

# **Lastadaptive Betriebsmittelverwaltung und Dienstgütemanagement für verteilte Echtzeitanwendungen in lokalen und drahtlosen Netzen**

ALLGEMEINE KONZEPTE, THEORETISCHE ANALYSE, SIMULATION  
UND PROTOTYPISCHE AUSWERTUNG VON FALLSTUDIEN

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades an der

MIN-Fakultät Department Informatik  
der Universität Hamburg

vorgelegt von

**Jürgen Wolf**

aus Freiburg im Breisgau

Hamburg 2007

Genehmigt von der MIN-Fakultät Department Informatik der Universität Hamburg

auf Antrag von Prof. Dr. Bernd E. Wolfinger, Universität Hamburg  
Prof. Dr.-Ing. habil. Djamshid Tavangarian, Universität Rostock  
Prof. Dr. Eike Jessen, Technische Universität München

Hamburg, den 18.07.2007 (Tag der Disputation)

Prof. Dr. Arno Frühwald (Dekan)

Berichte aus dem Forschungsschwerpunkt  
Telekommunikation und Rechnernetze

Band 6

**Jürgen Wolf**

**Lastadaptive Betriebsmittelverwaltung und  
Dienstgütemanagement für verteilte Echtzeit-  
anwendungen in lokalen und drahtlosen Netzen**

ALLGEMEINE KONZEPTE, THEORETISCHE ANALYSE, SIMULATION  
UND PROTOTYPISCHE AUSWERTUNG VON FALLSTUDIEN

Shaker Verlag  
Aachen 2007

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Hamburg, Univ., Diss., 2007

Copyright Shaker Verlag 2007

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8322-6477-2

ISSN 1439-3573

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

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

Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Vorwort des Herausgebers

Echtzeitkommunikation in heutigen Rechnernetzen – wie z.B. im Internet, in Ethernet-basierenden lokalen Netzen und in lokalen bzw. öffentlichen Mobilnetzen – nimmt beträchtlich zu. Gründe dafür sind, dass zum einen die verfügbaren Netzinfrastrukturen inzwischen eine entsprechende Leistungsfähigkeit erreicht haben und zum anderen, neben der bereits traditionell wichtigen digitalen Sprachkommunikation, inzwischen weitere Audio-/Videokommunikationsbedarfe (mit Dienstgüte- und Echtzeitanforderungen) sich aus den verstärkt aufkommenden multimedialen Anwendungen entwickeln. Dieser Trend zeigt sich u.a. an Internetdiensten wie VoIP (*Voice-over-IP*) und IPTV, die sich weltweit durchzusetzen beginnen, oder den sog. *Triple-Play-Diensten* (als Überlagerung von Telefonie-, Internetzugangs- und TV-Diensten), die in jüngerer Vergangenheit von den meisten Internet Service Providern realisiert und preisgünstig angeboten werden.

Leider sind sowohl das Internet (als wichtigste Klasse von Weitverkehrsnetzen) und das Ethernet (als wichtigste Klasse von lokalen Rechnernetzen), in Anbetracht ihres „Best effort“-Charakters der Dienstleistung nur bedingt in der Lage, beispielsweise Sprach- und/oder Videoübertragung in Echtzeit in sehr guter Qualität auch im Hochlastbereich des Netzes dauerhaft bereitzustellen. Dies gilt im übrigen auch für WLAN-basierte Netze, die – selbst unter Berücksichtigung neuerer Standardversionen wie IEEE 802.11e – nur in begrenztem Umfang Dienstgütegarantien geben können (z.B. bei Qualitätsschwankungen des benutzten Funkkanals).

Die Bereitstellung von Dienstgüte (*Quality-of-Service*, QoS)-Garantien in Rechnernetzen wird im allgemeinen als eine Managementaufgabe in Netzen gesehen und zwar bezieht sich das Dienstgütemanagement insbesondere auf die Umsetzung von (end-)benutzer- bzw. anwendungsspezifischen Dienstgüteanforderungen auf eine entsprechende Qualität der netzseitig erbrachten Dienste. Da indes die Qualität der Dienstleistung sehr stark von der Verfügbarkeit einer entsprechenden Menge von Betriebsmitteln (z.B. erreicht mittels Ressourcenreservierung) abhängig ist, so ist Dienstgütemanagement auch häufig verbunden mit der Notwendigkeit eines angemessenen Betriebsmittelmanagements. Hieraus bezog das Dissertationsprojekt des Herrn Jürgen Wolf seine Motivation, in welchem er einen lastadaptiven Ressourcenmanagementalgorithmus konzipierte, der genutzt werden kann, um einerseits Dienstgüteanforderungen zu erfüllen und andererseits eine möglichst hohe Ressourcenauslastung zu erzielen. Der Algorithmus sollte dabei insbesondere auf der Idee basieren, dass zwar verbindungsbezogene Betriebsmittelreservierungen im Netz vorgenommen werden, jedoch anhand dynamischer Lastmessungen periodisch die vorliegende Momentanbelastung abgeschätzt wird und, im Falle eines erkannten temporär reduzierten oder sich wieder erhöhenden Belastungsniveaus, Betriebsmittel dann dynamisch umverteilt werden. Der Algorithmus sollte in seinem Leistungsverhalten sowohl bereits auf

