

Charakterisierung, Modellierung und Transformation von Videoverkehrslasten

als Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg
vorgelegt von

Martin Zaddach

aus Hamburg

Hamburg 2001

Genehmigt vom Fachbereich Informatik der Universität Hamburg

auf Antrag von Prof. Dr. B.E. Wolfinger, Universität Hamburg
 Prof. Dr. H. Daduna, Universität Hamburg
 Prof. Dr. U. Killat, Technische Universität Hamburg-Harburg

Hamburg, den 10. Juli 2001
(Tag der Disputation)

Prof. Dr. H.-S. Stiehl
Dekan

Berichte aus dem Forschungsschwerpunkt Telekommunikation
und Rechnernetze

Band 2

Martin Zaddach

**Charakterisierung, Modellierung und Transformation
von Videoverkehrslasten**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Zaddach, Martin:

Charakterisierung, Modellierung und Transformation
von Videoverkehrslasten / Martin Zaddach.

Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus dem Forschungsschwerpunkt Telekommunikation und
Rechnernetze ; Bd. 2)

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2001

ISBN 3-8265-9225-5

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen
oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungs-
anlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9225-5

ISSN 1439-3573

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

In innovativen Kommunikationsnetzen gewinnt die Echtzeitkommunikation zunehmend an Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist besonders Audio- und Videokommunikation relevant, zumal heutige Paketvermittlungsnetze (wie das globale Internet oder die zunehmend bedeutenden Mobilnetze) häufig noch nicht in der Lage sind, die Qualitätsanforderungen bei Übertragung von Audio-/Videodaten angemessen zu erfüllen. Daher sind zahlreiche gegenwärtige Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten bei Kommunikations- und Rechnernetzen darauf ausgerichtet, die Echtzeitfähigkeit von Netzen zu analysieren, zu prognostizieren und ggf. durch Integration zusätzlicher Funktionalität und/oder adäquate Netzdimensionierung und -konfigurierung zu gewährleisten. Da Netzverhalten - und dies in besonderem Maße bei Echtzeitkommunikation - äusserst stark geprägt ist von der auf das Netz dynamisch einwirkenden Belastung seitens der Netzbenutzer (Menschen, Anwendungsprogramme, technische Prozesse, o. ä.), so wird deutlich, dass die Charakterisierung und Modellierung der Auftragssequenzen, die an Netze übergeben werden, zur Zeit von herausragender Bedeutung und daher auch Gegenstand zahlreicher Forschungsaktivitäten ist.

Überdies ist die Charakterisierung der generierten Aufträge sowie des durch sie induzierten Verkehrs wichtig auf verschiedenen Ebenen bzw. an verschiedenen Schnittstellen innerhalb der Protokoll-/Diensthierarchie eines Kommunikations- und Rechnernetzes. Dabei sind für die Charakterisierung insbesondere die beiden folgenden Anforderungen besonders relevant: Zum einen benötigt man realitätsnahe Charakterisierungen verschiedener Aspekte der an einer Schnittstelle beobachtbaren Auftragssequenzen (Last), deren Ab-/Bearbeitung zu Verkehrsströmen im Kommunikationsnetz führt, d.h. die Last an einer Schnittstelle induziert Verkehr im Netz; die Aspekte, die zu charakterisieren sind, betreffen dabei das zeitliche Verhalten des Auftragsankunftsprozesses sowie die Attribute der einzelnen Aufträge (z.B. Längen bei zu übertragenden, komprimierten Videobildern). Zum andern ist die Gewinnung von sog. Lastmodellen unverzichtbar, die eine Abstraktion beobachteter (z.B. gemessener) Auftragssequenzen darstellen und die, für ein gegebenes Modellierungsziel (z.B. die Leistungs-/Zuverlässigkeitsanalyse eines Kommunikationsnetzes unter einer realitätsnahen Last) wichtigen, Modellierungsanforderungen zu berücksichtigen haben.

