

Einsatz von Lasttransformationen und ihren  
Invertierungen zur realitätsnahen  
Lastmodellierung in Rechnernetzen

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Dr. rer. nat.

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
der Universität Hamburg

eingereicht beim Fachbereich Informatik von

Stephan Heckmüller  
aus Homberg (Efze)

März 2011



Berichte aus dem Forschungsschwerpunkt  
Telekommunikation und Rechnernetze

Band 7

**Stephan Heckmüller**

**Einsatz von Lasttransformationen  
und ihren Invertierungen zur realitätsnahen  
Lastmodellierung in Rechnernetzen**

Shaker Verlag  
Aachen 2011

**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., 2011

Copyright Shaker Verlag 2011

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-0438-0

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

Nach Prognosen der Firma CISCO (einem weltweit führenden Hersteller von Rechnernetzkomponenten) wird das jährlich zu erwartende Verkehrsaufkommen im Internet bereits im Jahre 2014 weltweit einen Wert von 767 Exabyte erreichen (dies entspricht:  $767 \cdot 10^{18}$  Byte bzw. 767.000.000.000.000.000.000 Byte !). Zudem hat sich in jüngerer Vergangenheit die Art der zu übertragenden Daten sehr stark verändert: Videokommunikation stellt bereits zurzeit die bei weitem dominierende Verkehrsart dar, und man geht davon aus, dass 2014 jährlich über das globale Internet so viel Videodaten übertragen werden, dass eine einzige Person 72 Mio. Jahre benötigen würde, um all diese Videosequenzen zu betrachten. Daher wird die wissenschaftliche Beschäftigung mit Verkehr in Rechnernetzen, insbesondere dem Internet, zunehmend bedeutsam. Eines der Hauptziele derartiger Forschungsaktivitäten ist die Gewinnung eines vertieften Verständnisses bezüglich der wesentlichen Charakteristika des Verkehrs u.a. um möglichst realistische Verkehrsmodelle erstellen zu können.

Auch die vorliegende Monographie, die der Dissertationsschrift des Autors entspricht, bezog ihre Motivation aus der praxisrelevanten und gleichzeitig sehr anspruchsvollen Problemstellung einer realitätsnahen Charakterisierung und Modellierung von Verkehr (u.a. Videoverkehr) in Rechnernetzen, insbesondere in Netzen, die auf dem 'Internet Protocol' (IP) basieren. Verkehr in Rechnernetzen wird direkt durch die Lasten (im Sinne der Sequenzen zu bearbeitender Aufträge) induziert, die durch die Benutzer von Rechnernetzdiensten an den entsprechenden Schnittstellen innerhalb der Protokoll- bzw. Diensthierarchie des Netzes zur Bearbeitung übergeben werden. Verkehrsmodellierung kann daher auf der Basis einer Lastmodellierung erreicht werden. Herr Heckmüller geht in seinem Forschungsansatz diesen Weg und greift dabei auf die neuartige Methode der Lasttransformation zurück. Hier wird unter Lasttransformation der Transformationsprozess verstanden, wie er in heutigen Rechnernetzen mit einer hierarchischen Protokollhierarchie stattfindet, wobei die Last (Auftragssequenz) – betrachtet an einer gegebenen Schnittstelle – durch die Kommunikationshardware und -software des Netzes verändert, d.h. transformiert, wird, so dass an einer tieferen Schnittstelle eine entsprechend modifizierte Last zu beobachten ist. Man nennt die

untransformierte Last auch Primärlast und die Last nach der Transformation Sekundärlast. Zu der Lasttransformation, die eine Primär- in eine Sekundärlast umwandelt, kann man auch die inverse Lasttransformation betrachten, bei der die Frage beantwortet wird, welche (a priori unbekannt) Primärlast zu einer beobachteten Sekundärlast transformiert worden sein könnte.

In seinem durch die vorliegende Arbeit dokumentierten Dissertationsprojekt hat Herr Stephan Heckmüller das noch sehr junge Forschungsgebiet der Lasttransformation und ihrer Invertierung in höchst eindrucksvoller Weise einen sehr großen Schritt vorangebracht. Insbesondere ist es dem Autor gelungen, auf der sehr umfassenden (Last-)Modellklasse der 'Batch Markovian Arrival Processes' (BMAPs) die Auswirkungen einer Vielzahl von praxisrelevanten Transformationsprozessen analytisch zu modellieren und auszuwerten. Die erfolgreich modellierten Transformationsprozesse umfassen dabei sowohl Prozesse, die das zeitliche Verhalten (Auftragsankunfts- bzw. -abgangsprozess) in einer Auftragssequenz verändern als auch solche Prozesse, die die Attribute von Aufträgen oder gar beide Charakteristika transformieren.

Im Einzelnen beinhaltet diese Arbeit die folgenden zentralen Resultate:

- Zunächst gibt der Autor eine Übersicht über eine Vielzahl wichtiger Lasttransformationsprozesse in Rechnernetzen und klassifiziert diese Transformationsvorgänge in Transformationen, die das 'Timing' betreffen und solche, die die Aufträge selbst verändern.
- Die Prozessklasse der BMAPs wird eingeführt und es wird sehr schön aufgezeigt, dass mit den BMAPs die meisten der für eine analytische Lastmodellierung wichtigen Prozessklassen (wie z.B. Poisson-Prozesse, Markov-Modulierte Poisson-Prozesse mit dem Spezialfall der ON-OFF-Modelle, Batch-Poisson-Prozesse, etc) verallgemeinert werden.
- Zahlreiche Lasttransformationen auf BMAPs werden mathematisch-analytisch behandelt (u.a. Modellierung von Headergenerierungs- und Fragmentierungsvorgängen, Paketverlustprozessen sowie Ratenkontrollmechanismen). Die analytischen Modelltransformationen werden überdies äußerst erfolgreich validiert.