Entwurfsebene als auch nach konkreten Umsetzungen in Implementierungen (z.B. als Realisierung in WLAN-Netzen vom Typ 802.11e) detailliert bewertet werden. Für die Bewertung sollten – im Hinblick auf eine möglichst große Realitätsnähe der Leistungsprognosen – sowohl Modelle als auch Messungen in Realsystemen unter Reallasten eingesetzt werden.

Im Rahmen seiner hier vorliegenden Dissertationsschrift hat Herr Wolf wertvolle Beiträge in sehr unterschiedlichen Bereichen erzielt, u.a. durch

- Entwicklung eines allgemein einsetzbaren Algorithmus zur flexibel parametrisierbaren Schätzung von Momentanlasten (im Sinne von Sekundärlasten) in Rechnernetzen unter Nutzung periodischer Lastmessungen (z.B. durch Audio-/Videoverkehr induzierte Lasten an Transportdienst- oder Netzschnittstellen);
- Entwicklung von, wiederum allgemein einsetzbaren, Schwellwertsystemen zur Vermeidung von Oszillationen bei dynamischer Betriebsmittelumverteilung (Freigabe und Rückforderung);
- Vorschläge zur Kombination von Lastschätzalgorithmen und Schwellwertsystemen zur Gewinnung effizienter Gesamtsysteme für ein lastadaptives Betriebsmittelmanagement;
- Exemplarische Integration der vorgeschlagenen Algorithmen in drahtlose Netze (WLANs) nach IEEE 802.11 sowohl unter Nutzung realitätsnaher Simulationsmodelle als auch in Form konkreter Implementierungsempfehlungen für existierende WLAN-Konfigurationen;
- Vorschläge zur Parameterwahl für die Nutzung des Gesamtsystems für ein lastadaptives Betriebsmittelmanagement in konkreten Einsatzszenarien;
- Fallstudie eines Multimedia-Dokumentenservers, die die Praxisrelevanz des vorgeschlagenen Konzeptes zum lastadaptiven Betriebsmittelmanagement erfolgreich nachweist und überdies die Auswirkung seiner Nutzung auch aus Endbenutzersicht beurteilt; und schließlich
- eine Vielzahl von Leistungsprognosen für die vorgeschlagenen Algorithmen sowohl auf einer relativ allgemeinen konzeptionellen Entwurfs- als auch auf einer konkreten Implementierungsebene anhand von Modellen und Messungen zum einen für „Worst case“, „Best case“, „Average case“-Lastszenarien sowie für eine große Menge von Reallast-„Traces“.

Ein besonderes Merkmal der vorliegenden Arbeit liegt in ihrer gelungenen Mischung aus einer Konzeptionierung neuer Algorithmen (unter bewusst sehr allgemein gehaltenen Randbedingungen), deren umfassender Bewertung (sowohl bereits

auf Entwurfsebene als auch nach Umsetzung der Algorithmen in Realsystemen) sowie der Durchführung einer sehr aussagekräftigen Fallstudie. Dass Herr Wolf bei seinen Leistungsbewertungen das gesamte Spektrum von Bewertungsmöglichkeiten – von mathematisch-analytischen Modellen über Simulationsmodelle bis hin zu Messungen in Realsystemen höchst gewinnbringend einsetzt, ist ein weiteres hervorstechendes Merkmal der vorliegenden Publikation. Die Arbeit dürfte daher insbesondere für Personen relevant sein, die mit einem effizienten Dienstgüte- und Ressourcenmanagement von Rechnernetzen mit Echtzeitkommunikationsanforderungen unter Einsatz innovativer Algorithmen befasst sind und/oder die sich für eine praxisorientierte Nutzung von messungs- oder modellbasierten Leistungsbewertungsmethoden interessieren.