Herr Zaddach widmet sich in der vorliegenden Buchpublikation, die seine Dissertationsschrift am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg beinhaltet, beiden Zielen, d.h. sowohl einer Verkehrscharakterisierung sowie einer Lastmodellierung, wobei er sich auf das (bereits für sich genommen weite) Gebiet der Videoverkehrslasten konzentriert und dabei wesentliche, für die Praxis relevante Videokomprimierungsstandards wie MPEG-1, MPEG-2, H.261 und H.263 abdeckt. Bei seiner Verkehrscharakterisierung und -modellierung startet der Autor bei den sog. Primärlasten, d.h. bei Lasten an Schnittstellen, die noch sehr endbenutzernah sind. Durch einen neuartigen Ansatz zur analytischen Transformation von Primärlasten und die daraus resultierende Fähigkeit zur Lastprognose

gelingt es dem Autor, die durch vorgegebene Primärlasten induzierten Sekundärlasten in sehr realistischer Weise vorauszusagen und somit Lasten nicht nur an endbenutzernahen sondern auch an kommunikationsnetzinternen und übertragungsnahen Schnittstellen zu charakterisieren und modellieren.

Die Arbeit besticht dabei durch eine gelungene Symbiose aus Theorie und Praxis, da die erzielten Resultate von der mathematisch-analytischen Modellierung von Videoverkehrslasten bis hin zu der Lösung höchst praxisrelevanter Fragestellungen reicht und der Autor überdies eindrucksvoll zeigt, dass seine Ergebnisse äusserst valide sind, wie seine zahlreichen Vergleiche mit Messexperimenten für IP-basierte Netze (Internet, Intranets) beweisen.

Hamburg, im Juli 2001

Bernd E. Wolfinger

Kurzfassung

Videokonferenzen und Bildtelefonie als integraler Bestandteil multimedialer Anwendungen stellen aufgrund ihres in der Regel hohen Durchsatzbedarfs und ihrer inhärenten Echtzeitanforderungen eine beträchtliche Herausforderung an die Kommunikationstechnik bzw. an die benutzten Kommunikationsnetze dar. Die heutzutage eingesetzten blockbasierten Videokompressionsverfahren, wie MPEG-1 und -2, H.261 und H.263 weisen mit zunehmender Kompressionseffizienz starke Schwankungen in ihren Forderungen bezüglich Übertragungsressourcen an einen Transportdienst auf, abhängig von Bildstruktur und Bewegungsintensität. Mit dem Internet als Beispiel eines datagrammorientierten Paketvermittlungsnetzes steht dagegen einer Vielzahl von Benutzern ein weltumspannendes Kommunikationsnetz zur Verfügung, dessen Dienstgütecharakteristik des zentralen IP-Vermittlungsdienstes wesentlich von der Struktur des an ihn übergebenen Paketstromes beeinflusst wird.

Eine genaue Charakterisierung und Modellierung der durch Videokommunikationsanwendungen induzierten Verkehrslasten ist somit für eine Vielzahl von Anwendungsbereichen unentbehrlich. Dieses sind vor allem die Bereiche der adaptiven Last-, Ressourcen- und Zugangskontrolle für Videokommunikationsanwendungen, sowie Netzplanung und Netzmanagement. In dieser Arbeit werden die dafür notwendigen Grundlagen und Modelle präsentiert, so daß sowohl statisch der Ressourcenbedarf geschätzt werden kann, als auch valide Modelle für die Beurteilung der augenblicklichen Situation und der zukünftigen Entwicklung zur Verfügung stehen.

Darauf aufbauend widmet sich diese Arbeit zwei wesentlichen Zielen, zum einen der Erstellung allgemeingültiger Modelle der durch Videokommunikationsanwendungen induzierten Auftragsströme (Primärlasten), zum anderen der Entwicklung von analytischen Transformationskonzepten und -ansätzen zur Überführung solcher Primärlasten in netznaher Lasten (Sekundärlasten). Diese Transformationen sind notwendig, da nicht die Struktur der Primärlasten, sondern stets die der Sekundärlasten den Ressourcenbedarf und damit die Verzögerungs- und Verlusteigenschaften auf Vermittlungsebene eines Kommunikationsnetzes bestimmt.

