abbildung 6.61 zeigt die Abhängigkeit der Bearbeitungszeit T_{BRA} der Bedienstation von der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} , die der Abhängigkeit der Bearbeitungszeit T_{RA} des RAID-Systems von der Anzahl der Videodatenströme entspricht, da durch die ausreichende Dimensionierung des Koppelnetzes und des Video-RAMs der Bedienstation zu T_{RA} hauptsächlich die Übertragungszeit zwischen RAID-Steuerung und Bedienstation addiert wird. Eine genauere Beschreibung der Bearbeitungszeit liefert deren Verteilungsdichte $f_{T_{BRA}}(t)$, die in Abbildung 6.62 für unterschiedlich viele Videodatenströme dargestellt ist. Mit zunehmender Zahl der Videodatenströme verschiebt sich nicht nur der Mittelwert der Bearbeitungszeit, sondern die Verteilungsdichte wird zunehmend asymmetrischer.

Die Bearbeitungszeit, die für die Bereitstellung der Videodaten notwendig ist, unterliegt statistischen Schwankungen. Deshalb ist es kaum möglich, die Ausspielverzögerung T_{BAV} so zu wählen, daß gewährleistet werden kann, daß die Videodaten zum Ausspielzeitpunkt in der Bedienstation tatsächlich zur Verfügung stehen. Die Bildverlustwahrscheinlichkeit V_B gibt die Wahrscheinlichkeit an, mit der ein Videobild an seinem Ausspielzeitpunkt in der Bedienstation nicht zur Verfügung steht. Abbildung 6.63 zeigt, daß die Bildverlustwahrscheinlichkeit mit steigender Ausspielverzögerung etwa exponentiell abnimmt. Die Rate der

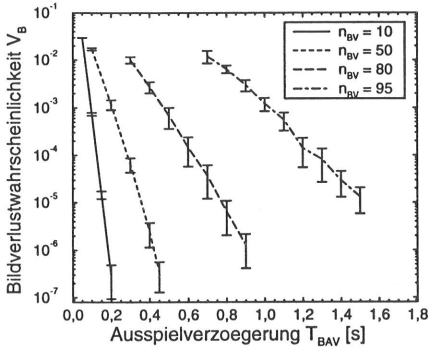


Bild 6.63: Einfluß der Ausspielverzögerung T_{BAV} und der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf die Bildverlustwahrscheinlichkeit V_B

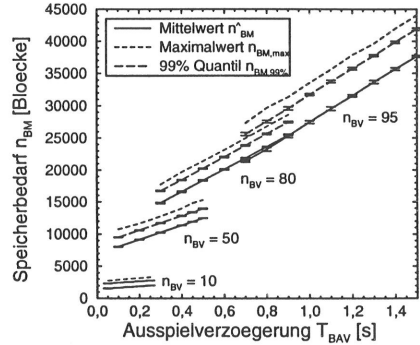


Bild 6.64: Einfluß der Ausspielverzögerung T_{BAV} und der Anzahl der Videodatenströme n_{BV} auf den Speicherbedarf n_{BM}

Abnahme ist um so kleiner, je mehr Videodatenströme durch die Bedienstation verwaltet werden müssen. Die Ausspielverzögerung muß in Abhängigkeit der Anzahl der Videodatenströme so groß gewählt werden, daß nur ein sehr kleiner Teil der Videobilder nicht zur Verfügung steht. Fehlende Bilder können u.a. durch Wiederholung des vorhergehenden Bildes überbrückt werden. Zusätzliche Maßnahmen sind zu treffen, wenn das verlorene Bild ein P- oder I-Bild ist. Die für die Zwischenspeicherung der Videobilder notwendige Größe des Video-RAMs in Abhängigkeit der Ausspielverzögerung zeigt Abbildung 6.64.

Prinzipiell ist es möglich, daß mehrere Videodatenströme etwa dieselben Videodaten benötigen und diese nur einmal durch die Bedienstation angefordert werden müssen. Bei rein statistisch verteilter Auswahl der Videofilme und der hier verwendeten Zahl von Videodatenströmen ist jedoch die gemeinsame Benutzung von Videodaten im Video-RAM der Bedienstation durch mehrere Videodatenströme sehr selten. Vergleicht man die Ergebnisse für verschiedene Modellierungsmethoden des Benutzerverhaltens, läßt sich auch durch die stark asymmetrische Auswahl der Videofilme keine Veränderung dieses Verhaltens erzielen. Da durch die Präferenz für wenige Videofilme hauptsächlich ein eng begrenzter Teil des Adreßraums der Festplatten verwendet wird, ergibt sich ein geringfügig besseres Verhalten der Speichersysteme, weil die Positionierzeiten der Festplatten im Mittel kürzer sind.

In [295] wird ein Verfahren vorgestellt, das für Videodatenströme mit konstanter Bitrate durch längere Speicherung der Videodaten eines Stroms in der Bedienstation das Mitbenutzen der Daten durch andere Ströme ermöglicht und auch Videorekorderfunktionen unterstützt. Das läßt sich auch auf die in diesen Untersuchungen verwendeten Videodatenströme mit variabler Bitrate anwenden und bietet Raum für weitere Untersuchungen.

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Aspekte der Modellierung und Leistungsuntersuchung eines Video-On-Demand-Dienstes untersucht, für den MPEG-codierte Videodatenströme mit variabler Bitrate verwendet werden. Es wurde untersucht, in wieweit ein verteiltes Video-On-Demand-System in der Lage ist, mehreren Benutzern Videodatenströme über ein Breitband-Kommunikationsnetz zur Verfügung zu stellen. Die Übertragung der Videodatenströme vom Video-On-Demand-System zum Teilnehmerendgerät erfolgt dabei über das B-ISDN, das als Übertragungs-, Multiplex- und Vermittlungsprinzip den Asynchronen Transfer-Modus verwendet. Da die ATM-Technik die Möglichkeit des statistischen Multiplexens bietet, wurde die Überlagerung mehrerer VBR MPEG-codierter Videodatenströme durch einen statistischen Multiplexer betrachtet.

Die Arbeit beinhaltet die hierarchische stochastische Modellierung des Verhaltens VBR MPEG-codierter Videodatenströme und die Modellierung der für die Bereitstellung der Videodatenströme wesentlichen Komponenten eines verteilten Video-On-Demand-Systems, das eine hierarchische Speicherstruktur besitzt, die aus Festplatten mit Festplatten-Caches, dem Hauptspeicher der RAID-Steuerungen und dem Hauptspeicher der Bedieneinheiten besteht. Da für das Verhalten des Video-On-Demand-Systems sowohl verkehrstheoretische Aspekte als auch Synchronisationsmechanismen und eventuelle Blockierungen einzelner Teilkomponenten wesentlich sind, werden als Strukturkomponenten für die Modellierung verkehrstheoretische Elemente (Generatoren, Bedieneinheiten, Warteschlangen, Verzweigungen und Zusammenführungen) in Verbindung mit Transitionen aus der Theorie der Petri-Netze verwendet.

Die Grundlage für die Untersuchung technischer Systeme, die VBR-Videodatenströme verarbeiten, ist die möglichst exakte Modellierung der stochastischen Eigenschaften der Videodatenströme. Diese Eigenschaften sind sowohl vom verwendeten Codiervorgang als auch vom Videoinhalt abhängig. Als Codiervorgang hat sich in den letzten Jahren das MPEG-Codiervorgang mehr und mehr durchgesetzt.

Die Nachbildung des stochastischen Verhaltens der VBR MPEG-codierten Videodatenströme erfolgt durch ein hierarchisches Modell mit drei Zeitebenen. Damit kann das Verhalten auf der Szenenebene (Sekunden bis wenige Minuten), der Bildebene (Millisekunden bis wenige Sekunden) und der Zellebene (Mikrosekunden bis wenige Millisekunden) getrennt modelliert werden. Das Verhalten auf der Zellebene ist gekennzeichnet durch die Art und Weise, in der die Videodaten in ATM-Zellen paketierte werden.

Die Bildebene wird durch den MPEG-Codieralgorithmus dominiert, der drei verschiedene Bildtypen verwendet. Die Bildtypen unterscheiden sich durch die Anwendung verschiedener Prädiktionsverfahren, durch die unterschiedliche Kompressionsfaktoren erzielt werden. Da die Bildtypen in periodischer Abfolge verwendet werden, ergibt sich eine für die gewählte GOP-Folge charakteristische periodische Schwankung der Videodatenmenge, die pro Bild zu übertragen ist. Längerfristige Schwankungen des Informationsinhalts der Bilder ergeben sich durch Kamerabewegungen, Bewegungen der aufgenommenen Objekte und Szenen mit unterschiedlich komplexem Bildaufbau. Diese Effekte werden der Szenenebene zugeordnet. Für die Bestimmung der Parameter des Modells wurden die stochastischen Kenngrößen einer etwa 82 Minuten langen VBR MPEG-codierten Sequenz des Spielfilms „Krieg der Sterne“ verwendet.

Die Untersuchungen haben gezeigt, daß sich die empirischen Verteilungsfunktionen der Videodatenmengen pro codiertem Bild für alle drei Bildtypen sehr gut durch logarithmische Normalverteilungen nachbilden lassen, deren Mittelwerte und Varianzen mit den empirischen Momenten übereinstimmen. Damit läßt sich das Verhalten der Videodatenströme auf der Bildebene durch die periodische Verwendung von drei logarithmisch normalverteilten Zufallsvariablen beschreiben, wobei die empirische, asymptotisch periodische Autokorrelationsfunktion hinreichend genau nachgebildet wird.

Die Einflüsse auf der Szenenebene sind in komplexer Weise vom Videoinhalt abhängig und daher schwierig quantitativ zu erfassen. Es hat sich jedoch gezeigt, daß die Summe der Einflüsse ein selbstähnliches (fraktales) Verhalten der Videodatenströme erzeugt, ersichtlich z. B. in einem speziellen Verlauf der Autokorrelationsfunktion (Langzeitkorrelation). Dies legt es nahe, das Verhalten auf der Szenenebene durch einen fraktalen stochastischen Prozeß nachzubilden, dessen Korrelationsverhalten durch einen einzigen Parameter, den Hurst-Parameter, beschrieben wird. Neben fraktal differenzierten ARIMA-Prozessen besitzen fraktale Gauß-Prozesse die gewünschten Eigenschaften. In Kapitel 4 und 5 sowie Anhang C wird gezeigt, daß sich das empirische Verhalten der „Krieg der Sterne“-Sequenz in den für diese Arbeit betrachteten Zeiträumen durch einen näherungsweise selbstähnlichen fGn-Prozeß modellieren läßt, der sich sehr gut für die Implementierung auf einer Rechenanlage eignet und daher für die ereignisgesteuerte Simulation verwendet werden kann.

Die Validierung des dreistufigen hierarchischen Modells durch die Simulation eines statistischen Multiplexers in Kapitel 5 zeigt eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse bei Verwen-

dung des Modells im Vergleich zur Verwendung der empirischen Daten des Spielfilms „Krieg der Sterne“.

Die systematische Untersuchung der Überlagerungs- und Multiplex-Eigenschaften der VBR MPEG-codierten Videodatenströme und die daraus resultierende Zellverlustwahrscheinlichkeit des statistischen Multiplexers für verschiedene Parameterkombinationen zeigt deutlich drei verschiedene Verlustbereiche, die von der gewählten Puffergröße des Multiplexers abhängen und den drei Hierarchieebenen des Modells zugeordnet werden können.

Für kleine Puffer (Maximalzahl der Zellen, die zwischengespeichert werden können, liegt in der Größenordnung der Zahl der Videodatenströme) kann es bereits durch das ungünstige zeitliche Eintreffen der Zellen der asynchronen Videodatenströme zu Zellverlusten kommen. Diese Zellverlustwahrscheinlichkeit auf der Zellebene nimmt mit wachsender Puffergröße sehr schnell ab. Ab einer bestimmten Puffergröße beginnt die Zellverlustwahrscheinlichkeit bei steigender Puffergröße wesentlich langsamer zu sinken, da dann die Schwankungen in der Zellankunftsrate, hervorgerufen durch die unterschiedlich stark komprimierten Videobilder, die Zellverluste bestimmen (Verluste auf der Bildebene). Die Größenordnung der Verlustwahrscheinlichkeit wird durch den Paketierungsmodus und die Phasenlage der Videodatenströme zueinander bestimmt. Durch sehr große Puffer können auch die Schwankungen durch unterschiedliche Bildgrößen mehr und mehr ausgeglichen werden. Die Verlustwahrscheinlichkeit wird dann durch die noch längerfristigen Schwankungen des Datenvolumens auf der Szenenebene bestimmt. Die Verlustwahrscheinlichkeit ist in diesem Bereich abhängig vom Grad der Langzeitkorrelation, der durch den Hurst-Parameter beschrieben wird.