*Hamburg, im Juli 2007*

*Bernd E. Wolfinger*



## Kurzfassung

Eine zentrale Aufgabe für Übertragungsdienste in hierarchisch strukturierten Kommunikationsnetzen besteht darin, die Einhaltung zugesagter Echtzeiteigenschaften sicherzustellen, die sich jedoch häufig nicht direkt auf die Leistungsangebote der unterliegenden Schichten abbilden lassen. Umgekehrt beeinflusst auch der Charakter des eingebrachten Verkehrs die erreichbare Güte des zu erbringenden Dienstes. Die Komplexität des Gesamtsystems sowie die erwünschte Abgrenzung der unterschiedlichen Abstraktionsebenen innerhalb des Kommunikationssystems verlangen somit nach einem hochentwickelten Dienstgütemanagement. Dieses hat sowohl die Abbildung von Last- und Leistungsspezifikationen von Ebene zu Ebene vorzunehmen als auch die Einhaltung von vereinbarten Dienstgüteschranken zu gewährleisten oder zuverlässig entsprechende Fehlermeldungen zu generieren. Das Dienstgütemanagement muss in diesem Zusammenhang Entscheidungen treffen, die auf potenziellen zukünftigen Arbeitszuständen und den daraus resultierenden Leistungsgrößen beruhen bzw. diese beeinflussen. Aufgrund der starken Nichtlinearität der betrachteten Vorgänge können für diese Entscheidungen keine einfachen Regeln formuliert werden. Vielmehr ist es notwendig, dass das Dienstgütemanagement mögliche Aktionen und Entscheidungen anhand von Modellen im Voraus bewerten kann, um so eine optimale Wahl treffen zu können.

Der in dieser Arbeit vorgestellte Ansatz eines lastadaptiven Dienstgütemanagements behandelt mehrere zentrale Aspekte aus diesem Zusammenhang. Zum einen spielt die Definition und Abschätzung der Momentanauslastung von betrachteten Netzressourcen eine übergeordnete Rolle, da ausgehend von dieser die zur Verfügung stehenden Betriebsmittel adaptiv innerhalb des Kommunikationsnetzes vergeben werden können. Somit wird ermöglicht, dass einerseits Betriebsmittel, die innerhalb des QoS-Managements festen „Eigentümern“, Endsystemen oder Benutzern, zugewiesen wurden, gegebenenfalls anderen Kommunikationsteilnehmern temporär zur Verfügung gestellt werden können, aber andererseits eine Einschränkung der vereinbarten Qualitätskriterien vermieden werden kann. Diese Arbeit widmet sich gleichermaßen einer vereinigenden Sicht auf die Betriebsmittelverwaltung. So wird als Reaktion auf die wachsenden Anforderungen an die erbrachte Dienstgüte gerade in drahtlosen Netzen die konkrete Anwendung des vorgestellten Ansatzes in diesen Netzen anhand von Simulationen eingehend beurteilt. Darüber hinaus werden die grundlegenden Modelle abstrakt formuliert und deren Bewertungen in einer verallgemeinerten Sichtweise vorgenommen, so dass eine Übertragung auf andere Disziplinen mit vergleichbaren Ansprüchen leicht möglich ist; eine Ressourcenzuordnung mit Qualitätszusagen bei gleichzeitig effizientem Gesamtverhalten wird schließlich nicht exklusiv in Kommunikationsnetzen gefordert. Analoge Überlegungen gelten ebenso für andere Bereiche, wie beispielsweise für die Aufteilung von Prozessorleistung in Computersystemen.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die neu entwickelten Methoden zur Unterstützung eines Dienstgütemanagements insbesondere für den Bereich der verteilten Echtzeitanwendungen und als Teilgebiet daraus – schwerpunktmäßig – für die Videokommunikation bzw. -übertragung mit Echtzeitkontext angewendet und bewertet. Gerade diesen verteilten Videoanwendungen die zugesagten Übertragungseigenschaften zu garantieren – bei bestmöglicher Gesamtauslastung –, stellt eine Herausforderung dar, die durch die steigende Nachfrage und die Bereitstellung multimedialer Angebote in jüngerer Zeit durchaus von Bedeutung ist.

## Abstract

For data transmission services in hierarchically structured communication networks one of the main tasks is to ensure that confirmed real-time requirements will be met, although these requirements can often not be mapped directly to services provided by underlying layers. Moreover, the characteristics of the generated traffic affect the achievable quality for those services. In order to come up with the overall system's complexity and to achieve the desired separation between the different layers of abstraction a sophisticated quality of service (QoS) management is essential. This management must map different specifications, in terms of load or service demands, between different layers and guarantee the given bounds for the QoS – or report error messages reliably. Thus, QoS management decisions have to be taken according to the expected future conditions of network and load, e. g. predictions based on measurements. Due to the strong non-linearity of the considered processes no simple rules can be defined. Hence, models are required in order to evaluate in advance the impact of possible actions and decisions taken by the QoS management.

The approach of a load-adaptive QoS management presented in this thesis covers several main aspects. On the one hand the definition and estimation of current resource requirements within networks are of significant interest; starting from this estimation the shared resources can be (re-)distributed within a communication network. Thereby it is possible that resources which are steadily assigned to an „owner“ can be placed at other users' disposal temporarily while at the same time a degradation of the agreed QoS can be avoided. As a part of this thesis a unifying point of view for the load-adaptive resource management is given. As a consequence of the increasingly strong requirements with respect to QoS in particular in wireless networks a concrete application of the proposed approach is presented and assessed by means of simulation for these networks. Furthermore, the fundamental models are treated in an abstract way as well as their evaluations are performed from a generalized point of view. Thus, these new methods can easily be used within other disciplines with analog constraints; resource allocation respecting QoS guarantees combined with efficient overall behavior is, in the end, not only demanded in communication networks. As an example, analogous considerations could be needed in areas such as the allocation and sharing of computing capacity between processes in computer systems.