Es wird im Rahmen dieser Arbeit eine vereinigende Sichtweise auf die im Echtzeitkontext gängigen Videokompressionsstandards geliefert. Aufbauend auf dieser Sichtweise werden Modelle entwickelt, welche es mit hoher Präzision gestatten, die durch Videocodierer erzeugten Lasten nachzubilden und deren Entwicklung in die Zukunft zu extrapolieren. Bei dieser Modellierung wird ein besonderes Gewicht auf die Eingriffsmöglichkeiten zur statischen und dynamischen Steuerung gelegt, und ein neuer Ansatz zur besseren Skalierbarkeit der Last präsentiert. Um im Kontext paketvermittelnder Netze Allgemeingültigkeit der Aussagen hinsichtlich der erzeugten Paketströme zu gewährleisten, werden Segmentierungsstrategien auf allgemeinem Niveau diskutiert und für die Praxis relevante Strategien hergeleitet.

Es werden erstmalig Transformationsansätze für Modelle geliefert, welche es gestatten, die Primärlastmodelle direkt in Sekundärlastmodelle zu überführen, ohne eine Neuparameterisierung der Modelle zu erfordern. Dieser zunächst auf allgemeinem Niveau vorgestellte analytische Transformationsansatz wird anhand praxisrelevanter Studien sehr erfolgreich

validiert.

Unter Kenntnisnahme eingesetzter Maßnahmen zur Kontrolle der Fehlertoleranz auf Ebene der Videoapplikation, sowie der durch die Videoapplikation induzierten Sekundärlast, lassen sich nun effiziente Strategien zum Last- und Fehlermanagement herleiten. Exemplarisch werden zum Abschluß dieser Arbeit zwei komplexe und für den praktischen Einsatz besonders relevante Anwendungsstudien präsentiert, welche die Bedeutung der Lastmodellierung und Lasttransformation auch im praktischen Einsatz untermauern.

Abstract

Video conferences and picture telephony as an integral part of multimedia applications normally represent a considerable challenge for the communication technology resp. the communication networks used. This is primarily due to their typically high demand for transmission capacity and their inherent real-time requirements. Block-based algorithms for video compression, such as MPEG-1 and -2, H.261 and H.263, as they are currently used, show strong fluctuations in their requirements of transmission resources, e.g., dependent on picture structure and motion intensity. With the Internet as an example of a packet switching data network a world wide network infrastructure is available. However, the quality-of-service characteristics of the central IP network service is influenced essentially by the structure of the packet stream induced by the IP service.

So, a precise characterization and modeling of the traffic loads induced by applications for video communication is essential for a wide range of application domains. These domains comprise, e.g., the adaptive management of load, resources and admission control of video applications, as well as network design and management. Therefore, in this thesis we will present the basic foundations to calculate the static requirements of resources and we will also introduce a set of highly valid models for judging the current situation as well as prognosticating the future development of load characteristics.

The thesis is focused on two major goals. The first goal is to build a general purpose model for the streams of requests (primary load) as induced by video applications. The second goal is the development of analytical transformation concepts and approaches to transfer a primary load model into a secondary load model characterizing the load just below the network layer. Such kind of transformations are necessary because it is always the secondary load which is responsible for requirements of resources and, as direct consequence, also for the delay and loss properties in the corresponding best-effort network used.

As part of this thesis a unifying point of view on the wide spread standards for video compression will be given. Based on this view models are elaborated which are adequate, both, for characterizing the load produced by video codecs in a highly realistic way, as well as for predicting the future behaviour of the load. A special focus is placed on the coding options for static and dynamic control, and a new approach is presented for a more graceful scalability of the produced load. To ensure the general applicability of these results referring to the induced packet streams in the context of packet switching networks, segmentation strategies will be discussed on a very general level. Strategies of high practical relevance will be developed.