In Kapitel 6 wird die Leistungsfähigkeit eines verteilten Video-On-Demand-Systems mit hierarchischer Speicherstruktur untersucht, das RAID-Systeme mit RAID Level 0 verwendet. Die Bereitstellung der Videodatenströme durch das verteilte Video-On-Demand-System geschieht intern über ein einfaches Protokoll.

Die wichtigsten Kenngrößen für die Leistung einer Festplatte sind die Antwortzeit eines Auftrags und der erzielbare Datendurchsatz, d. h. die Festplattenauslastung, die durch eine bestimmte Datenleserate hervorgerufen wird. Beide Kenngrößen werden durch die effektive Nutzung des Festplatten-Caches positiv beeinflusst. Die Festplatte kann für einen in aufeinanderfolgenden Sektoren abgelegten Videodatenstrom durch aggressives Read-Ahead die als nächstes benötigten Videodaten in den Cache lesen, so daß sie beim Eintreffen des Auftrags nicht vom Magnetplattenspeicher gelesen werden müssen und deshalb erheblich schneller bereitgestellt werden können. Die Read-Ahead-Größe ist von der Größe des Festplatten-Caches und der Anzahl der Videodatenströme abhängig.

Für kleine Auftragsgrößen wird die Antwortzeit einer Festplatte durch die Positionierung der mechanischen Komponenten bestimmt. Bei großen Auftragsgrößen dominiert die Datenleserate des Magnetplattenspeichers und die Übertragungsgeschwindigkeit des Peripheriebusses,

so daß die Antwortzeit nahezu proportional zur Auftragsgröße ist. Durch große Auftragsgrößen wird ein höherer Datendurchsatz erreicht, obwohl die Cache-Trefferrate bei vielen Videodatenströmen stark sinkt. Die für das Gesamtverhalten des Systems günstigste Wahl der mittleren Auftragsgröße ergibt sich so aus einem Kompromiß, um eine möglichst kleine Antwortzeit bei möglichst großem Datendurchsatz zu erzielen. Bei den in dieser Arbeit verwendeten Festplattenparametern ergibt sich eine günstige mittlere Auftragsgröße von etwa 100–120 kbyte, und eine Festplatte kann bei akzeptablen Antwortzeiten bis zu zehn Videodatenströme mit einer Datenrate von je ca. 1,8 Mbit/s parallel bedienen.

In einem RAID-System werden mehrere Festplatten zusammengefaßt und der Adreßraum durch *striping* so aufgeteilt, daß mehrere Festplatten parallel einen RAID-Auftrag bearbeiten können, um dadurch die Antwortzeit zu verringern und den Videodatendurchsatz zu erhöhen. Die Wahl der Größe der Streifeneinheit in Relation zu der mittleren Größe der RAID-Aufträge bestimmt die mittlere Anzahl der Festplatten, die einen Auftrag parallel bearbeiten und damit, über die Gesamtzahl der Festplatten des RAID-Systems, die mittlere Anzahl der RAID-Aufträge, die durch das RAID-System parallel bearbeitet werden können. Gleichzeitig beeinflußt die Größe der Streifeneinheit die Größe der Festplattenaufträge und den Pufferspeicherbedarf der Videodatenströme in der RAID-Steuerung. Werden die RAID-Auftragsgröße und die Größe der Streifeneinheit relativ klein gewählt, erhält man einen geringen Datendurchsatz der Festplatten und der Peripheriebusse, aber auch geringe Bearbeitungszeiten für die RAID-Aufträge sowie einen geringen Pufferspeicherbedarf. Für große RAID-Aufträge und Streifeneinheiten steigt der Datendurchsatz, aber auch die mittlere Bearbeitungszeit und der Speicherbedarf.

Die günstige Wahl der mittleren Größe der RAID-Aufträge und der Größe der Streifeneinheit ist abhängig von der Anzahl der Festplatten des RAID-Systems. Bei der Verwendung von neun Festplatten ist eine mittlere Größe der RAID-Aufträge von etwa 300 kbyte bei einer Größe der Streifeneinheit von 200 kbyte optimal.

Die Zeitspanne, die vergeht, bis die einzelnen Videobilder eines Videodatenstroms nach der Anforderung durch das hierarchische Speichersystem zur Verfügung gestellt werden können, unterliegt statistischen Schwankungen. Da die Videobilder zum Endteilnehmer periodisch übermittelt werden, muß der Start der Übermittlung um eine gewisse Zeitspanne verzögert werden. Die Videobilder werden solange zwischengepuffert. So wird die Wahrscheinlichkeit gering gehalten, daß ein Videobild zu seinem Übertragungsbeginn nicht bereitsteht. Die notwendige Verzögerungszeit ist abhängig von der Anzahl der Videodatenströme des Video-On-Demand-Systems und bestimmt die Größe des notwendigen Pufferspeichers.

Die in dieser Arbeit vorgestellten Ergebnisse für die Leistungsfähigkeit eines verteilten Video-On-Demand-Systems beruhen auf der Modellierung von dessen abstrakter hierarchischer Systemarchitektur. Dabei wurden insbesondere die für die Bereitstellung der Videodatenströme benötigten Speicher- und Übertragungskomponenten modelliert. So konnten wich-

tige Aussagen gemacht werden, wie die Parameter dieser Komponenten zu wählen sind, um eine optimale Gesamtleistung zu erzielen. Gleichzeitig wurden Erkenntnisse gewonnen, welche Ressourcen für die Bereitstellung einer bestimmten Anzahl von Videodatenströmen notwendig sind.

Die Untersuchung implementierungsspezifischer Aspekte einzelner Komponenten war im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Für die Leistungsbewertung einer konkreten Realisierung einer VOD-Systemarchitektur muß das vorgestellte VOD-Systemmodell erweitert werden, um z.B. die Verwendung eines bestimmten Betriebs- oder Videodatenbanksystems zu modellieren und die Leistungsgrenzen der verwendeten CPUs oder interner Systembusse einzelner Komponenten zu berücksichtigen. Untersuchungen dieser Art müssen jedoch durch den prototypischen Aufbau eines solchen Systems komplementiert werden, um die für die Modellierung notwendigen Leistungsgrößen zu messen. Schließlich besteht die Möglichkeit, das durch das Modell prognostizierte Verhalten des Systems am Prototyp zu validieren.

Literaturverzeichnis

- [1] A. Adas, A. Mukherjee, *On Resource Management and QoS Guarantees For Long Range Dependent Traffic*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, April 4-6, 1995, pp. 779-787.
- [2] M. T. Andrade, A. P. Alves, *Functional architecture of an ATM channel adapter for MPEG2 applications*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26-27, 1994, paper E1.
- [3] R. Ø. Andreassen, P. J. Emstad, T. Riksaasen, *Cell Losses of Multiplexed VBR MPEG Sources in an ATM-Multiplexer*, the twelfth Nordic teletraffic seminar (NTS 12), VTT Symposium 154 (I. Norros, J. Virtamo eds.), Espoo, Finland, August 22-24, 1995, pp. 83-95.
- [4] American National Standard for Information Systems, Small Computer Systems Interface X3.131-1986 (SCSI-1), 1986.
- [5] American National Standard for Information Systems, Small Computer Systems Interface X3.131-1994 (SCSI-2), 1994.
- [6] R. Aravind, G. L. Cash, D. L. Duttweiler, H.-M. Hang, B. G. Haskell, A. Puri, *Image and Video Coding Standards*, AT&T Technical Journal, Vol. 72, No. 1, January/February 1993, pp. 67-89.
- [7] H. Armbrüster, K. Wimmer, *Broadband Multimedia Applications Using ATM Networks: High-Performance Computing, High-Capacity Storage, and High-Speed Communication*, JSAC, Vol. 10, No. 9, pp. 1382-1396.
- [8] The ATM Forum Technical Committee, *DS1 Physical Layer Specification*, September 1994.
- [9] The ATM Forum Technical Committee, *Mid-range Physical Layer Specification for Category 3 Unshielded Twisted-Pair*, September 1994.
- [10] The ATM Forum Technical Committee, *Physical Interface Specification for 25.6 Mb/s over Twisted Pair Cable*, November 7, 1995.
- [11] The ATM Forum Technical Committee, *User-Network Interface (UNI) Specification*, Version 3.1, September 1994.
- [12] G. Benettin, L. Galgani, A. Giorgilli, J.-M. Strelcyn, *Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and Hamiltonian Systems; A Method for Computing all of them, Part 1: Theory*, *Mechanica* 15, March 1980, pp. 9-20.

- [13] G. Benettin, L. Galgani, A. Giorgilli, J.-M. Strelcyn, *Lyapunov Characteristic Exponents for Smooth Dynamical Systems and Hamiltonian Systems; A Method for Computing all of them, Part 2: Numerical Application*, *Mechanica* 15, March 1980, pp. 21-30.
- [14] U. Black, *ATM: Foundation for Broadband Networks*, Prentice Hall, Inc., 1995.
- [15] H. Bögeholz, R. Schneider, G. Schnurer, *Byte-Milliardäre, Moderne Festplatten mit SCSI- und IDE-Interface*, c't, Juni 1995, S. 120-124.
- [16] K. Bosch, *Elementare Einführung in die Wahrscheinlichkeitsrechnung*, 5. durchgesehene Auflage, Friedr. Vieweg & Sohn, 1986.
- [17] P. Boyer, *A Congestion Control for the ATM*, Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Morristown, October 1990, paper 4.3.
- [18] P. Boyer, D. Tranchier, *A Reservation Principle with Applications to the ATM Traffic Control*, *Computer Networks and ISDN Systems* 24, North Holland, 1992, pp. 321-334.
- [19] P. Brady, *A Model for Generating On-Off Speech Patterns in Two-Way Conversation*, *Bell Systems Technical Journal*, Vol. 48, 1969, pp. 2445-2472.
- [20] U. Briem, *Performance Comparison of Resource Sharing Schemes in a Connectionless Server on Top of ATM*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress - ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 1109-1119.
- [21] M. M. Buddhikot, G. M. Parulkar, J. R. Cox, Jr., *Design of a Large Scale Multimedia Storage Server*, *Computer Networks and ISDN Systems*, Vol. 27, 1994, pp. 503-517.
- [22] D. S. Burpee, P. W. Shumate, Jr., *Emerging Residential Broadband Telecommunications*, Proceedings of the IEEE, Vol. 82, No. 4, April 1994, pp. 604-614.
- [23] P. Cao, S. B. Lim, S. Venkataraman, J. Wilkes, *The TickerTAIP Parallel RAID Architecture*, *ACM Transactions on Computer Systems*, Vol. 12, No. 3, August 1994, pp. 236-269.
- [24] S. K. Chan, A. Leon-Garcia, *Analysis of Cell Inter-arrival from Video Codecs*, Proceedings of IEEE INFOCOM '94, Toronto, Canada, June 14-16, 1994, pp. 350-357.
- [25] S. K. Chan, K. Sharifi, A. Leon-Garcia, *Layered Transmission of MPEG-2 Video in ATM Environment*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26-27, 1994, paper D1.
- [26] M.-S. Chen, D. D. Kandlur, P. S. Yu, *Using Rate Staggering to Store Scalable Video Data in a Disk-Array-Based Video Server*, Proceedings of Multimedia Computing and Networking 1995, San Jose, CA, February 6-8, 1995, pp. 338-235.
- [27] M.-S. Chen, D.D. Kandlur, P.S. Yu, *Support for Fully Interactive Playout in a Disk-Array-Based Video Server*, *ACM Multimedia '94*, San Francisco, CA, October 1994, pp. 391-398.
- [28] P. M. Chen, E. K. Lee, *Striping in a RAID Level 5 Disk Array*, Proceedings Joint International Conference on Measurement & Modelling of Computer Systems, Sigmetrics '95 / Performance '95, May 15-19, Ottawa, Canada, 1995, pp. 136-145.