In this thesis newly developed methods to support QoS management are presented, which are applied and evaluated in particular within the scope of distributed real-time applications with focus on video communications. Especially this challenge to guarantee the necessary QoS characteristics for distributed video applications – in parallel with optimized overall resource utilization – becomes more and more important recently due to the increasing demand and provisioning of multimedia services in the Internet.



Meinen Eltern Josef Anton und Monika



## Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei den Menschen, die mich bei der Erstellung der Dissertation in vielfältiger Weise unterstützt haben. Ein besonderes Dankeschön gebührt meinem „Doktorvater“, dem Leiter der Arbeitsgruppe Telekommunikation und Rechnernetze am Department Informatik der Universität Hamburg, Herrn Prof. Dr. Bernd E. Wolfinger. Er hat während der ganzen Zeit stets mit konstruktiver Kritik und vielfältigen Anregungen zur Weiterentwicklung meiner Ideen beigetragen. Bei Fragen und Problemen hatte er immer ein offenes Ohr und konnte durch seine Erfahrung wichtige Impulse zur Verbesserung der Arbeit setzen. Trotz seines intensiven Einsatzes bei seinen zahlreichen Lehr- und Forschungsaufgaben hat er es geschafft, mich nie lange auf Unterstützung warten zu lassen.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Djamshid Tavangarian von der Universität Rostock und Herrn Prof. Dr. Eike Jessen von der Technischen Universität München bedanke ich mich herzlich für die Übernahme der weiteren Gutachten.

Priv.-Doz. Dr. Klaus Heidtmann, Dr. Martin Lehmann, Dr. Jing Cong und Katrin Köster danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit und das Interesse an meiner Arbeit. Insbesondere gilt mein Dank Dr. Christian Scherpe und Kai Fiolka, die mich mit zahlreichen interessanten Diskussionen begleitet und mit Ihrer unverwechselbaren Art für eine tolle Arbeitsatmosphäre gesorgt haben. Stephan Heckmüller, inzwischen nun selbst in den Anfängen seiner Promotion, war mir vor allem im Hinblick auf die Simulationsstudien eine unbezahlbare Hilfe.

Abschließend möchte ich mich noch bei Herrn Prof. Dr. Wolfram Burgard, Leiter der Arbeitsgruppe Autonome Intelligente Systeme am Institut für Informatik der Universität Freiburg dafür bedanken, dass er mich vor Jahren an die wissenschaftliche Arbeitsweise herangeführt, dafür begeistert und mich letztendlich zur Promotion motiviert hatte.



# Inhalt

<b>I</b>	<b>Einführung und Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einleitung und Motivation</b>	<b>3</b>
1.1	Zur Situation verteilter Echtzeitanwendungen . . . . .	3
1.2	Betriebsmittelverwaltung in Rechnernetzen . . . . .	4
1.3	Übersicht Dienstgüte in drahtlosen Netzen . . . . .	7
1.4	Zielsetzung und Abgrenzung . . . . .	8
1.5	Aufbau dieser Arbeit . . . . .	10
<b>2</b>	<b>Allgemeine Grundlagen</b>	<b>15</b>
2.1	Vereinfachtes Referenzmodell paketvermittelnder Rechnernetze .	15
2.2	Methoden der Bildsequenzkodierung . . . . .	17
2.2.1	Kompressionsbewertung . . . . .	17
2.2.2	Verfahren zur Bildsequenzkompression . . . . .	22
<b>3</b>	<b>Dienstgüte in paketvermittelnden Netzen</b>	<b>29</b>
3.1	Überblick . . . . .	29
3.1.1	Dienstgüte . . . . .	30
3.1.2	Best effort . . . . .	30
3.2	Dienstgüteparameter . . . . .	31
3.2.1	Durchsatz . . . . .	32
3.2.2	Verzögerung . . . . .	32
3.2.3	Verzögerungsschwankung . . . . .	36
3.2.4	Paketverluste . . . . .	36
3.3	Mechanismen zur Beeinflussung der Dienstgütemerkmale . . . . .	38
3.3.1	Klassifizierung und Markierung . . . . .	38
3.3.2	Scheduling der Übertragungswarteschlangen . . . . .	39
3.3.3	Verkehrsglättung . . . . .	39
3.3.4	Konditionierung . . . . .	39
3.3.5	Zugangskontrolle . . . . .	40