Taking into account the load influenced by coding options for providing fault tolerance on application level it is now possible to design efficient strategies for (combined) load and fault management. This thesis concludes with the presentation of two application studies of high practical relevance which demonstrate the importance of load modeling and transformation by way of example.

Mein Dank gilt...

...in besonderem Maße Herrn Prof. Dr. B. E. Wolfinger, der mit seinem Engagement und seinen vielen Anregungen und Ratschlägen wesentlich zu dem Gelingen dieser Dissertation beigetragen hat.

Ganz herzlich möchte ich auch Herrn Prof. Dr. U. Killat sowie Herrn Prof. Dr. H. Daduna für die Übernahme des Zweit- und Drittgutachtens danken.

Danken möchte ich auch Herrn Priv. Doz. Dr. K.-D. Heidtmann für die ungezählten Diskussionen in angrenzenden Forschungsgebieten, insbesondere der fehlertoleranten Videokommunikation. Diese Diskussionen haben die in dieser Arbeit betrachteten Anwendungsstudien wesentlich geprägt.

Schließlich möchte ich allen KollegInnen und Studenten, besonders Herrn Dr. G. Bai, Herrn Dipl. Inf. C. Benecke, Frau I. Hänig, Herrn cand. Inf. J. Kerse, Herrn Dipl. Inf. C. Kohlhaas, Herrn Doz. Dr. M. Lehmann, Herrn Dr. J.-P. Richter, Herrn Dipl. Inf. T. Suchanek und Herrn Dipl. Inf. B. Traoré für die vielen Anregungen und Ideen und nicht zuletzt für das angenehme Arbeitsklima in der Arbeitsgruppe Telekommunikation und Rechnernetze meinen Dank aussprechen.

Inhalt

I	Einführung und Grundlagen	1
1	Einleitung und Motivation	3
1.1	Zur Situation multimedialer Anwendungen	3
1.2	Lastadaptivität auf Basis von Lastmodellen	5
1.3	Zielsetzung und Abgrenzung	8
1.4	Aufbau dieser Arbeit	11
2	Mechanismen blockbasierter Videokompressionsverfahren	15
2.1	Farbraum und Bildrepräsentation	15
2.2	Verlustbehaftete Bildkompression	17
2.2.1	Prädiktive Codierung und Bewegungsausgleich	18
2.2.2	Diskrete Cosinustransformation	19
2.2.3	Quantisierung	20
2.2.4	Laufängen- und Entropiecodierung	20
2.3	Videocodierungsstandards für Videokonferenzsysteme	22
2.3.1	Anforderungen an Videokommunikationssysteme	23
2.3.2	Bildstrukturierung durch Rahmengenerierung	24
2.3.3	H.261 - Aufbau und Syntax	26
2.3.4	H.263: Weiterentwicklung des H.261-Standards	28
2.3.5	Anmerkungen zu MPEG-1 und MPEG-2	29
2.4	Externe Eingriffsmöglichkeiten auf Ebene der Anwendung	29
2.4.1	Gebrochen-rationale Quantisierung: ein neuer Ansatz zur sanften Kontrolle	31
2.4.2	Wahl von Referenzbildern: Auslassen, Interpolation und <i>B-Framing</i>	32
3	Echtzeitkommunikation in paketvermittelnden Rechnernetzen	35
3.1	Schichtenarchitektur paketvermittelnder Netze	35
3.2	Die IP-Protokollhierarchie als Beispielarchitektur paketvermittelnder Netze	37
3.3	Bewertung von Kommunikationsbeziehungen in paketvermittelnden Netzen	40
3.3.1	Verlustsemantik bezüglich eines strikten Echtzeitkontextes	41
3.3.2	Transientes Netzverhalten: Schwankendes Verzögerungs- und Verlustverhalten	43
3.3.3	Einflüsse der Charakteristik des Paketstromes auf das Netzverhalten	45