- [29] P. M. Chen, D. A. Patterson, *Maximizing Performance in a Striped Disk Array*, Proceedings of the 17th International Symposium on Computer Architecture, IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, Order No. 2047, May 1990, pp. 322-331.
- [30] A. L. Cherenak, *Tertiary Storage: An Evaluation of New Applications*, Ph.D. dissertation, University of California, Berkeley, December 1994.
- [31] L. Chiariglione, *MPEG: A Technological Basis for Multimedia Applications*, IEEE Multimedia, Spring 1995, pp. 85-89.
- [32] S. Choshdury, K. Sohrawy, *Bandwidth allocation algorithms for packet video in ATM networks*, Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 26, 1994, pp. 1215-1223.
- [33] E. Çinlar, *Introduction to Stochastic Processes*, Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1975.
- [34] M. R. Civanlar, G. L. Cash, *An Experimental System for MPEG-2 Video Transmission over ATM Networks*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26-27, 1994, paper C2.
- [35] E. G. Coffman, Jr., M. Hofri, *Queueing Models of Secondary Storage Devices*, Stochastic Analysis of Computer and Communication Systems, H. Takagi (editor), Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1990, pp. 549-588.
- [36] D. Coggins, P. Dennis, *Digital Video: Services, Technology and Architecture*, Telecommunication Journal of Australia, Vol. 43, No. 3, 1993, pp. 9-16.
- [37] D. M. Cohen, D. P. Heyman, *Performance Modeling of Video Teleconferencing in ATM Networks*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 3, No. 6, December 1993, pp. 408-420.
- [38] M. Conti, E. Gregori, *VBR Video on the FODA Satellite Network*, High Speed Networks and their Performance (C-21), H. G. Perros and Y. Viniotis (Editors), Elsevier Science B.V. (North-Holland), 1994, pp. 257-270.
- [39] D. R. Cox, *Long-Range Dependence: A Review*, Statistics: An Appraisal, Proceedings 50th Anniversary Conference Iowa State Statistical Laboratory, H. A. David and H. T. David (Editors), The Iowa State University Press, 1984, S. 55-74.
- [40] D. R. Cox, P. A. W. Lewis, *The Statistical Analysis of Series of Events*, Methuen & Co Ltd., London, 1966.
- [41] D. R. Cox, H. D. Miller, *The Theory of Stochastic Processes*, Chapman and Hall Ltd., London, 1965.
- [42] H. Cramér, *Mathematical Methods of Statistics*, Princeton University Press, 1958.
- [43] S. Crosby, *In-call Renegotiation of Traffic Parameters*, Proceedings of IEEE INFOCOM '93, San Francisco, 1993, pp. 638-646.
- [44] J. N. Daigle, J. D. Langford. *Models for Analysis of Packet Voice Communications Systems*, JSAC, Vol. 4, No. 6, September 1986, pp. 847-855.

- [45] A. Dailianas, A. Bovopoulos, *Real-time Admission Control Algorithms with Delay and Loss Guarantees in ATM Networks*, IEEE INFOCOM '94, Toronto, Canada, June 1994, pp. 1065-1072.
- [46] A. Dan, D. M. Dias, R. Mukherjee, D. Sitaram, R. Tewari, *Buffering and Caching in Large-Scale Video Servers*, digest of papers COMPCON '95 Technologies for the Information Superhighway, San Francisco, CA, March 5-9, 1995, pp. 217-224.
- [47] G. Damm, G. Babonneau, A.-L. Beylot, M. Becker, *Performance Evaluation of a Multimedia Server for ATM Networks*, Proceedings of the 27th Annual Simulation Symposium, La Jolla, CA, April 11-15, 1994, pp. 41-50.
- [48] Digital Audio-Visual Council, *DAVIC 1.0 Specification: Part 02: System reference models and scenarios, Part 04: Delivery system architectures and APIs, Revision 4.1*, October 1995.
- [49] B. DeCleene, P. Pancha, M. El Zarki, H. Sorensen, *Comparison of Priority Partition Methods for VBR MPEG*, Proceedings of IEEE INFOCOM '94, Toronto, Canada, June 14-16 1994, pp. 689-696.
- [50] D. Deloddere, W. Verbiest, H. Verhille, *Interactive Video On Demand*, IEEE Communications Magazine, May 1994, pp. 82-88.
- [51] M. de Prycker, *Asynchronous Transfer Mode: Solution for Broadband ISDN*, Prentice Hall, 1995.
- [52] S. S. Dixit, P. Skelly, *Video Traffic Smoothing and ATM Multiplexer Performance*, Proceedings of GLOBECOM '91, Phoenix, AZ, December 1991, pp. 239-243.
- [53] J. K. Dey-Sircar, J. D. Salehi, J. F. Kurose, D. Towsley, *Providing VCR Capabilities in Large-Scale Video Servers*, ACM Multimedia '94, San Francisco, CA, October 1994, pp. 25-32.
- [54] B. Doshi, S. Dravida, *Congestion Control in High Speed Wide Area Packet Networks: In-Call Parameter Negotiations*, Proceedings of the 7th ITC Specialist Seminar, Morristown, October 1990, paper 12.5.
- [55] P. Douglas, M. Vetterli, *Statistical Analysis of the Output Rates of Two Variable Bit-rate Video Coders*, Proceedings of the Third International Workshop on Packet Video, Morristown, NJ, 22-23 March 1990.
- [56] Y. N. Doğanata, A. N. Tantawi, *Making a Cost-Effective Video Server*, IEEE Multi-Media, Vol. 1, No. 4, Winter 1994, pp. 22-30.
- [57] A. L. Drapeau, K. W. Shirriff, J. H. Hartman, E. L. Miller, S. Seshan, R. H. Katz, K. Lutz, D. A. Patterson, E. K. Lee, P. M. Chen, G. A. Gibson, *RAID-II: A High-Bandwidth Network File Server*, (Proceedings of the 21st Annual International Symposium on Computer Architecture, April 18-21, 1994) Computer Architecture News, Vol. 22, No. 2, April 1994, pp. 234-244.
- [58] Duden Informatik: ein Sachlexikon für Studium und Praxis, hrsg. vom Lektorat des BI-Wiss.-Verl. unter Leitung von H. Engesser, 2. Auflage, Dudenverlag, 1993.

- [59] M. Egerter, *Untersuchung und Bewertung von Videodaten unter Verwendung unterschiedlicher Kompressionsverfahren*, Diplomarbeit Nr. 1298, IND, Universität Stuttgart, Juni 1994.
- [60] A. Elwalid, D. P. Heyman, T. V. Lakshman, D. Mitra, *Efficient admission control of video teleconference sources*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26–27 1994, paper D10.
- [61] J. Engel, *Modellierung von ATM-Videoquellen*, Diplomarbeit Nr. 1272, IND, Universität Stuttgart, März 1994.
- [62] J. Enssle, *Modelling and Statistical Multiplexing of VBR MPEG Compressed Video in ATM Networks*, Proceedings of the 4th Open Workshop on High Speed Networks, Brest, France, September 7-9, 1994, pp. 59-67.
- [63] J. Enssle, *Modelling of Short and Long Term Properties of VBR MPEG Compressed Video in ATM Networks*, Proceedings of the 1995 Silicon Valley Networking Conference & Exposition, San Jose, CA, April 5-7, 1995, pp. 95-107.
- [64] J. Enssle, U. Briem, H. Kröner, *Performance Analysis of Fast Reservation Protocols for ATM Networks*, Performance Modelling and Evaluation of ATM Networks, Volume 1, D. D. Kouvatso (ed.), Chapman & Hall, 1995, pp. 57-72.
- [65] A. Erramilli, J. Gordon, W. Willinger, *Applications of Fractals in Engineering for Realistic Traffic Processes*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress – ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 35-44.
- [66] A. Erramilli, P. Pruthi, W. Willinger, *Self-Similarity in High-Speed Network Traffic Measurements: Fact or Artifact?*, the twelfth Nordic teletraffic seminar (NTS 12), VTT Symposium 154 (I. Norros, J. Virtamo eds.), Espoo, Finland, August 22-24, 1995, pp. 299-310.
- [67] A. Erramilli, R. P. Singh, P. Pruthi, *Chaotic Maps As Models for Packet Traffic*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress – ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 329-338.
- [68] L. Fahrmeir, H. L. Kaufmann, F. Ost, *Stochastische Prozesse, Eine Einführung in Theorie und Anwendungen*, Carl Hanser Verlag, 1981.
- [69] J. D. Farmer, E. Ott, J. A. Yorke, *The Dimension of Chaotic Attractors*, Physica 7D, 1983, pp. 153-180.
- [70] W. Feller, *The Asymptotic Distribution of the Range of Sums of Independent Random Variables*, The Annals of Mathematical Statistics, Vol. 22, 1951, S. 427-432.
- [71] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and its Applications, Volume I*, John Wiley & Sons, Inc., 1966.
- [72] W. Feller, *An Introduction to Probability Theory and its Applications, Volume II*, John Wiley & Sons, Inc., 1966.

- [73] W.-C. Feng, S. Sechrest, *Smoothing and Buffering for Delivery of Prerecorded Compressed Video*, Proceedings of Multimedia Computing and Networking 1995 (SPIE Vol. 2417), San Jose, CA, February 6-8, 1995, pp. 234-242.
- [74] J. Filipiak, *M-Architecture: A Structural Model of Traffic Mangement and Control in Broadband ISDNs*, IEEE Communications Magazine, 1989, pp. 25-31.
- [75] W. Fischer, K. Meier-Hellstern, *The Markov-modulated Poisson process (MMPP) cookbook*, Performance Evaluation, Vol. 18, 1992, pp. 149-171.
- [76] R. Franz, M. Scholz, *Interactive Video - services, success factors and network solutions*, Proceedings ISS '95, Berlin, April 1995, Vol. 2, pp. 256-260.
- [77] M. R. Frater, J. F. Arnold, P. Tan, *A New Statistical Model for Traffic Generated by VBR Coders for Television on the Broadband ISDN*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 4, No. 6, December 1994, pp.521-526.
- [78] V. S. Frost, B. Melamed, *Traffic Modeling For Telecommuncations Networks*, IEEE Communications Magazine, March 1994, pp. 70-81.
- [79] T. Fujii, M. Nomura, N. Ohta, *Characterization of Variable Rate Inter-frame Video Coding for ATM-based Networks*, IEEE GLOBECOM '88, Hollywood, FL, November 28-December 1 1988, pp. 1063-1067.
- [80] R. M. Fujimoto, *Parallel Discrete Event Simulation*, Communications of the ACM, Vol. 33, No. 10, October 1990, pp. 30-53.
- [81] B. Furht, D. Kalra, F. L. Kitson, A. A. Rodriguez, W. E. Wall, *Design Issues for Interactive Television Systems*, IEEE Computer, Vol. 28, No. 5, May 1995, pp. 25-39.
- [82] D. Le Gall, *MPEG: A Video Compression Standard for Multimedia Applications*, Communications of the ACM, Vol. 34, No. 4, April 1991, pp. 46-58.
- [83] G. R. Ganger, B. L. Worthington, R. Y. Hou, Y. N. Patt, *Disk Subsystem Load Balancing: Disk Striping vs. Conventional Data Placement*, Proceedings of the 26th Hawaii Int'l Conf. System Sciences, Vol. 1, IEEE CS Press, Los Alamitos, CA, Order No. 3230, 1993, pp. 40-49.
- [84] G. R. Ganger, B. L. Worthington, R. Y. Hou, Y. N. Patt, *Disk Arrays: High-Performance, High-Reliability Storage Subsystems*, IEEE Computer, Vol. 27, No. 3, March 1994, pp. 30-36.
- [85] M. W. Garrett, *Contributions Toward Real-Time Services on Packet Switched Networks*, Ph.D. Thesis, Columbia University, Center for Telecommunications Reserch, Department of Electrical Engineering, New York, NY, 1993.
- [86] M. W. Garrett, M. Vetterli, *Congestion Control Strategies for Packet Video*, Proceedings of the Fourth International Workshop on Packet Video, Kyoto, Japan, August 1991.
- [87] M. W. Garrett, W. Willinger, *Analysis, Modeling and Generation of Self-Similar VBR Video Traffic*, Computer Communication Review, Vol. 24, No. 4, October 1994, pp. 269-280.