3.4	Dienstgütearchitekturen für das Internet . . . . .	40
3.4.1	Ursprüngliche Dienstgedifferenzierung im Internet . . . . .	41
3.4.2	Dienstgedifferenzierung durch Priorisierung . . . . .	42
3.4.3	Dienstgedifferenzierung durch Reservierung mit Zugangs- kontrolle . . . . .	43
<b>II Algorithmen zur dynamischen Bedarfsabschätzung und Betriebsmittelweitergabe</b>		<b>51</b>
<b>4</b>	<b>Charakterisierung der Momentanbelastung</b>	<b>53</b>
4.1	Anforderungen an die dynamische Betriebsmittelverwaltung . .	54
4.1.1	Grundlagen . . . . .	54
4.1.2	Modell und Randbedingungen . . . . .	55
4.2	Algorithmen zur Charakterisierung der Momentanbelastung . .	59
4.3	Bewertungen der Algorithmen . . . . .	61
4.3.1	Ziele . . . . .	61
4.3.2	Randbedingungen . . . . .	62
4.3.3	Messwerteberücksichtigung . . . . .	63
4.3.4	Ansprechempfindlichkeit auf Lastschwankungen . . . . .	64
4.3.5	Arbeitsrückstand . . . . .	65
4.3.6	Verzögerung . . . . .	68
<b>5</b>	<b>Schwellwertssysteme</b>	<b>71</b>
5.1	Schwellwertssysteme zur Steuerung der Betriebsmittelfreigabe . .	71
5.1.1	Begriffsbestimmung . . . . .	71
5.1.2	Randbedingungen und Veranschaulichung . . . . .	72
5.1.3	Musterkonfigurationen für $TS(S, \vartheta)$ . . . . .	78
5.2	Analytische Betrachtung der Schwellwertssysteme . . . . .	80
5.2.1	Motivation und Ziele . . . . .	80
5.2.2	Betriebsmittelauslastung im ungünstigsten Fall . . . . .	81
5.2.3	Betriebsmittelauslastung im Mittel für beliebige Verteilungen . . . . .	82
5.2.4	Betriebsmittelauslastung: $\hat{\rho}(t_i)$ betaverteilt . . . . .	84
5.2.5	Betriebsmittelauslastung: $\hat{\rho}(t_i)$ gleichverteilt . . . . .	86
<b>6</b>	<b>Betriebsmittelverwaltung</b>	<b>89</b>
6.1	Schätzfunktionen und Schwellwertssysteme als Gesamtsystem . .	89
6.1.1	Ansprechempfindlichkeit auf Lastschwankungen . . . . .	89
6.1.2	Ermitteln der maximalen Zusatzverzögerung . . . . .	91

6.2	Fallstudie: Dynamisches Verhalten in realen Lastszenarien . . . .	93
6.2.1	Eine Konkretisierung der Betriebsmittelverwaltung . . . .	94
6.2.2	Exemplifikation: Überlagerter Videostrom . . . . .	96
6.2.3	Verteilungsbasierte Schätzung der Betriebsmittelauslastung . . . . .	97
6.2.4	Endsystemverhalten hinsichtlich Betriebsmittelauslastung	100
6.2.5	Implizierte Verzögerungen . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung Teil II</b>	<b>107</b>
<b>III Bandbreitenverwaltung in drahtlosen lokalen Netzen 109</b>		
<b>8</b>	<b>WLAN: IEEE-Standard und QoS-Erweiterungen</b>	<b>111</b>
8.1	Grundlagen IEEE 802.11 . . . . .	112
8.1.1	Systemarchitektur . . . . .	112
8.1.2	Protokollarchitektur . . . . .	113
8.1.3	Bitübertragungsschicht . . . . .	114
8.1.4	MAC-Schicht . . . . .	115
8.1.5	Beschränkungen bei Bereitstellung von Dienstgüte . . . .	117
8.2	Dienstgüte in drahtlosen Netzen gemäß IEEE 802.11e . . . . .	119
8.2.1	Verwaltung von Verkehrsspezifikationen . . . . .	120
8.2.2	Kanalzugriffsmethoden . . . . .	120
8.2.3	Kanalzugriff mittels EDCA . . . . .	122
8.2.4	Kanalzugriff mittels HCCA . . . . .	124
8.3	Dynamische Bandbreitenverwaltung in 802.11e-Netzen . . . . .	126
8.3.1	Betriebsmittel . . . . .	126
8.3.2	Messkomponente . . . . .	128
8.3.3	Austausch der Steuernachrichten . . . . .	128
8.3.4	Statische Betriebsmittelzuordnung . . . . .	129
8.3.5	Betriebsmittelumverteilung . . . . .	129
<b>9</b>	<b>Simulation der lastadaptiven Betriebsmittelverwaltung</b>	<b>131</b>
9.1	Simulation mit ns2 . . . . .	131
9.1.1	ns2 und WLAN-Erweiterung . . . . .	131
9.1.2	Ziele und Metriken . . . . .	132
9.1.3	Simulationsmodell . . . . .	134
9.2	Fallstudie: Videokommunikation im WLAN . . . . .	135
9.2.1	Endsystemverhalten hinsichtlich Betriebsmittelauslastung . . . . .	136
9.2.2	Latenzzeiten des echtzeitkritischen Verkehrs . . . . .	139