3.4	Dienstgüteunterstützung in paketvermittelnden Netzen	46
3.4.1	Der Ansatz der Dienstintegration	46
3.4.2	Der Ansatz der Dienstdifferenzierung	47
3.4.3	Spezifikation der Datenrate zur Dienstgüterebereitstellung in <i>IntServ</i> und <i>DiffServ</i>	49
3.5	Zusammenfassung des Teil I	51
 II Lastmodellierung und dynamische Modellparametrisierung		53
4	Formale Grundlagen der Primärlastmodellierung	55
4.1	Zur Definition von Lasten in paketvermittelnden Netzen	56
4.2	Definition anwendungsnaher isochroner Primärlasten	58
4.3	Identifikation von Substrukturen	61
4.3.1	Motivation: Implizites versus explizites ALF	61
4.3.2	Das Timing bei explizitem <i>Application Level Framing</i>	63
4.3.3	Prozesse auf Ebene der Bildscheiben	64
4.4	Modellierung digitaler, komprimierter Videosequenzen auf Primärlastebene	66
4.4.1	Messungen als Basis für eine realitätsnahe Lastmodellierung	66
4.4.2	Partitionierung in Teilsequenzen	67
4.4.3	Wahl des Codierungsmusters	70
4.5	Prozesse zur Modellierung autokorrelierter Teilsequenzen	71
4.5.1	Autoregressive Verkehrsmodelle	71
4.5.2	Modellierung der Teilsequenzen mit TES-Prozessen	72
5	Lastmessungen und ihre Nutzung zur Modellierung von Primärlasten	79
5.1	Messungen der Primärlasten auf Ebene der Bildrahmen	79
5.1.1	Anwendung 1: Videokonferenz	82
5.1.2	Anwendung 2: Videokonferenz mit starker Bewegung	84
5.1.3	Anwendung 3: Filmsequenzen starker Bewegung	85
5.2	Anpassung an Verteilungsfunktionen	88
5.2.1	Modellierung durch Normalverteilung	88
5.2.2	Validation der Verteilungsapproximationen	90
5.2.3	Parametrisierung der TES-Modelle	94
5.3	Einfluß von Codierentscheidungen auf die erzeugte Last	96
5.3.1	Generierung von I-Bildrahmen	96
5.3.2	Reduzierung der Datenrate mittels bidirektionaler Interpolation	99
5.3.3	Anpassung der Quantisierung zur Kontrolle der Primärlast	101
5.4	Lastmessung auf Ebene der Bildscheiben	103

6	Dynamische Modellparametrisierung	111
6.1	Vorüberlegungen	111
6.2	Messungen der Korrelationsstrukturen	112
6.3	Verlust der Korrelationsstruktur der TES-Prozesse	115
6.4	Kurzzeitige Messungen und dynamische Parametrisierung	117
6.5	Prognosefähigkeit durch Extrapolation	118
6.6	Validation der Prognosefähigkeit	119
6.7	Zusammenfassung der Ergebnisse des Teil II	121
III	Transformationen der Last und ihre Modellierung	123
7	Analytische Lasttransformationen	125
7.1	Lasttransformationen und ihre Modellierung	125
7.1.1	Reale Lasttransformationen und Lasttransformationen im Modellbereich	126
7.1.2	Ein analytischer Transformationsansatz zur Modellierung von Sekundärlasten	127
7.1.3	Beispiele für Transformationsprozesse in geschichteten Protokollarchitekturen	128
7.2	Transformationen: Ankunftsprozeß und Attributmengen	130
7.2.1	Veränderung des Ankunftsprozesses	131
7.2.2	Transformation der Randverteilung von Attributen	131
7.2.3	Wichtige Transformationen in Protokollhierarchien paketvermittelnder Netze	132
7.2.4	Überlagerungen: Komplexe Lasten und Multiplexen	138
7.3	Anmerkung zu den Transformationen	139
8	Lasttransformationen am Beispiel von IP-Protokollhierarchien	141
8.1	Lasttransformationen zur Modellierung komplexen Verhaltens	141
8.2	Lasttransformationen innerhalb der IP-Protokollhierarchie	142
8.3	Analytische Behandlung der Lasttransformationen	144
8.3.1	Lasttransformationen einer singulären (Video-)Primärlastquelle	145
8.3.2	Lasttransformationen überlagerter Primärlasten	146
8.3.3	Sekundärlastcharakterisierung der von Videocodierern erzeugten Primärlasten	148
8.4	Validation der Transformationsmodelle	150
8.4.1	Validation der durch eine Einzelquelle induzierten Sekundärlasten	151
8.4.2	Validation im Falle der Überlagerung mehrerer Einzelquellen	156
8.5	Zusammenfassung der Ergebnisse des Teil III	157