- [88] A. D. Gelman, H. Kobrinski, L. S. Smoot, S. B. Weinstein, M. Fortier, D. Lemay, *A Store-and-Forward Architecture for Video-on-Demand Service*, Conference Record of ICC '91, Denver, June 23–26, 1991, pp. 842–846.
- [89] D. J. Gemmell, H. M. Vin, D. D. Kandlur, P. V. Rangan, L. A. Rowe, *Multimedia Storage Servers: A Tutorial*, IEEE Computer, Vol. 28, No. 5, May 1995, pp. 40–49.
- [90] N. D. Georganas, *Self-Similar ("Fractal") Traffic in ATM Networks*, Multimedia: Advanced Teleservices and High-Speed Communications Architectures, Proceedings of the Second International Workshop, IWACA '94, Heidelberg, Germany, R. Steinmetz (Ed.), Lecture Notes in Computer Science 868, Springer-Verlag, September 1994, pp. 1–7.
- [91] W. Geuppert, *Portierung und Erweiterung der IND-Simulationsbibliothek*, Studienarbeit Nr. 1345, IND, Universität Stuttgart, 1995.
- [92] H. Ghafir, H. Chadwick, *Multimedia Servers — Design and Performance*, IEEE GLOBECOM '94, San Francisco, November 28–December 2, 1994, pp. 886–890.
- [93] M. Ghanbari, C. J. Hughes, *Packing Coded Video Signals into ATM Cells*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 1, No. 5, October 1993, pp. 505–509.
- [94] O. Gühr, *Analyse datenflussregulierter Verbindungskonzepte in verteilten Systemen mit mehrschichtiger Protokollarchitektur*, 48. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Dissertation, IND, Universität Stuttgart, 1990.
- [95] L. B. Glass, *The SCSI Bus*, BYTE, Part 1: February 1990, pp. 267–274, Part 2: March 1990, pp. 291–297.
- [96] M. Graf, *Traffic Shaping of VBR Video in ATM Endsystems*, Proceedings of the 4th Open Workshop on High Speed Networks, Brest, France, September 7–9, 1994, pp. 38–43.
- [97] M. Grasse, J. F. Arnold, M. R. Frater, *Statistics of Variable Bit Rate Video Coders with and without Motion Compensation*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26–27, 1994, paper D5.
- [98] C. Grebogi, E. Ott, J. A. Yorke, *Chaos, Strange Attractors and Fractal Basin Boundaries in Nonlinear Dynamics*, Science, Vol. 238, October 1987, pp. 632–638.
- [99] U. Grenander, M. Rosenblatt, *Statistical Analysis of Stationary Time Series*, Wiley Publications in Statistics, John Wiley & Sons, New York, 1957.
- [100] J. Gruber, *A Comparison of Measured and Calculated Speech Temporal Parameters Relevant to Speech Activity Detection*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 30, No. 4, 1982, pp. 728–738.
- [101] R. Grünenfelder, J. P. Cosmas, S. Manthorpe, A. Odinma-Okafor, *Characterization of Video Codecs as Autoregressive Moving Average Processes and Related Queueing System Performance*, IEEE JSAC, Vol. 9, No. 3, April 1991, pp. 284–293.
- [102] I. W. Habib, T. N. Saadawi, *Multimedia Traffic Characteristics in Broadband Networks*, IEEE Communications Magazine, July 1992, pp. 48–54.

- [103] R. Händel, M. N. Huber, S. Schröder, *ATM Networks: Concepts, Protocols, Applications*, Addison-Wesley Publishing Company, 1994.
- [104] E. Hänsler, *Statistische Signale: Grundlagen und Anwendungen*, Springer Verlag, 1991.
- [105] D. D. Harman, G. Huang, G.-H. Im, M.-H. Nguyen, J.-J. Werner, M. K. Wong, *Local Distribution for IMTV*, IEEE MultiMedia, Vol. 2, No. 3, Fall 1995, pp. 14–23.
- [106] B. G. Haskell, *Buffer and Channel Sharing by Several Interframe Picturephone[®] Coders*, The Bell System Technical Journal, Vol. 51, No. 1, January 1992, pp. 261–289.
- [107] H. Heeke, *Statistical Multiplexing Gain for Variable Bit Rate Video Codecs in ATM Networks*, International Journal of Digital and Analog Communication Systems, Vol. 4, 1991, pp. 261–268.
- [108] H. Heffes, D. M. Lucantoni, *A Markov Modulated Characterization of Packetized Voice and Data Traffic and Related Statistical Multiplexer Performance*, JSAC, Vol. 4, No. 6, September 1986, pp. 856–868.
- [109] D. B. Hehmann, M. G. Salmony, H. J. Stüttgen, *Transport Services for Multimedia Communications on Broadband Networks*, Computer Communications, Vol. 13, No. 4, May 1990, pp. 197–203.
- [110] K. Hein, *Kompression — der Schlüssel zum digitalen Fernsehen: MPEG-2-Decoderbausteine für Set-Top-Boxen im Vergleich*, Elektronik 21, 1995, S. 122–140.
- [111] B. Heinrichs, R. Karabek, *Sprachübertragung über ISPNs: Messung und Modellierung*, Messung, Modellierung und Bewertung von Rechen- und Kommunikationssystemen, B. Walke und O. Spaniol (Hrsg.), Springer Verlag, 1993, S. 267–279.
- [112] B. E. Helvik, L. Hofseth, *Self-Similar Traffic and Multilevel Source Models*, the twelfth Nordic teletraffic seminar (NTS 12), VTT Symposium 154 (I. Norros, J. Virtamo eds.), Espoo, Finland, August 22–24, 1995, pp. 285–298.
- [113] D. P. Heyman, T. V. Lakshman, *Source Models for VBR Broadcast-Video Traffic*, Proceedings of IEEE INFOCOM '94, Toronto, Canada, June 14–16 1994, pp. 664–671.
- [114] D. P. Heyman, A. Tabatabai, T. V. Lakshman, *Statistical Analysis and Simulation Study of Video Teleconference Traffic in ATM Networks*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 2, No. 1, March 1992, pp. 49–59.
- [115] D. P. Heyman, A. Tabatabai, T. V. Lakshman, *Statistical Analysis of MPEG-2-Coded VBR Video Traffic*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, Oregon, September 26–27, 1994, paper B2.
- [116] K. W. Hippel, A. I. McLeod, *Preservation of the Rescaled Adjusted Range, 2. Simulation Studies Using Box-Jenkins Models*, Water Resources Research, Vol. 14, No. 3, 1978, pp. 509–516.
- [117] J. R. M. Hosking, *Modeling Persistence In Hydrological Time Series Using Fractional Differencing*, Water Resources Research, Vol. 20, No. 12, 1984, pp. 1898–1908.

- [118] P. Holmes, D. Whitley, *On the Attracting Set for Duffing's Equation*, Physica 7D, 1983, pp. 111-123.
- [119] R. ter Horst, *Compensation of cell losses and cell delay variations in an MPEG decoder*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26-27, 1994, paper D16.
- [120] J. Hsie, M. Lin, J. C. L. Liu, D. H. C. Du, T. M. Ruwart, *Performance of A Mass Storage System for Video-On-Demand*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, April 4-6, 1995, pp. 771-778.
- [121] S.-s. Huang, *Modeling and Analysis for Packet Video*, Proceedings of GLOBECOM '89, Dallas, TX, November 1989, pp. 881-885.
- [122] B. Huber, G. Schnurer, *SCSI 1-2-3, Pfade durch den SCSI-Dschungel*, c't, November 1993, S. 106-113.
- [123] J. Y. Hui, *Resource Allocation for Broadband Networks*, JSAC, Vol. 6, No. 9, 1988, pp. 1598-1608.
- [124] H. E. Hurst, *Long-Term Storage Capacity of Reservoirs*, Trans. Amer. Soc. Civil Eng., Vol. 116, pp. 770-799, 1951.
- [125] A. Ishikawa, J. Kishigami, N. Sakurai, N. Kotani, *Multiple-Access Moving Picture Information System (MAMI)*, Proceedings of GLOBECOM '92, Orlando, FL, December 6-9, 1992, pp. 759-763.
- [126] M. R. Ismail, I. E. Lambadaris, M. Devetsikiotis, A. R. Kaye, *Modelling Prioritized MPEG Video Using TES and a Frame Spreading Strategy for Transmission in ATM Networks*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, April 4-6 1995, pp. 762-770.
- [127] IMSL *STAT/LIBRARYTM FORTRAN subroutines for statistical Analysis*, Version 2.0 User's Manual, 1991.
- [128] ISO/IEC International Standard 11172 (Part 1: System, Part 2: Video, Part 3: Audio), *Information technology — Coding of moving pictures and associated audio for digital storage media up to about 1,5 Mbit/s*, 1993.
- [129] ISO/IEC Draft International Standard 13818 (Part 1: System (ITU-T Recommendation H.222.0), Part 2: Video (ITU-T Recommendation H.262), Part 3: Audio), *Information technology — Generic coding of moving Pictures and associated audio information*, 1994.
- [130] ITU-T, *Recommendation G.114: Mean One-Way Propagation Time*, Blue Book, Fascicle III.1, Geneva, 1989.
- [131] ITU-T, *Recommendation G.703: Physical/Electrical Characteristics of Hierarchical Digital Interfaces*, Geneva, 1991.
- [132] ITU-T *Recommendation G.804: ATM Cell Mapping into Plesiochronous Digital Hierarchy (PDH)*, Helsinki, 1993.
- [133] ITU-T, *Recommendation I.121: Broadband Aspects of ISDN*, Geneva, 1991.

- [134] ITU-T, *Recommendation I.150: B-ISDN Asynchronous Transfer Mode Functional Characteristics*, Helsinki, 1993.
- [135] ITU-T, *Recommendation I.211: B-ISDN Service Aspects*, Geneva, 1991.
- [136] ITU-T, *Recommendation I.321: B-ISDN Protocol Reference Model and its Application*, Geneva, 1991.
- [137] ITU-T, *Recommendation I.361: B-ISDN ATM Layer Specification*, Helsinki, 1993.
- [138] ITU-T, *Recommendation I.362: B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Functional Description*, Geneva, 1991.
- [139] ITU-T, *Recommendation I.363: B-ISDN ATM Adaptation Layer (AAL) Specification*, Geneva, 1991.
- [140] ITU-T, *Recommendation I.371: Traffic Control and Congestion Control in B-ISDN*, Geneva, 1992.
- [141] ITU-T, *Recommendation I.432: B-ISDN User-network Interface — Physical Layer Specification*, Geneva, 1991.
- [142] ITU-T, *Recommendation X.200: Reference Model of Open Systems Interconnection for CCITT Applications*, Blue Book, Fascicle VIII.4, Geneva, 1989.
- [143] M. R. Izquierdo, D. R. Reeves, *Statistical characterization of MPEG VBR video at the Slice layer*, Proceedings of Multimedia Computing and Networking 1995 (SPIE Vol. 2417), San Jose, CA, February 6–8, 1995, pp. 268–279.
- [144] D. L. Jagerman, B. Melamed, *The Transition and Autocorrelation structure of TES Processes Part I: General Theory*, Commun. Statist.—Stochastic Models, Vol. 8, No. 2, 1992, pp. 193–219.
- [145] D. L. Jagerman, B. Melamed, *The Transition and Autocorrelation structure of TES Processes Part II: Special Cases*, Commun. Statist.—Stochastic Models, Vol. 8, No. 3, 1992, pp. 499–527.
- [146] A. Jain, W. Fischer, P.-Y. Sibille, *Video Communications Using ATM*, Proceedings of ISS' 95, Berlin, Germany, Vol. 2, April 1995, pp. 261–265.
- [147] P. R. Jelenković, B. Melamed, *Automated TES Modeling of Compressed Video*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, April 4–6, 1995, pp. 746–752.
- [148] M. C. Jeruchim, *Techniques for Estimating the Bit Error Rate in the Simulation of Digital Communication Systems*, IEEE JSAC, Vol. 2, No. 1, January 1984, pp. 153–170.
- [149] R. Karedla, J. S. Love, B. G. Wherry, *Caching Strategies to Improve Disk System Performance*, IEEE Computer, Vol. 27, No. 3, March 1994, pp. 38–46.
- [150] G. Karlsson, *ATM Adaptation for Video*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26–27, 1994, paper E3.
- [151] Y. Kato, K. Matsuzaki, T. Marakami, H. Ohira, *A Study of FEC Methods for the ATM Transmission of MPEG-2 Transport Stream Packets*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26–27, 1994, paper D15.