9.2.3	Verzögerungsschwankung . . . . .	142
9.2.4	Effektivität der Betriebsmittelumverteilung . . . . .	143
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung Teil III</b>	<b>147</b>
<b>IV</b>	<b>Parameterschätzung und Qualitätsbewertung der dynamischen Betriebsmittelverwaltung</b>	<b>149</b>
<b>11</b>	<b>Bestimmung relevanter Einflussgrößen</b>	<b>151</b>
11.1	Allgemeine Vorgehensweise . . . . .	151
11.1.1	Berücksichtigung hinreichend vieler Beobachtungsintervalle . . . . .	152
11.1.2	Schätzung der Einflussgrößen äquidistanter n-Zustand-Schwellwertsysteme . . . . .	157
11.2	Aggregierte Lastquellen . . . . .	160
11.2.1	Aggregation mehrerer Lastquellen . . . . .	160
11.2.2	Adaption der Einflussgrößen für aggregierte Ströme gemäß A-priori-Wissen . . . . .	164
<b>12</b>	<b>Fallstudie: Parameterschätzung für Echtzeit-Videoübertragung</b>	<b>173</b>
12.1	Beispielarchitektur eines Multimedia-Dokumentenservers . . . . .	173
12.2	Schätzen der Einflussgrößen . . . . .	178
12.3	Bewertung der berechneten Einflussgrößen mit prototypischer Auswertung . . . . .	184
12.4	Qualitätsbewertung aus Endbenutzersicht . . . . .	189
<b>13</b>	<b>Zusammenfassung Teil IV</b>	<b>195</b>
<b>V</b>	<b>Resümee</b>	<b>197</b>
<b>14</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>199</b>
14.1	Zusammenfassung der Resultate . . . . .	199
14.2	Ausblick . . . . .	200
	<b>Literatur</b>	<b>203</b>

# Abbildungen

1.1	Schematische Darstellung zur dynamischen Betriebsmittelverwaltung . . . . .	10
1.2	Übersicht über die Struktur dieser Arbeit . . . . .	11
2.1	Vereinfachte Protokollarchitektur paketvermittelnder Netze . . .	16
2.2	Schematische Darstellung der Kodierung eines Bildes nach dem JPEG-Standard . . . . .	23
2.3	Sequenz und Bildstruktur . . . . .	25
2.4	Schematischer Ablauf eines allgemeinen Algorithmus zur Bewegtbildkompression . . . . .	26
3.1	Verzögerungskomponenten der Übertragung eines IP-Paketes zwischen zwei Vermittlungsrechnern R1 und R2 . . . . .	35
3.2	Bitdefinitionen des ToS-Byte nach RFC 791 . . . . .	42
3.3	RSVP-Signalisierung zum Reservierungsaufbau für <i>IntServ</i> . . .	47
4.1	Schematische Darstellung des unterstellten Szenarios zur dynamischen Betriebsmittelverwaltung . . . . .	56
4.2	Geometrische Gewichtung einzelner Beobachtungen im zeitlichen Zusammenhang . . . . .	60
4.3	Arithmetische Gewichtung einzelner Beobachtungen im zeitlichen Zusammenhang . . . . .	61
4.4	Lastschätzung unterschiedlicher Funktionen für das <i>Rapid-boost</i> -Szenario . . . . .	65
5.1	Ein allgemeines 3-Zustand-Schwellwertsystem . . . . .	73
5.2	Ein parametrisiertes 4-Zustand-Schwellwertsystem . . . . .	75
5.3	Wahrscheinlichkeitsdichten verschiedener Betaverteilungen . . .	85
6.1	$G_{0,3}$ : Zustandswechsel im <i>Rapid-boost</i> -Szenario . . . . .	90
6.2	Schematische Darstellung zur dynamischen Betriebsmittelverwaltung für das Betriebsmittel Übertragungskapazität . . . .	95