IV	Anwendungsstudien & Ausblick	159
9	Anwendungsstudien: Lastadaptive fehlertolerante Videoapplikationen	161
9.1	Entwurf fehlertoleranter Videoapplikationen	162
9.1.1	Modellgestützte Kontrolle in der Managementdomäne	162
9.1.2	Integration und Interaktion von Fehlertoleranz- und Lastmanagement	163
9.1.3	Technischer Aufbau und Randbedingungen	164
9.2	Studie I: Vorwärtsfehlerkorrektur	168
9.2.1	Exkurs: Funktionsweise von Vorwärtsfehlerkontrolle in paketvermit- telnden Netzen	169
9.2.2	Das Szenario	172
9.2.3	Das Management	174
9.2.4	Experimentserien, Meßergebnisse und deren Analyse	177
9.3	Studie II: IntServ/DiffServ	183
9.3.1	Das Szenario	183
9.3.2	Anpassung der Datenrate an eine TB-Spezifikation	186
9.3.3	Experimentserien, Meßergebnisse und deren Analyse	188
9.4	Resümee	193
10	Zusammenfassung und Ausblick	195
10.1	Zusammenfassung der Ergebnisse	195
10.2	Ausblick: Entwicklungsmöglichkeiten	197
	Literatur	201
A	Entwicklung anwendungsnaher <i>Application Level Framing</i>-Strategien	221
A.1	Klassifikation der Fehler	222
A.1.1	Randbedingungen	222
A.1.2	Fehlertypen in Einzelbildern	226
A.2	Fehlerrobuste <i>Application Level Framing</i> -Strategien	230
B	Verluste prädiktiv codierter Videoströme	233
B.1	Protokollarchitektur und Managementdomäne	233
B.2	Transiente Beurteilung der Kommunikationsbeziehung auf Transportebene	236
B.3	Ein Modell zur Beschreibung von Akkumulation und Persistenz von Bild- fehlern	237