- [152] M. Kawashima, C.-T. Chen, F.-C. Jeng, S. Singhal, *Adaptation of the MPEG Video-Coding Algorithm to Network Applications*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 3, No. 4, August 1993, pp. 261–269.
- [153] M. G. Kienzle, A. Dan, D. Sitaram, W. Tetzlaff, *Using Tertiary Storage in Video-on-Demand Servers*, digest of papers COMPCON '95 Technologies for the Information Superhighway, San Francisco, CA, March 5–9, 1995, pp. 225–233.
- [154] R. Kishimoto, Y. Ogata, F. Inumaru, *Generation Interval Distribution Characteristics of Packetized Variable Rate Video Coding Data Streams in an ATM Network*, IEEE JSAC, Vol. 7, No. 5, June 1989, pp. 833–841.
- [155] L. Kleinrock *Queueing Systems Volume 1: Theory*, John Wiley & Sons, 1975.
- [156] S. Kowtha, D. R. Vaman, G. Djuknic, *Realization of a Multimedia Traffic Generator Based on (μ, σ) Buffer Occupancy Analysis*, Journal of High Speed Networks, Vol. 1, No. 4, 1992, pp. 337–351.
- [157] H. Kröner, *Verkehrssteuerung in ATM-Netzen — Verfahren und verkehrstheoretische Analysen zur Zellpriorisierung und Verbindungsannahme*, 62. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Dissertation, IND, Universität Stuttgart, 1995
- [158] H. Kröner, T. Renger, R. Knobling, *Performance Modelling of an Adaptive CAC Strategy for ATM Networks*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress – ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 1077–1088.
- [159] M. Krunz, H. Hughes, *A Traffic Model for MPEG-Coded VBR Streams*, Performance Evaluation Review, Special Issue: Proceedings of the 1995 ACM Sigmetrics Joint International Conference on Measurement and Modeling of Computer Systems (Sigmetrics '95 / Performance '95), Vol. 23, No. 1, May 1995, pp. 47–55.
- [160] M. Krunz, R. Sass, H. Hughes, *Statistical Characteristics and Multiplexing of MPEG Streams*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, April 4–6, 1995, pp. 455–462.
- [161] M. Krunz, S. Tripathi, H. Hughes, *A Source Model for MPEG-coded Video Movies*, IEEE ATM Workshop '95, Washington, DC, Oct. 29–Nov. 1 1995, Session T4A, Submission 100.
- [162] P. J. Kühn, *Wartezeitprobleme der Daten- und Nachrichtenverkehrstheorie*, Vorlesungsskript, IND, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1991.
- [163] P. J. Kühn, *Datenverarbeitung II*, Vorlesungsskript, IND, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1995.
- [164] P. J. Kühn, T. Raith, P. Tran-Gia, *Methodik der stationären Systemsimulation*, Vorlesungsumdruck zur Ringvorlesung Methoden und Anwendungen der Systemsimulation, IND, Universität Stuttgart, 1994.
- [165] A. Kuratti, W. H. Sanders, *Performance Analysis of the RAID 5 Disk Array*, IEEE International Computer Performance and Dependability Symposium (IPDS '95), Erlangen, Germany, April 24–26, 1996, pp. 236–245.

- [166] S. S. Lam, S. Chow, D. K. Y. Yau, *An Algorithm for Lossless Smoothing of MPEG Video*, Computer Communication Review (Proceedings of SIGCOMM '94), Vol. 24, No. 4, pp. 281-293.
- [167] A. M. Law, W. D. Kelton, *Simulation Modeling & Analysis*, McGraw-Hill series in industrial engineering and management science, 1991.
- [168] E. K. Lee, *Performance Modelling and Analysis of Disk Arrays*, Ph.D. Dissertation, Graduate Division of the University of California at Berkeley, 1993.
- [169] E. K. Lee, R. K. Katz, *Performance Consequences of Parity Placement in Disk Arrays*, Proceedings ASPLOS, April 1991, pp. 190-191.
- [170] E. K. Lee, R. H. Katz, *The Performance of Parity Placements in Disk Arrays*, IEEE Transactions on Computer, Vol. 42, No. 6, June 1993.
- [171] E. K. Lee, R. H. Katz, *An Analytic Performance Model of Disk Arrays*, Proceedings of SIGMETRICS '93, Santa Clara, CA, May 1993, pp. 98-109.
- [172] D.-S. Lee, B. Melamed, A. R. Reibman, B. Sengupta, *TES modeling for analysis of a video multiplexer*, Performance Evaluation, Vol. 16, 1992, pp. 21-34.
- [173] B. G. Lee, M. Kang, J. Lee, *Broadband Telecommunications Technology*, Artech House, Inc., 1993.
- [174] H. Lee, C. Un, *A Study of On-Off Characteristics of Conversational Speech*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 34, No. 6, 1986, pp. 630-637.
- [175] W. E. Leland, M. S. Taqqu, W. Willinger, D. V. Wilson, *On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic (Extended Version)*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 2, No. 1, February 1994, pp. 1-14.
- [176] W. E. Leland, W. Willinger, M. S. Taqqu, D. V. Wilson, *Statistical Analysis and Stochastic Modeling of Self-Similar Datatraffic*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress - ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 319-328.
- [177] S.-Q. Li, J. W. Mark. *Traffic Characterization for Integrated Services Networks*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 38, No. 8, 1990, pp. 1231-1243.
- [178] W. P. Lidinsky, *Data Communications Needs*, IEEE Network Magazine, Vol. 4, No. 2, March 1990, pp. 28-33.
- [179] N. Likhanov, B. Tsybakov, N. D. Georganas, *Analysis of an ATM Buffer with Self-Similar ("Fractal") Input Traffic*, Proceedings of IEEE INFOCOM '95, Boston, MA, April 4-6, 1995, pp. 985-992.
- [180] A. Lippman, *Feature Sets for Interactive Images*, Communications of the ACM, Vol. 34, No. 4, April 1991, pp. 92-102.
- [181] T. D. C. Little, A. Ghafoor, *Network Considerations for Distributed Multimedia Object Composition and Communication*, IEEE Network Magazine 4, November 1990, pp. 32-49.

- [182] T. D. C. Little et al., *A Digital On-Demand Video Service Supporting Content-Based Queries*, Proceedings of ACM Multimedia '93, Anaheim, CA, August 1993, pp. 427-436.
- [183] E. N. Lorenz, *Lyapunov Numbers and the Local Structure of Attractors*, Physica 17D, 1985, pp. 279-294.
- [184] D. M. Lucantoni, M. F. Neuts, A. R. Reibman, *Methods for Performance Evaluation for VBR Video Traffic Models*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 2, No. 2, April 1994, pp. 176-180.
- [185] B. Maglaris, D. Anastassiou, P. Sen, G. Karlsson, J. D. Robbins, *Performance Models of Statistical Multiplexing in Packet Video Communications*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 36, No. 7, July 1988, pp. 834-843.
- [186] S. Makgill, *Compressed Video over ATM*, Defining the Global Information Infrastructure: Infrastructure, Systems and Services, S. F. Lundstrom (editor), Critical Reviews of Optical Science and Technology, Vol. CR56, SPIE Optical Engineering Press, 1994, pp. 332-339.
- [187] M. Malhotra, K. S. Trivedi, *Data integrity analysis of disk array systems with analytic modeling of coverage*, Performance Evaluation, Vol. 22, 1995, pp. 111-133.
- [188] B. B. Mandelbrot, *A Fast Fractional Gaussian Noise Generator*, Water Resources Research, Vol. 7, No. 3, 1971, S. 543-553.
- [189] B. B. Mandelbrot, J. W. van Ness, *Fractional Brownian Motions, Fractional Noises and Applications*, SIAM Review, Vol. 10, No. 4, October 1968, pp. 422-437
- [190] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, *Computer Experiments with Fractional Gaussian Noises. Part 1, Averages and Variances*, Water Resources Research, Vol. 5, No. 1, 1969, pp. 228-241.
- [191] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, *Computer Experiments with Fractional Gaussian Noises. Part 2, Rescaled Ranges and Spectra*, Water Resources Research, Vol. 5, No. 1, 1969, pp. 242-259.
- [192] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, *Computer Experiments with Fractional Gaussian Noises. Part 3, Mathematical Appendix*, Water Resources Research, Vol. 5, No. 1, 1969, pp. 260-267.
- [193] Correction to [190, 191, 192], Water Resources Research, Vol. 5, No. 5, 1969, p. 1164.
- [194] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, *Some Long-Run Properties of Geophysical Records*, Water Resources Research, Vol. 5, No. 2, 1969, pp. 321-340
- [195] B. B. Mandelbrot, J. R. Wallis, *Robustness of the Rescaled Range R/S in the Measurement of Noncyclic Long Run Statistical Dependence*, Water Resources Research, Vol. 5, No. 5, 1969, pp. 967-988.
- [196] N. M. Marafih, Y.-Q. Zhang, R. L. Pickholtz, *Modeling and Queuing Analysis of Variable-Bit-Rate Coded Video Sources in ATM Networks*, Proceedings of GLOBE-COM '92, Orlando, FL, December 6-9, 1992, pp. 325-329.

- [197] N. M. Marafih, Y.-Q. Zhang, R. L. Pickholtz, *Modeling and Queueing Analysis of Variable-Bit-Rate Coded Video Sources in ATM Networks*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 4, No. 2, April 1994, pp. 121-128.
- [198] A. I. McLeod, K. W. Hippel, *Preservation of the Rescaled Adjusted Range, 1. A Reassessment of the Hurst Phenomenon*, Water Resources Research, Vol. 14, No. 3, 1978, pp. 491-508.
- [199] P. J. van der Meer, J. Biemond, R. L. Lagendijk, *Modeling and Multiplexing of VBR Video without Network Constraints*, Proceedings of the Sixth International Workshop on Packet Video, Portland, OR, September 26-27, 1994, paper D8.
- [200] B. Melamed, J. R. Hill, *A Survey of TES Modeling Applications*, SIMULATION, Vol. 64, No. 6, 1995, pp. 353-370.
- [201] B. Melamed, D. Raychaudhuri, B. Sengupta, J. Zdepski, *TES-Based Traffic Modeling For Performance Evaluation Of Integrated Networks*, Proceedings of INFOCOM '92, Florence, Italy, May 6-8 1992, pp. 75-84.
- [202] A. Merchant, P. S. Yu, *Analytic Modeling and Comparisons of Striping Strategies for Replicated Disk Arrays*, IEEE Transactions on Computers, Vol. 44, No. 3, March 1995, pp. 419-433.
- [203] G. Miller, G. Baber, M. Gilliland, *News On-Demand for Multimedia Networks*, Proceedings of ACM Multimedia '93, Anaheim, CA, August 1993, pp. 383-392.
- [204] D. Minoli, R. Keinath, *Distributed Multimedia Through Broadband Communications*, Artech House, Inc., 1994.
- [205] J.-i. Mizusawa, M. Akiyama, *Experiences and expectations of introducing PSTN new services*, Computer Networks and ISDN Systems, Vol. 25, No. 10, May 1993, pp. 1041-1053.
- [206] S. Mölle, *Kompakt und flexibel: Kaskadierbarer Chipsatz, der nach dem H.261-, JPEG- und MPEG-Standard arbeitet*, Elektronik 19, 1993, S. 102-115.
- [207] F. C. Moon, *Fractals and Chaos in Mechanical Systems*, Proceedings of the 10th US National Congress of Applied Mechanics, 1986, pp. 469-473.
- [208] H. Müller, *SCSI — schnell und intelligent*, c't, August 1987, S. 183-186.
- [209] H.-G. Musmann, O. Werner, H. Fuchs, *Kompressionsalgorithmen für interaktive Multimedia-Systeme*, it+ti, Vol. 35, No. 2, 1993, pp. 4-18.
- [210] S. W Ng, *Crosshatch Disk Array for Improved Reliability and Performance*, Computer Architecture News (Proceedings of the 21st Annual International Symposium on Computer Architecture ISCA '91), Vol. 22, No 2, April 1994, pp. 255-264.
- [211] M. Nomura, T. Fujii, N. Ohta, *Basic Characteristics of Variable Rate Video Coding in ATM Environment*, IEEE JSAC, Vol. 7, No. 5, June 1989, pp. 752-760.
- [212] I. Norros, *On the use of fractional Brownian motion in the theory of connectionless networks*, COST 242 MID-TERM Seminar, L'Aquila, 27-28 September 1994.