6.3	Generierte Last der überlagerten MPEG-4-Videos <i>Jurassic Park</i> und <i>Mr. Bean</i> in Prozentanteilen der reservierten Datenrate . . .	97
6.4	$G_{0,3}$ : Häufigkeitsverteilung der Schätzwerte der Momentanbelastung der Sequenz <i>Jurassic-Parc/Mr. Bean</i> und Dichte der approximierten Betaverteilung . . . . .	99
6.5	Ausschnitt der generierten Last und geschätzte Momentanbelastung unterschiedlicher Funktionen . . . . .	101
6.6	<i>Jurassic Park/Mr. Bean</i> : Messdaten und beanspruchter Kapazitätsanteil bei unterschiedlichen Schwellwertsystemen und Schätzern . . . . .	102
6.7	Anteil reservierter Datenrate, nutzbar innerhalb des Netzes, und durchschnittliche Kontrollnachrichtenrate für $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . .	103
6.8	Anteil reservierter Datenrate, nutzbar innerhalb des Netzes, und durchschnittliche Kontrollnachrichtenrate für $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . .	104
6.9	Maximal auftretende und mittlere Verzögerungen mit 95%-Konfidenzintervall für $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	105
6.10	Maximal auftretende und mittlere Verzögerungen mit 95%-Konfidenzintervall für $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	105
8.1	IEEE 802.11-Architektur eines infrastrukturbasierten Netzes . . .	113
8.2	Die IEEE 802.11-Protokollarchitektur . . . . .	114
8.3	Zeitlicher Ablauf mittels unterschiedlicher IFS . . . . .	116
8.4	EDCA: Modell der Referenzimplementierung nach dem IEEE-Standard . . . . .	123
8.5	Beispiel eines Superrahmens gemäß 802.11e einschließlich der optionalen CFP . . . . .	125
8.6	Dynamische Betriebsmittelverwaltung in einem WLAN gemäß IEEE-Standard 802.11e . . . . .	127
9.1	Auslastung der Übertragungskapazität und Anteil der Kontrollnachrichten an der UDP-Nutzlast für $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	138
9.2	Auslastung der Übertragungskapazität und Anteil der Kontrollnachrichten an der UDP-Nutzlast für $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	138
9.3	Latenzzeiten des Echtzeitverkehrs mit Maximum und Mittelwert samt 95%-Konfidenzintervall für $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	139
9.4	Häufigkeitsverteilung der Latenzzeit bei Einsatz des Schätzers $G_{0,3}$ , kombiniert mit unterschiedlichen Schwellwertsystemen und $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	140
9.5	Latenzzeiten des Echtzeitverkehrs mit Maximum und Mittelwert samt 95%-Konfidenzintervall für $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	141

9.6	Häufigkeitsverteilung der Latenzzeit bei Einsatz des Schätzers $G_{0,3}$ , kombiniert mit unterschiedlichen Schwellwertsystemen und $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	141
9.7	Normalisierter Durchsatz der <i>Best-effort</i> -Aufträge bei reservierter Datenrate $r = 4.4 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	145
9.8	Normalisierter Durchsatz der <i>Best-effort</i> -Aufträge bei reservierter Datenrate $r = 3.1 \text{ Mbit/s}$ . . . . .	145
11.1	Geometrische Gewichtung einzelner Beobachtungen im Zeitraum der Länge $T$ . . . . .	153
11.2	Untere Schranke für den Parameter $\alpha$ , abhängig von der Anzahl relevanter Beobachtungen $i_0$ und Anteil $p$ am Schätzwert . . . . .	155
11.3	Arithmetische Gewichtung einzelner Beobachtungen im Zeitraum der Länge $T$ . . . . .	156
11.4	Obere Schranke für den Parameter $w$ , abhängig von der Anzahl relevanter Beobachtungen $i_0$ . . . . .	158
11.5	Quotient der charakterisierenden LBAP-Parameter für unterschiedliche selbstüberlagerte Videos . . . . .	162
11.6	Variationskoeffizient unterschiedlicher selbstüberlagertes Videos . . . . .	163
12.1	Architektur zur verteilten Speicherung multimedialer Dokumente mit zentraler Auslieferungsstelle und Anbindung für Live-Übertragungen . . . . .	175
12.2	Ort-Zeit-Diagramm zur beispielhaften Illustration des Nachrichten- und Datenaustausches eines verteilten Multimedia-Dokumentenservers . . . . .	176
12.3	$G_{0,28}$ : Häufigkeitsverteilung der Schätzwerte der Momentanbelastung der Sequenz <i>Soccer</i> und Dichte der vorgegebenen Betaverteilung . . . . .	180
12.4	Auslastungsabschätzung für $E_5^{b,m}$ , basierend auf einer bekannten Betaverteilung . . . . .	181
12.5	Maximalverzögerung durch Lastunterschätzung nach Algorithmus 6.1 für $E_5^{b,m}$ . . . . .	182
12.6	Auslastungsabschätzung für $E_5^{b,m}$ unter der Randbedingung $\tau_{max} \leq 80 \text{ ms}$ . . . . .	183
12.7	Multimedia-Dokumentenserver: Versuchsaufbau zur Bewertung von Einflussgrößen der adaptiven Betriebsmittelverwaltung . . . . .	186
12.8	Dekodierte Bildrahmen ohne bzw. mit verworfenen Paketen durch überschrittene Echtzeitgrenzen . . . . .	190
12.9	<i>Highway</i> : Qualitätsbewertung einer Videosequenz für sehr unterschiedliche Auslastungsvorgaben . . . . .	193