Abbildungen

1.1	Ebenen der Protokollarchitektur in paketvermittelnden Netzen mit Einfluß auf die von Videocodierern erzeugten Verkehrslasten	9
2.1	Luminanz- und Chrominanzpositionen	17
2.2	Linearisierungsverfahren der Matrixkoeffizienten gemäß ihrer Frequenzen	21
2.3	Vereinfachte Darstellung H.261-codierter Datenströme	24
2.4	Struktureller Aufbau eines Encoders am Beispiel des H.261-Standards	27
2.5	Senderseitige Strukturierung einer Videoapplikation	30
3.1	Geschichtete Protokollstrukturen in paketvermittelnden Netzen	36
3.2	Protokollstruktur der Internetarchitektur	38
3.3	<i>Token-Bucket</i> -Filter	50
4.1	<i>Burst</i> -verhalten der Scheiben eines Bildrahmens	64
4.2	Ereignisspur der Bildrahmenlängen der Videosequenz <i>Cut</i>	68
4.3	Autokorrelationsfunktion $\hat{\rho}(\tau)$ der Sequenz <i>Cut</i>	68
4.4	Markovmodell der Szenenklassen	69
4.5	Steuerung von Codiermustern	70
4.6	Vorder- und Hintergrundsequenzen eines TES-Prozesses	75
4.7	Die geometrische Interpretation der Innovationsdichte $f_\nu(x)$	76
4.8	Die <i>Stitching</i> -Transformationen $S_\xi(y)$	76
5.1	Vergleich der Ereignisspuren bei H.261- und H.263-Codierung	80
5.2	Ereignisspur der Differenzlängen $\{\eta x_{1,i} - x_{2,i}\}_{i=1}^{491}$	80
5.3	Bildrahmenlängen und -verteilung, sowie Autokorrelationsfunktion der Sequenz <i>Claire</i> , Quantisierungsniveau 4	83
5.4	Bildrahmenlängen und -verteilung, sowie Autokorrelationsfunktion der Sequenz <i>Carphone</i> , Quantisierungsniveau 4	84
5.5	Bildrahmenlängen und -verteilung, sowie Autokorrelationsfunktion der Sequenz <i>Foreman</i> , Quantisierungsniveau 4	86
5.6	$\varphi(x)$, Dichte der $\mathcal{N}(0, 1)$ -Normalverteilung	89
5.7	$\Phi(x)$, $\mathcal{N}(0, 1)$ -Normalverteilung	89
5.8	Bildrahmenlängenverteilungen von <i>Claire</i> , <i>Carphone</i> und <i>Foreman</i>	90
5.9	Verzerrungsfunktion $\hat{\sigma} \Phi^{-1}(x) + \hat{a}$	95

5.10	Verzerrungsfunktion $\hat{\sigma} \Phi^{-1}(S_{0,5}(x)) + \hat{a}$	95
5.11	Längenverteilungen, ausschließliche Intracodierung, Quant. 4	97
5.12	Autokorrelationskoeffizienten, ausschließliche Intracodierung, Quant. 4	98
5.13	Durchschnittliche Bildrahmenlänge bei Auslassen (Claire)	99
5.14	Auswirkungen des Auslassens jedes zweiten Bildes, Sequenzen Claire, Carphone und Foreman, H.261-Codierung	100
5.15	Durchschnittliche Bildrahmenlängen von Claire, Carphone und Foreman	102
5.16	TES-Prozesse zur Modellierung der Last auf Ebene der Bildscheiben	105
5.17	Empirische und modellierte Verteilung der Bildscheibenlängen	108
6.1	Korrelationskoeffizienten in Abhängigkeit des Stichprobenumfangs	114
7.1	Beziehungen der Lasttransformation in einem realen System und im Modellbereich	127
7.2	Abstraktionsebenen der Lastbeschreibung	127
7.3	Analytische Modellierung von Lasttransformationen	128
8.1	Sekundärlastmodellierung unter Verwendung von Lasttransformatoren	143
8.2	2-stufiges <i>Packet-Train</i> -Modell	150
8.3	Sekundärlast (Carphone, H.261, Quantisierungsniveau 4)	152
8.4	Sekundärlast (Foreman, H.261, Quantisierungsniveau 4)	153
8.5	Sekundärlast (Claire, H.261, Quantisierungsniveau 4)	154
8.6	Sekundärlast (Überlagerung von 30 Einzelvideoquellen)	157
9.1	Konzept eines vorwärtsfehlerkorrigierenden Verfahrens	170
9.2	Verschränkte I-Bildauffrischung gemäß eines <i>Zig-Zag</i> -Musters	173
9.3	Die Ereignisspur der Bildrahmenlängen in Abhängigkeit des genutzten Zeitfensters c	178
9.4	Relative Verletzungen des Ratenintervalls in Abhängigkeit der Ratenspezifikation c	179
9.5	Ereignisspur des Gesamtdatenvolumens auf IP-Ebene bei dynamischer Anwendung von Redundanz	182
9.6	Konzeptueller Aufbau des Managements bei Nutzung priorisierter Kanäle (Studie II)	185
9.7	Numerisch berechnete Verteilungsfunktionen \mathcal{B} der stationären Füllungsprozesse unendlicher TBs	190
9.8	Adaptiv eingestellter I-Bildrahmenabstand (oben) und angepasste Bildrahmenlängen (unten)	193
A.1	Paketverlustsituationen	224
A.2	Einfrieren und Resynchronisieren bei Paketverlust	225
A.3	Verlust von Datenpaketen (512 Byte Länge)	226
A.4	Verlust von drei Datensegmenten zwischen den Bildern 73 und 80	228
A.5	Verluste eines Bildrahmens (links) und 8 konsekutiver Bildrahmen (rechts)	228