- [213] I. Norros, J. W. Roberts, A. Simonian, J. T. Virtamo, *The Superposition of Variable Bit Rate Sources in an ATM Multiplexer*, JSAC, Vol. 9, No. 3, pp. 378–387.
- [214] J.-P. Nussbaumer, B. V. Patel, F. Schaffa, J. P. G. Sterbenz, *Networking Requirements for Interactive Video on Demand*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13, No. 5, June 1995, pp. 779–787.
- [215] NTG-Empfehlung 0903, *Nachrichtenverkehrstheorie; Begriffe*, ntz, Band 37, Heft 7, S. 465–474 und Heft 8, S. 539–552
- [216] N. Ohta, *Packet Video: Modeling and Signal Processing*, Artech House, Inc., 1994.
- [217] A. Ortega, M. W. Garrett, M. Vetterli, *Toward Joint Optimization of VBR Video Coding and Packet Network Traffic Control*, Proceedings of the Fifth International Workshop on Packet Video, Berlin, Germany, March 1993.
- [218] B. Page, *Diskrete Simulation, Eine Einführung mit Modula-2*, Springer-Lehrbuch, Springer-Verlag, 1991.
- [219] D. Pan, *A Tutorial on MPEG/Audio Compression*, IEEE MultiMedia, Summer 1995, pp. 60–74.
- [220] P. Pancha, M. El Zarki, *Modeling Video Sources for Resource Allocation in ATM based BISDN*, Proceedings of the Third International Workshop on Packet Video, Morristown, NJ, 22–23 March 1990.
- [221] P. Pancha, M. El Zarki, *A Look at the MPEG Video Coding Standard for Variable Bit Rate Video Transmission*, Proceedings of INFOCOM '92, Florence, Italy, May 6–8, 1992, pp. 85–94.
- [222] P. Pancha, M. El Zarki, *Bandwidth Requirements of Variable Bit Rate MPEG Sources in ATM Networks*, Proceedings of INFOCOM '93, San Francisco, CA, March 30 – April 1, 1993, pp. 902–909.
- [223] P. Pancha, M. El Zarki, *Bandwidth-Allocation Schemes for Variable-Bit-Rate MPEG Sources in ATM Networks*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 3, No. 3, June 1993, pp. 190–198.
- [224] P. Pancha, M. El Zarki, *MPEG Coding For Variable Bit Rate Video Transmission*, IEEE Communications Magazine, May 1994, pp. 54–66.
- [225] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, McGraw-Hill Kogakusha LTD, 1965.
- [226] T. S. Parker, L. O. Chua, *Chaos: A Tutorial for Engineers*, Proceedings of the IEEE, Vol. 75, August 1987, pp. 982–1008.
- [227] K. Pawlikowski, *Steady-State Simulation of Queueing Processes: A Survey of Problems and Solutions*, ACM Computing Surveys, Vol. 22, No. 2, June 1990, pp. 123–170.
- [228] G. H. Petit, D. Delodder, *A Video-On-Demand Network Architecture Optimizing Bandwidth and Buffer Storage Resources*, Proceedings of ISS '95, Berlin, April 1995, Vol. 1, pp. 319–323.

- [229] K. W. Potter, *Evidence for Nonstationarity as a Physical Explanation of the Hurst Phenomenon*, Water Resources Research, Vol. 12, No. 5, 1976, pp. 1047-1052.
- [230] W. Pugh, G. Boyer, *Broadband Access: Comparing Alternatives*, IEEE Communications Magazine, August 1995, pp. 34-46.
- [231] K. E. E. Raatikainen, *Symptoms of Self-Similarity in Measured Arrival Process of Ethernet Packets to a File Server*, The twelfth Nordic teletraffic seminar (NTS 12), VTT Symposium 154 (I. Norros, J. Virtamo eds.), Espoo, Finland, August 22-24, 1995, pp. 311-324.
- [232] RACE Project R1022 Technology for ATD: TG III "Traffic Studies", *Final Traffic Models and Applications*, Deliverable 22/TG03/WG04/DS/R/124/03, 1991.
- [233] G. Ramamurthy, B. Sengupta, *Modeling And Analysis of a Variable Bit Rate Video Multiplexer*, Proceedings of INFOCOM '92, Florence, Italy, May 6-8 1992, pp. 817-827.
- [234] Y. Rasheed, A. Leon-Garcia, *Implementation Model and Performance Verification for AAL1 Carrying CBR MPEG2 Traffic*, IEEE ATM Workshop '95, Washington, DC, Oct. 29-Nov. 1, 1995, Session M4A, Submission 91.
- [235] E. P. Rathgeb, *Verkehrsflüsse in ATM-Netzen — Modellierung und Analyse von Verkehrsquellen und Quellflusskontrollverfahren*, 51. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Dissertation, IND, Universität Stuttgart, 1991.
- [236] A. L. N. Reddy, P. Banerjee, *An Evaluation of Multiple-Disk I/O Systems*, IEEE Transactions on Computers, Vol. 38, No. 12, December 1989, pp. 1680-1690.
- [237] A. L. N. Reddy, J. C. Wyllie, *I/O Issues in a Multimedia System*, IEEE Computer, Vol. 27, No. 3, March 1994, pp. 69-74.
- [238] P. J. P. O'Reilly, J. L. Hammond, Jr., *An Efficient Simulation Technique for Performance Studies of CSMA/CD Local Networks*, IEEE JSAC, Vol. 2, No. 1, January 1984, pp. 238-249.
- [239] D. Reininger, D. Raychaudhuri, B. Melamed, B. Sengupta, J. Hill, *Statistical Multiplexing of VBR MPEG Compressed Video on ATM Networks*, Proceedings of INFOCOM '93, San Francisco, CA, March 30 - April 1, 1993, pp. 919-926.
- [240] D. Reiniger, B. Melamed, D. Raychaudhuri, *Variable Bit Rate MPEG Video: Characteristics, Modeling and Multiplexing*, Proceedings of the 14th International Teletraffic Congress - ITC 14, Antibes Juan-les-Pins, Elsevier Science B.V., June 1994, pp. 295-306.
- [241] W. D. Richard, J. R. Cox, Jr., A. M. Engbreton, J. Fritts, B. L. Gottlieb, C. Horn, *Production-Quality Video Over Broadband Networks: A System Description and Two Interactive Applications*, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, Vol. 13, No. 5, June 1995, pp. 806-815.
- [242] J. W. Roberts, *Variable-Bit-Rate Traffic Control in B-ISDN*, IEEE Communications Magazine, September 1991, pp. 50-56.

- [243] J. W. Roberts, *Performance Evaluation and Design of Multiservice Networks (COST 224 final report)*, Commission of the European Communities, Brussels, 1991.
- [244] J. W. Roberts, J. Guibert, A. Simonian, *Network Performance Considerations in the Design of a VBR Codec*, Queueing, Performance and Control in ATM (ITC-13), J. W. Cohen and C. D. Pack (eds.) Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), 1991, pp. 77-82.
- [245] R. M. Rodriguez-Dagnino, R. K. Khansari, A. Leon-Garcia, *Prediction of Bit Rate Sequences of Encoded Video Signals*, JSAC, Vol. 9, No. 3, 1991, pp. 305-314.
- [246] R. Rooholamini, V. Cherkassky, *ATM-Based Multimedia Servers*, IEEE Multimedia, Spring 1995, pp. 39-52.
- [247] O. Rose, *Statistical properties of MPEG video traffic and their impact on traffic modeling in ATM systems*, Proceedings of the 20th Conference on Local Computer Networks, Minneapolis, MN, October 16-19, 1995.
- [248] K. Rothermel, I. Barth, G. Dermier, F. Sembach, T. Wahl, *Vorlesung „Verteilte Multimedia-Systeme“*, Lehrstuhl „Verteilte Systeme“, Institut für Parallele und Verteilte Höchstleistungsrechner, Universität Stuttgart, 1993.
- [249] L. A. Rowe, *Video Compression for Desktop Applications*, it+ti, Vol. 37, No. 4, 1995, pp. 7-10.
- [250] C. Ruemmler, J. Wilkes, *An Introduction to Disk Drive Modeling*, IEEE Computer, Vol. 27, No. 3, March 1994, pp. 17-28.
- [251] T. Rydén, *Parameter Estimation for Markov Modulated Poisson Processes*, Commun. Statist.—Stochastic Models, Vol. 10, No. 4, pp. 795-829.
- [252] R. Schäfer, T. Sikora, *Digital Video Coding Standards and Their Role in Video Communications*, Proceedings of the IEEE, Vol. 83, No. 6, June 1995, pp. 907-924.
- [253] F. C. Schoute, *Simple Decision Rules for Acceptance of Mixed Traffic Streams*, TELETRAFFIC SCIENCE for New Cost-Effective Systems, Networks and Services, ITC-12, M. Bonatti (Editor), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1989, pp. 771-777.
- [254] G. Schnurer, *Fire, Fibre, SSA, Die neuen seriellen Massenspeicherschnittstellen*, c't, Juni 1995, S. 126-134.
- [255] H. Schultze, *Untersuchung des Multiplexerverhaltens fraktaler Quellen*, Studienarbeit Nr. 1384, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 1995.
- [256] P. Sen, B. Maglaris, N.-E. Rikli, D. Anastassiou, *Models for Packet Switching of Variable-Bit-Rate Video Sources*, IEEE JSAC, Vol. 7, No. 5, June 1989, pp. 865-869.
- [257] J.-j. Shin, J.-k. Kim, *An Analysis of Packet Video Multiplexing by a 3-States Discrete-Time Markov Chain Model*, Proceedings of the Third International Workshop on Packet Video, Morristown, NJ, 22-23 March 1990.

- [258] N. Shroff, M. Schwartz, *Modelling VBR Video over Networks End-to-End Using Deterministic Smoothing at the Source*, International Journal of Communication Systems, Vol. 7, 1994, pp. 337-348.
- [259] F. Sijstermans, J. van der Meer, *CD-I Full-Motion Video Encoding on a Parallel Computer*, Communications of the ACM, Vol. 34, No. 4, April 1991, pp. 81-91.
- [260] R. Steinmetz, *Multimedia-Technologie: Einführung und Grundlagen*, Springer-Verlag, 1993.
- [261] R. Steinmetz, *Analyzing the Multimedia Operating System*, IEEE Multimedia, Spring 1995, pp. 68-84.
- [262] P. Skelly, S. Dixit, *A Histogram-Based Model for Video Traffic Behavior in an ATM Network Node with an Application to Congestion Control*, Proceedings of INFOCOM '92, Florence, Italy, May 6-8 1992, pp. 95-104.
- [263] P. Skelly, S. Dixit, *A Histogram-Based Model for Video Traffic Behavior in an ATM Multiplexer*, IEEE/ACM Transactions on Networking, Vol. 1, No. 4, August 1993, pp. 446-459.
- [264] K. Sriram, W. Whitt. *Characterizing Superposition Arrival Processes in Packet Multiplexers for Voice and Data*, JSAC, Vol. 4, No. 6, September 1986, pp. 833-846.
- [265] K. Stange, *Angewandte Statistik, Erster Teil: Eindimensionale Probleme*, Springer-Verlag, 1970.
- [266] D. Stodolsky, M. Holland, W. V. Courtright II, G. A. Gibson, *Parity-Logging Disk Arrays*, ACM Transactions on Computer Systems, Vol. 12, No. 3, August 1994, pp. 206-235.
- [267] G. Stoll, R. Frey, *MPEG-2 Audio: Der neue MPEG-1 kompatible Standard für die Kodierung von digitalem Surround-Sound für DAB, DBV und Computer Multimedia*, Vorträge der ITG-Fachtagung, Mannheim, 16.-18. Mai 1995, ITG-Fachbericht 133 Hörrundfunk, VDE-Verlag GmbH, S. 153-160.
- [268] H. Strass, *Small Computer System Interface 3: Standard der Zukunft*, iX, August 1995, S. 122-129.
- [269] I. Tamitani, Y. Ooi, A. Sawada, H. Takano, A. Sugiyama, T. Miyazaki, *LSIs for Audio and Video MPEG Standards*, NEC Research & Development, Vol. 35, No. 4, October 1994, pp. 355-365.
- [270] M. Tangemann, *Modellierung und Analyse von lokalen Hochgeschwindigkeitsnetzen mit zeitgesteuerten Token Passing-Medienzugriffsprotokollen*, 57. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Dissertation, IND, Universität Stuttgart, 1994.
- [271] W. Tetzlaff, R. Flynn, *Elements of Scalable Video Servers*, Digest of Papers COMP-CON '95 Technologies for the Information Superhighway, San Francisco, CA, March 5-9, 1995, pp. 239-248.
- [272] T. Theimer, *Vergleichende Untersuchungen an ATM-Koppelnetzstrukturen*, 56. Bericht über verkehrstheoretische Arbeiten, Dissertation, IND, Universität Stuttgart, 1994.