# Tabellen

2.1	MOS-Bewertungsskala . . . . .	21
3.1	Verkehrs- und Reservierungsspezifikation für <i>IntServ</i> . . . . .	47
4.1	<i>Rapid-boost</i> -Szenario: Obere Schranken für $\tau_{max}$ in Vielfachen von $\Delta t$ bei unterschiedlichen Schätzfunktionen . . . . .	69
5.1	Mögliche Minimalauslastung des reservierten Betriebsmittelanteiles im ungünstigsten Fall . . . . .	82
5.2	Im Mittel (gleichverteilte Schätzwerte): Ungenutzt verbleibender Anteil reservierter Betriebsmittel mit optimistischer und pessimistischer Annahme und erwartete Auslastung . . . . .	87
6.1	Obere Schranken für durch Arbeitsrückstand entstehende Verzögerungen als Vielfache von $\Delta t$ ; bestimmt für das <i>Rapid-boost</i> -Szenario aus Gleichung (4.2) . . . . .	94
6.2	Einflussgrößen der Betaverteilung als Approximation der Lastschätzwerte für die Sequenz <i>Jurassic Parc/Mr. Bean</i> . . . . .	99
6.3	Erwartete Auslastung der reservierten Betriebsmittel im Mittel, unter der Annahme betaverteilter Schätzwerte bei hinreichend großer Hintergrundlast . . . . .	100
9.1	Einflussgrößen der WLAN-Simulation . . . . .	135
9.2	Mittlere Verzögerungsschwankung (in Millisekunden) der UDP-Pakete des Videostromes bei unterschiedlichen Einflussgrößen . . . . .	143
12.1	Schätzen der Einflussgrößen für Videoübertragung gemäß gegebener Verteilung der Paketlängen – hier empirisch ermittelte Verteilung der Sequenz <i>Soccer</i> . . . . .	185
12.2	Übertragung Sportsendung (Vidosequenz <i>Soccer</i> ): Vergleich analytisch und empirisch ermittelter Charakteristiken . . . . .	188
12.3	Gegenüberstellung Bildqualität und Auslastung bei unterschiedlich gewählten Parametern . . . . .	194



# Abkürzungen

AC	Zugriffskategorie (access category)
AIFS	frei wählbarer IFS (arbitrary IFS)
AP	Basisstation (access point)
ARP	address resolution protocol
bpp	Bit pro Bildpunkt (bit per pixel)
bps	Bit pro Sekunde (bit per second)
BSS	basic service set
CFP	wettbewerbsfreie Phase (contention free period)
CP	Wettbewerbsphase (contention period)
CPU	Zentralprozessor (Central Processing Unit)
CSMA/CA	carrier sense multiple access with collision avoidance
CTS	clear-to-send
DCF	distributed coordination function
DCT	Diskrete Cosinus-Transformation
DIFS	DCF inter-frame space
DS-Domäne	Differentiated-services-Domäne
DSCP	differentiated services code point
DSSS	direct sequence spread spectrum
EA	Ein-/Ausgabe-Rechner
EDCA	enhanced distributed channel access
EDCAF	EDCA-Funktion
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
EWMA	exponential weighted moving average
FE	Front-End
FHSS	frequency hopping spread spectrum
FIFO	first-in, first-out
HC	hybrid coordinator
HCCA	HCF controlled channel access
HCF	hybrid coordination function
IBSS	independent basic service set
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IETF	Internet Engineering Task Force

IFS	inter frame space
IntServ	Integrated Services
LBAP	linear bounded arrival process
LFI	link fragmentation and interleaving
LLC	Verbindungsabschnittssteuerung (logical link control)
M-PDU	MAC-Protokolldateneinheit (MAC protocol data unit)
M-SDU	MAC-Dienstdateneinheit (MAC service data unit)
MAC	Medienzugriffskontrolle (media access control)
MAD	mittlerer absoluter Fehler (mean absolute difference)
MSE	mittlerer quadratischer Fehler (mean square error)
PCF	point coordination function
PHB	per-hop behavior
PHY	Bitübertragungsschicht (physical layer)
PIFS	PCF inter-frame space
PLCP	Physical Layer Convergence Protocol
PMD	physical-medium-dependent
PSNR	Spitzen-Signal-Rausch-Verhältnis (peak-signal-to-noise ratio)
QoS	Dienstgüte (quality of service)
RED	random early detection
RFC	request for comments
RSpec	reservation specification
RSVP	resource reservation protocol
RTS	ready-to-send
SIFS	short inter-frame space
SNR	Signal-Rausch-Verhältnis (signal-to-noise ratio)
SPD	selective packet discard
TBTT	target beacon transmission time
ToS	Diensttyp (type of service)
TSpec	Verkehrsspezifikation (traffic specification)
TXOP	transmission opportunity
UP	Benutzerpriorität (user priority)
VLC	variable Längenkodierung (variable length coding)
VoIP	Voice over IP
WLAN	drahtloses lokales Netz (wireless local area network)
WWW	world wide web