A.6	Differenzencodierung der Makroblockadressen bei H.261 und H.263/MPEG	229
A.7	Auswirkungen von Verlust bei differenzencodierten Makroblockadressen . .	230
B.1	Wesentliche Komponenten eines verteilten Videokommunikationssystems .	234
B.2	Erwartete akkumulierte Störeinflüsse innerhalb einer Bildgruppe der Länge n	239

Tabellen

5.1	Mittelwerte und Standardabweichungen	87
5.2	χ^2 -Anpassungstest am Beispiel Claire, Quantisierungsniveau 4	93
5.3	Ergebnisse des χ^2 -Anpassungstests	93
5.4	Maximale Abweichungen $\sqrt{n}D_n$ als Referenzwerte für den KOLMOGOROW-SMIRNOW-Test	94
5.5	Intervallspezifikation γ in Abhängigkeit von der Anzahl der Makroblockmengen	103
5.6	Messungen der skalaren Aufteilungen der Bildrahmen in Bildscheiben	104
5.7	Die Parameter der Normalverteilungsmodelle der Bildscheiben von Carphone ($Q : 4, H.261$) in Byte	107
5.8	Validation der skalaren Aufteilung mittels χ^2 -Anpassungstest	109
5.9	Validation der skalaren Aufteilung mittels KOLMOGOROW-SMIRNOW-Test	109
6.1	Messungen der Kreissegmente α der Innovationsdichten in Abhängigkeiten des Stichprobenumfangs	115
6.2	χ^2 in Abhängigkeiten des Stichprobenumfangs	116
6.3	Ergebnisse des χ^2 -Anpassungstests bei fließender Berechnung der Parameter und Schätzung der augenblicklichen Lastsituation	120
6.4	Güte der Extrapolation in die Zukunft, H.261-Codierung	121
8.1	Empfohlene <i>Maximum Transmission Unit</i> (MTU)-Längen	145
8.2	Ergebnisse des χ^2 -Anpassungstests bei Einteilung in 13 Partitionen	153
8.3	Maximale Abweichungen $\sqrt{n}D_n$ als Vergleichswert für den KOLMOGOROW-SMIRNOW-Anpassungstest bezüglich der Sekundärlast	155
9.1	Relative Anzahl der Intervallverletzungen in Abhängigkeit von $(c, \Delta t)$	180
9.2	Tatsächlich benötigte Intervallgröße Γ	180
9.3	Anzahl der Intervallverletzungen bei FEC_Exp_3	182
9.4	Quantile in Abhängigkeit der Generatortrate r des TB	191
9.5	Relative Spezifikationsverletzungen des TB (empirisch) in Abhängigkeit der geforderten Sicherheit	191
9.6	Relative Spezifikationsverletzungen des TB (empirisch) bei variablem I-Bildabstand	192

A.1 Messungen der (Bit-)Fehler auf verschiedenen Ebenen im Internet	223
---	-----