- [273] F. A. Tobagi, J. Pang, R. Baird, M. Gang, *Streaming RAID™ — A Disk Array Management System For Video Files*, ACM Multimedia '93, Anaheim, CA, August 1993, pp. 393–400.
- [274] D. Tranchier, *The Fast Reservation Protocol*, 1st IEEE Broadband ISDN Technical Workshop, Phoenix, March 1991.
- [275] R. C. F. Tucker, *Accurate Method for Analysis of a Packet-Speech Multiplexer with Limited Delay*, IEEE Transactions on Communications, Vol. 36, No. 4, April 1988, pp. 479–483.
- [276] B. Ungerer, *SCSI-Kommandos und Gerätemeldungen*, c't, November 1993, S. 293–300.
- [277] L. Vaitzblit, *A High-Resolution Videoserver for Cinema of the Future*, IEEE MultiMedia, Vol. 2, No. 3, Fall 1995, pp. 65–69.
- [278] W. Verbiest, L. Pinnoo, *A Variable Bit Rate Video Codec for Asynchronous Transfer Mode Networks*, JSAC Vol. 7, No. 5, June 1989, pp. 761–770.
- [279] W. Verbiest, L. Pinnoo, B. Voeten, *The Impact of the ATM Concept on Video Coding*, JSAC, Vol. 6, No. 9, 1988, pp. 1623–1632.
- [280] M. Villén-Altamirano, J. Villén-Altamirano, *Restart: A Method for Accelerating Rare Event Simulations*, Queueing, Performance and Control in ATM (ITC-13), J. W. Cohen and C. D. Pack (eds.), Elsevier Science Publishers B.V. (North-Holland), 1991, pp. 71–76.
- [281] H. M. Vin, P. V. Rangan, *Designing a Multiuser HDTV Storage Server*, IEEE JSAC, Vol. 11, No. 1, January 1993, pp. 153–164.
- [282] J. R. Wallis, N. C. Matalas, *Small Sample Properties of H and K — Estimators of the Hurst Coefficient h* , Water Resources Research, Vol. 6, No. 6, 1970, pp. 1583–1594.
- [283] G. Walther, *Implementierung von Generatormodellen für die IND Simulationsbibliothek*, Studienarbeit Nr. 1020, IND, Universität Stuttgart, 1990.
- [284] S. S. Wang, J. A. Silvester, *A Fast Performance Model for Real-Time Multimedia Communications*, High Speed Networks and their Performance (C-21), H.G. Perros and Y. Viniotis (Editors), Elsevier Science B. V. (North-Holland), 1994, pp. 199–216.
- [285] S. S. Wang, J. A. Silvester, *An approximate model for performance evaluation of real-time multimedia communication systems*, Performance Evaluation, Vol. 22, No. 3, 1995, pp. 239–256.
- [286] A. Wolf, J. B. Swift, H. C. Swinney, J. A. Vastano, *Determining Lyapunov Exponents from a Time Series*, Physica 16D, 1985, pp. 285–317.
- [287] T. Worster, W. Fischer, S. Davis, *Resource Allocation for Packet Data Traffic on ATM: Problems and Solutions*, ITG/GI Fachtagung Kommunikation in Verteilten Systemen, 1993, pp. 100–113.

- [288] B. L. Worthington, G. R. Ganger, Y. N. Patt, J. Wilkes, *On-Line Extraction of SCSI Disk Drive Parameters*, Proceedings Joint International Conference on Measurement & Modelling of Computer Systems (Sigmetrics '95 / Performance '95), May 15-19, Ottawa, Canada, pp. 146-156.
- [289] R. W. Wolff *Stochastic Modelling and the Theory of Queues*, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [290] G. M. Woodruff, R. Kositpaiboon, *Multimedia Traffic Management Principles for Guaranteed ATM Network Performance*, IEEE JSAC, Vol. 8, No. 3, April 1990, pp. 437-446.
- [291] D. J. Wright, M. To, *Telecommunication Applications of the 1990s and their Transport Requirements*, IEEE Network Magazine, Vol. 4, No. 2, March 1990, pp. 34-40.
- [292] Y. Yasuda, H. Yasuda, N. Ohta, F. Kishino, *Packet Video Transmission Through ATM Networks*, Proceedings of GLOBECOM '89, Dallas, TX, November 1989, pp. 876-880.
- [293] F. Yegenoglu, B. Jabbari, Y.-Q. Zhang, *Motion-Classified Autoregressive Modeling of Variable Bit Rate Video*, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, Vol. 3, No. 1, February 1993, pp. 42-53.
- [294] N. Yin, M. G. Hluchyj, *A Dynamic Rate Control Mechanism for Source Coded Traffic in a Fast Packet Network*, IEEE JSAC, Vol. 9, No. 7, 1991, pp. 1003-1012.
- [295] P. S. Yu, J. L. Wolf, H. Shachnai, *Look-Ahead Scheduling to Support Pause-Resume for Video-On-Demand Applications*, Proceedings of Multimedia Computing and Networking 1995 (SPIE Vol. 2417), San Jose, CA, February 6-8, 1995, pp. 78-89.
- [296] J.-L. C. Wu, Y.-W. Chen, K.-C. Jiang, *Two Models for Variable Bit Rate MPEG Sources*, IEICE Transactions on Communications, Vol. E78-B, No. 5, May 1995, pp. 737-745.

Anhang A

Fraktale ARIMA-Prozesse

Fraktal differenzierte ARIMA-Prozesse [117] lassen sich aus gewöhnlichen ARIMA-Prozessen [68] herleiten. Durch die Anwendung des Differenzenoperators ∇ auf einen zeitdiskreten stochastischen Prozeß $\{X_t\}$ erhält man unter Verwendung des Schiebeoperators ϕ mit

$$\nabla X_t = (1 - \phi)X_t = X_t - X_{t-1} \quad (\text{A.1})$$

eine Zeitserie $\{\nabla X_t\}$ der Differenzen des Prozesses $\{X_t\}$. Durch die mehrfache Anwendung des Differenzenoperators erhält man für $n \in \mathbb{N}$

$$\nabla^n X_t = (1 - \phi)^n X_t = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} (-\phi)^k X_t \quad \text{mit} \quad \binom{n}{k} = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \quad (\text{A.2})$$

Durch die mehrfache Anwendung des Differenzenoperators wird erreicht, daß lokale polynomiale Trends $(n - 1)$ -ter Ordnung des Prozesses $\{X_t\}$ beseitigt werden. Wird in Gleichung A.2 statt $n \in \mathbb{N}$ allgemeiner $d \in \mathbb{R}$ zugelassen, so muß der Binomische Satz durch eine unendliche binomische Reihe ersetzt werden, und man erhält als Ergebnis einen fraktal differenzierten stochastischen Prozeß $\{\nabla^d X_t\}$, für den gilt

$$\nabla^d X_t = (1 - \phi)^d X_t = \sum_{k=0}^{\infty} \binom{d}{k} (-\phi)^k X_t \quad \text{mit} \quad (\text{A.3})$$

$$\binom{d}{k} = \frac{d(d-1) \cdot \dots \cdot (d-k+1)}{k!}. \quad (\text{A.4})$$

Mit Hilfe der Polynome $\Psi(\phi)$ und $\Theta(\phi)$, definiert durch

$$\Psi(\phi) = 1 - \psi_1 \phi - \dots - \psi_p \phi^p \quad (\text{A.5})$$

$$\Theta(\phi) = 1 - \theta_1 \phi - \dots - \theta_q \phi^q \quad (\text{A.6})$$

erhält man schließlich eine sehr kompakte Darstellung für einen allgemeinen fraktal differenzierten normalverteilten ARIMA(p, d, q)-Prozeß $\{X_t\}$ mit Mittelwert μ durch

$$\Psi(\phi)\nabla^d X_t = \mu + \Theta(\phi)G_t, \quad (\text{A.7})$$

wenn $\{G_t\}$ eine Folge unabhängiger normalverteilter Zufallsvariablen mit Erwartungswert $E[G_t] = 0$ und Varianz $\text{VAR}[G_t] = \sigma^2$ ist. Der ARIMA(0,d,0)-Prozeß besitzt die Autokorrelationsfunktion

$$r_{XX}(\tau) = \frac{d(1+d) \cdot \dots \cdot (\tau-1+d)}{(1-d)(2-d) \cdot \dots \cdot (\tau-d)} \quad \text{mit} \quad \lim_{\tau \rightarrow \infty} r_{XX}(\tau) \rightarrow \frac{\Gamma(1-d)}{\Gamma(d)} \tau^{2d-1} \quad (\text{A.8})$$

und ist asymptotisch selbstähnlich mit Hurst-Parameter $H = d + 0,5$ für $d \in]0, 0,5[$ [39] (vgl. Gleichung 3.59).

Anhang B

QQ- und PP-Plots der „Krieg der Sterne“-Daten

Für die heuristische Überprüfung der Güte der Approximation der Verteilungsfunktionen der drei Bildtypen der empirischen „Krieg der Sterne“-Bildgrößen $\{x_{sw,b,i}\}$, $i \in \{1, 2, \dots, n_{sw}\}$ können PP- und QQ-Plots verwendet werden. Dazu wird zuerst die Menge der Beobachtungen der Bildgrößen $\{x_{sw,b,i}\}$ in die drei Teilmengen $\{x_{B,b,i}\}$, $\{x_{P,b,i}\}$ und $\{x_{I,b,i}\}$ mit n_B , n_P , und n_I Elementen entsprechend den drei Bildtypen aufgespalten. Unter der Annahme, daß die Beobachtungen aller Teilmengen logarithmisch normalverteilt sind, sind die transformierten Mengen $\{x_{B,s,i}\}$, $\{x_{P,s,i}\}$ und $\{x_{I,s,i}\}$ der Beobachtungen der Bildgrößen $N(0,1)$ -verteilt, wenn gilt

$$x_{k,s,i} = \frac{\ln x_{k,b,i} - \ln \hat{x}_{k,b} + \frac{1}{2} \ln \left(1 + \frac{\hat{\sigma}_{k,b}^2}{\hat{x}_{k,b}^2} \right)}{\sqrt{\ln \left(1 + \frac{\hat{\sigma}_{k,b}^2}{\hat{x}_{k,b}^2} \right)}} \quad \text{für } k \in \{I, B, P\} \text{ und } i = \{1, 2, \dots, n_k\} . \quad (\text{B.1})$$

Die Abbildungen B.1, B.3 und B.5 zeigen die PP-Plots für die drei Bildtypen. In allen drei Fällen zeigt sich eine recht gute Übereinstimmung zwischen den empirischen Verteilungsfunktionen $\hat{F}_n(x_{k,s,(i)})$, $k \in \{I, P, B\}$ mit der $N(0,1)$ -Verteilung (bei idealer Übereinstimmung wäre die Kurve deckungsgleich mit der gestrichelten Geraden).

Die Vergleiche der empirischen Quantile $x_{k,s,(i)}$, $k \in \{I, P, B\}$ und der entsprechenden q_i -Quantile q_i der Standardnormalverteilung mit $q_i = (i - 0,5)/n_k$ mit $i \in \{1, 2, \dots, n_k\}$ und $k \in \{I, P, B\}$ zeigen die Abbildungen B.2, B.4 und B.6. In allen drei Fällen verläuft die Kurve oberhalb der gestrichelten Ideallinie. Das bedeutet, daß die logarithmische Normalverteilung die Wahrscheinlichkeit für kleine Bildgrößen ($P(x_{sw,b} < x_0)$ für kleine x_0) unterschätzt und die für große Bildgrößen ($P(x_{sw,b} > x_0)$ für große x_0) überschätzt. Damit erhält man in jedem Fall eine *worst-case*-Abschätzung für die Bildgrößen. Wichtig für die Modellierung ist

Rahmen dieser Arbeit ist, daß die Verteilungen für große Bilder recht gut übereinstimmen, da die Verteilungen in diesem Bereich für die Auslastungsspitzen des untersuchten Multiplexers und damit für dessen Verluste hauptsächlich verantwortlich sind.

Ein ähnliches Verhalten, wie das für Lognormalverteilungen beschriebene, zeigen auch die PP- und QQ-Plots für den Vergleich der empirischen Verteilungen $\hat{F}_n(x_{B,b,(i)})$, $\hat{F}_n(x_{P,b,(i)})$ und $\hat{F}_n(x_{I,b,(i)})$ mit Gamma-Verteilungen, deren Mittelwerte und Varianzen den empirischen Schätzwerten entsprechen. Die direkte Verwendung von Normalverteilungen für die Bildgrößen unterschätzt jedoch die Wahrscheinlichkeiten für große Bilder bei weitem [59] und ist daher ungeeignet.

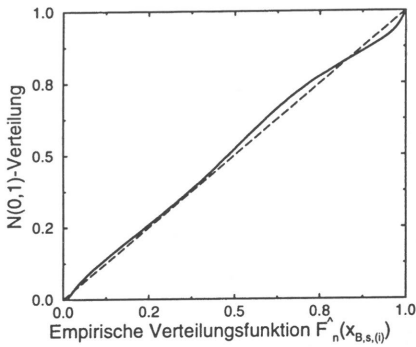


Bild B.1: PP-Plot der transformierten B-Bildgrößen $x_{B,s,(i)}$

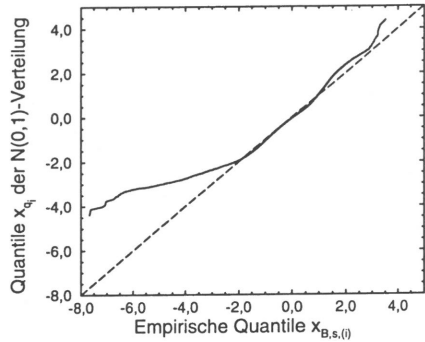


Bild B.2: QQ-Plot der transformierten B-Bildgrößen $x_{B,s,(i)}$

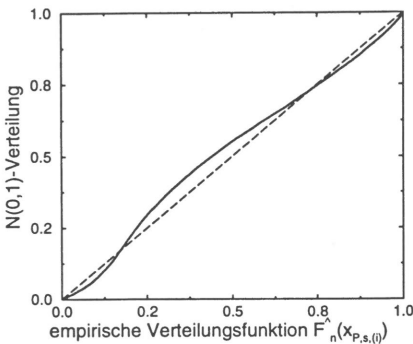


Bild B.3: PP-Plot der transformierten P-Bildgrößen $x_{P,s,(i)}$

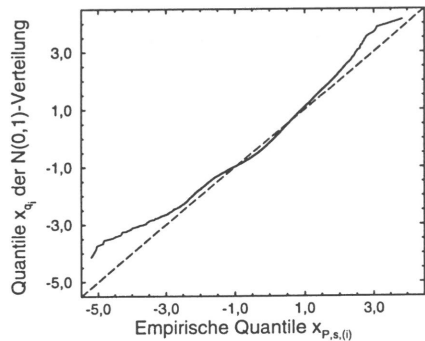


Bild B.4: QQ-Plot der transformierten P-Bildgrößen $x_{P,s,(i)}$

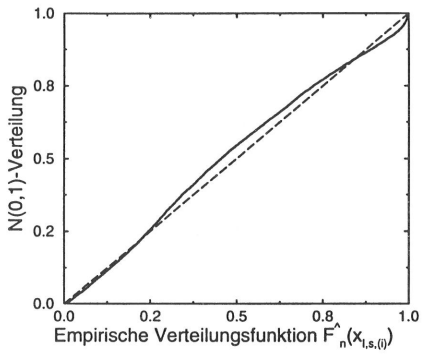


Bild B.5: PP-Plot der transformierten I-Bildgrößen $x_{I,s,(i)}$

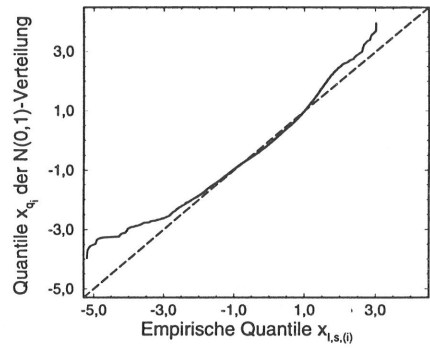


Bild B.6: QQ-Plot der transformierten I-Bildgrößen $x_{I,s,(i)}$

Anhang C

R/S -Analysen des hierarchischen Quellmodells

Der ffGn-Prozeß (fast fractional Gaussian noise) ist ein für die ereignisgesteuerte Simulation geeigneter Näherungsprozeß, der die LRD-Eigenschaft des diskreten fraktalen Rauschens, charakterisiert durch den Hurst-Parameter H , innerhalb eines bestimmten Zeitintervalls s approximiert, das von den Parametern B , Q und n_{ffGn} abhängig ist. Der ffGn-Prozeß wird in dem in Unterkapitel 4.3 vorgestellten hierarchischen VBR MPEG-Quellmodell für die Modellierung der Szenenebene eingesetzt und für die Leistungsuntersuchungen in Kapitel 5 und 6 verwendet. Die R/S -Analysen der Zufallszahlenfolgen, die für die Untersuchung des Verhaltens des statistischen Multiplexers verwendet wurden, zeigen die Abbildungen C.1 bis C.6. Es ist deutlich zu erkennen, daß der ffGn-Prozeß mit den in dieser Arbeit verwendeten

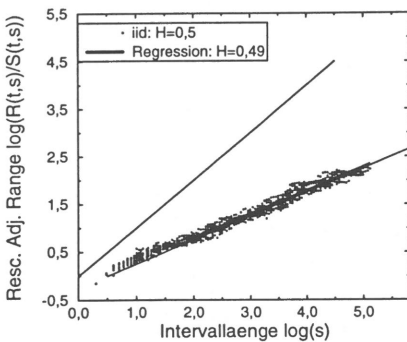


Bild C.1: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,5$

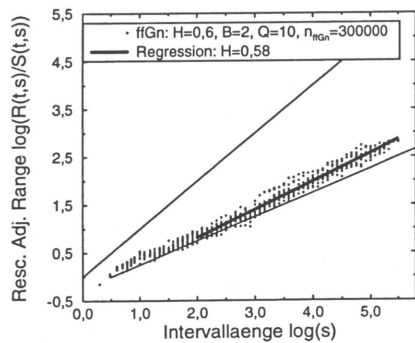


Bild C.2: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,6$

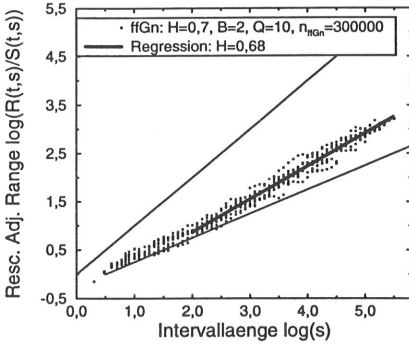


Bild C.3: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,7$

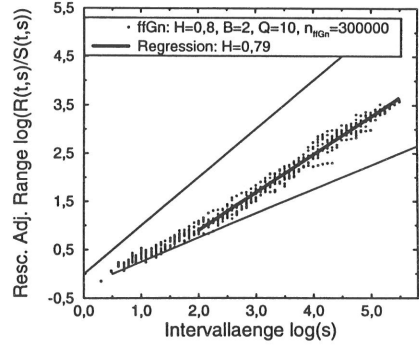


Bild C.4: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,8$

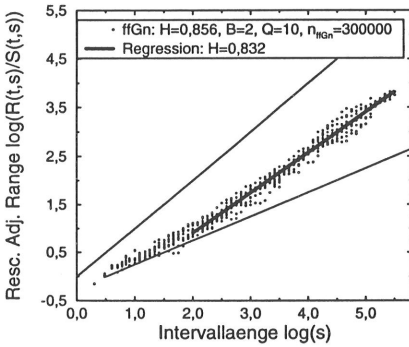


Bild C.5: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,856$

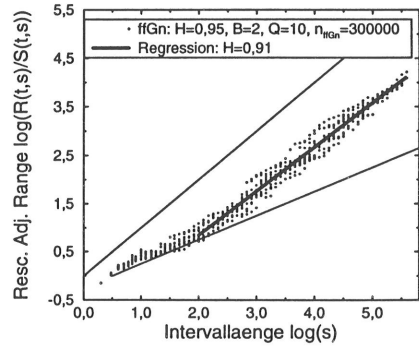


Bild C.6: R/S -Analyse einer Stichprobe des hierarchischen Quellmodells für $H = 0,95$

Parametern in der Lage ist, über mehr als $s = 300000$ Bilder (entsprechend einer Filmlänge von mehr als 3 Stunden und 20 Minuten) die Langzeitkorrelationsstruktur des diskreten fraktalen Rauschens nachzubilden. Für die Parameter der Bildebene wurden die Schätzwerte des Spielfilms „Krieg der Sterne“ aus Tabelle 4.2 verwendet. Die Regressionsgerade wurde für alle Punkte mit $\log s \geq 2$ berechnet, da für kleinere Intervalle die Bildebene die Korrelation bestimmt (vgl. Abschnitt 4.2.3). In [255] wurde eine detaillierte Untersuchung mit nur einem Bildtyp ohne Beeinflussung der Korrelation durch die Bildebene durchgeführt. Ein Vergleich der Ergebnisse zeigt für die Szenenebene sehr gute Übereinstimmung.

Anhang D

Mittlere Positionierdistanz eines Magnetplattenspeichers

Unter der mittleren Positionierdistanz $\overline{n_{FE}}$ wird die Anzahl der Zylinder eines Magnetplattenspeichers verstanden, die bei unabhängiger gleichverteilter radialer Positionswahl durch den Lese-Schreibarm übersprungen werden muß, um zur nächsten gewünschten Position zu gelangen. Der Magnetplattenspeicher habe N_{FZ} Zylinder.

Vernachlässigt man für große N_{FZ} die diskrete Natur der Zylinder und erlaubt eine beliebige Positionierung auf dem Intervall $[0, N_{FZ}]$, so läßt sich das obige Problem verallgemeinern. Betrachtet werden nun N $U(0, N_{FZ})$ -verteilte Zufallsvariable X_1 bis X_N , die das Intervall $[0, N_{FZ}]$ in $N + 1$ Intervalle aufteilen. Gesucht ist nun die Verteilung der Länge L dieser Intervalle.

Alle Intervalle besitzen dieselbe Verteilungsfunktion $F_L(l)$, auch die äußeren Intervalle. Um dies zu verstehen, ist die folgende Überlegung hilfreich (nach [72]). Das Intervall $[0, N_{FZ}]$ wird auf einen gerichteten Kreis mit Umfang N_{FZ} abgebildet. Der Umfang des Kreises werde nun durch $N + 1$ $U(0, N_{FZ})$ -verteilte Zufallsvariable in $N + 1$ Intervalle unterteilt, wobei die Zufallsvariable X_{N+1} den Anfangspunkt (und damit natürlich auch den Endpunkt) des ursprünglichen Intervalls $[0, N_{FZ}]$ markiere. Aus Symmetriegründen müssen nun alle $N + 1$ Intervalle dieselbe Verteilungsfunktion besitzen.

Für die Bestimmung der Verteilungsfunktion $F_L(l)$ der Intervalle wird das Intervall von Null bis zur Zufallsvariablen mit dem kleinsten Wert betrachtet. Die Wahrscheinlichkeit, daß dieses Intervall länger als l ist, ist gleich der Wahrscheinlichkeit, daß alle Zufallsvariablen X_1 bis X_N in das Intervall $], N_{FZ}]$ fallen. Diese Wahrscheinlichkeit ist $(1 - l/N_{FZ})^N$. Damit erhält man für die Verteilungsfunktion $F_L(l)$ und für die Verteilungsdichtefunktion $f_L(l)$ der Länge der Intervalle

$$F_L(l) = 1 - \left(1 - \frac{l}{N_{FZ}}\right)^N \quad \text{und} \quad (D.1)$$

$$f_L(l) = \frac{N}{N_{FZ}} \left(1 - \frac{l}{N_{FZ}}\right)^{N-1} \quad (\text{D.2})$$

für $l \in [0, N_{FZ}]$. Daraus erhält man für den Erwartungswert $E[L]$ der Intervalllänge

$$E[L] = \frac{N_{FZ}}{N+1}. \quad (\text{D.3})$$

Für den Spezialfall $N = 2$ entspricht die Intervalllänge L dem Positionierabstand n_{FE} bei gleichverteilter Wahl einer Start- und Zielposition. Damit erhält man die Verteilungsfunktion und die Verteilungsdichtefunktion der Positionierabstände zu

$$F_{n_{FE}}(l) = 1 - \left(1 - \frac{l}{N_{FZ}}\right)^2 \quad \text{und} \quad (\text{D.4})$$

$$f_{n_{FE}}(l) = \frac{2}{N_{FZ}} \left(1 - \frac{l}{N_{FZ}}\right) \quad (\text{D.5})$$

für $l \in [0, N_{FZ}]$ und schließlich den Erwartungswert

$$E[n_{FE}] = \frac{N_{FZ}}{3}. \quad (\text{D.6})$$