- Ein modulares und komfortabel benutzbares Werkzeug, mit dessen Hilfe Transformationen auf BMAPs spezifiziert und durchgeführt werden können, wurde durch den Autor entwickelt und wird in der Arbeit vorgestellt.
- Eine umfangreiche Fallstudie zur Vorhersage von Sekundärlasten, wie sie durch Videokommunikation induziert werden, zeigt die hervorragende Realitätsnähe der Lasttransformation als Prädikationsmethode.
- Auch für die inverse Lasttransformation gelingt Herrn Heckmüller mit der Invertierung der Transformation von Auftragslängen sowie der Rekonstruktion von Auftragsankunftsprozessen an der Primärlast-Schnittstelle (ausgehend von beobachteten Abgangsprozessen an der Sekundärlast-Schnittstelle) die Invertierung von sehr praxisrelevanten und weit verbreiteten Transformationsprozessen.
- Die abschließende Fallstudie für die inverse Transformation, bei der (Auftrags-) Ankunftsprozesseigenschaften in WLANs rekonstruiert werden, unterstreicht, dass auch die Invertierung von Transformationsvorgängen in der Lage ist, sehr realistische Resultate zu liefern.

Es ist zu hoffen (und zu erwarten), dass dank Arbeiten wie der hier vorliegenden das dringend benötigte tiefere Verständnis des Verkehrs in Rechnernetzen, wie dem Internet, zukünftig deutlich besser als in der Vergangenheit erreicht werden kann.

Hamburg, im August 2011

Bernd E. Wolfinger



## Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Charakterisierung von Lasten in Rechnernetzen. Da moderne Rechnernetze aus einer Vielzahl von Einzelkomponenten bestehen, welche die Charakteristika der Last verändern, wird besonderes Augenmerk auf die Abhängigkeit der Lasteigenschaften von der betrachteten Schnittstelle gelegt. Die Veränderung von Lasteigenschaften durch Auftragsverarbeitung wird durch das Konzept der Lasttransformation formalisiert. Hierbei ist Lasttransformation als Transformation einer Primärlast in eine Sekundärlast durch ein verarbeitendes System zu verstehen.

Aufbauend auf dem Konzept der Lasttransformation werden Transformationen, wie sie durch häufig eingesetzte Verarbeitungsmechanismen in heutigen Netzen vorgenommen werden, als Abbildungen auf markovschen Prozessen modelliert. Hierzu werden für solche Primärlasten, die sich als *Batch Markovian Arrival Process* (BMAP) charakterisieren lassen, Beschreibungen der Sekundärlast als BMAP angegeben. Es werden modellbasierte Transformationen für Fragmentierungsmechanismen, verlustbehaftete Übertragungen und Ratenkontrollmechanismen vorgeschlagen und diskutiert. Umfangreiche Validationsstudien bestätigen den hohen Grad an Realitätsnähe der vorgeschlagenen modellbasierten Transformationen.

Neben der Betrachtung der in Rechnernetzen auftretenden Lasttransformationen wird das hierzu inverse Problem der *inversen Lasttransformation* untersucht. Zunächst werden die für Schnittstellen in Rechnernetzen relevanten Typen von inversen Lasttransformation identifiziert und kategorisiert.

Daraufhin wird die inverse Transformation von Auftragslängen untersucht. Es werden Verfahren vorgeschlagen, um ausgehend von paketbasierten Messungen, die Längen der Aufträge, wie sie durch kommunizierende Anwendungsinstanzen versendet werden, zu rekonstruieren. Die Güte dieser Verfahren wird mit Hilfe realer Messdaten bewertet.

Darüber hinaus werden Verfahren vorgeschlagen, um die Charakteristika des Ankunftsprozesses eines zeitdiskreten Warteschlangensystems ausgehend von der Kenntnis des Abgangsprozesses zu rekonstruieren. Mit Hilfe von Simulationsstudien wird die Anwendbarkeit dieser Methoden im Rahmen von Polling-Mechanismen drahtloser Netze demonstriert.

Mit den Resultaten dieser Arbeit werden zwei sehr praxisrelevante und anspruchsvolle Probleme zumindest ansatzweise gelöst. Die erzielten Ergebnisse unterstreichen zum einen, dass durch Lasttransformation eine valide Prognose von Lasten selbst für Schnittstelle noch möglich ist, welche im Realsystem nicht beobachtet werden können. Zum anderen erlaubt die inverse Lasttransformation die Rekonstruktion wesentlicher Charakteristika der ursprünglich generierten (Primär-)Lasten.



## Abstract

This thesis deals with the characterization of loads in computer networks. Since modern computer networks consist of a high number of components each of which is capable of altering the characteristics of the load, this work will particularly focus on the dependence of the load characteristics on the considered interface. The modification of load characteristics due to the processing of requests is formalized by the concept of load transformation. Here, we define load transformation as a transformation of a primary load to a secondary load by a processing system.

Based on the concept of load transformation we propose to model load modifications as mappings on Markov processes. We assume that the primary load can be modeled validly as a *Batch Markovian Arrival Process* (BMAP). For a given transformation process mappings on a BMAP describing secondary load are proposed. In particular, such model-based transformations are presented for fragmentation processes, transmissions over lossy channels and rate regulation mechanisms. The model-based transformations are extensively validated by comparison to the results of simulation studies and measurement data obtained from experiments in a real network.

In addition to load transformations occurring in computer networks, the inverse problem of *inverse load transformation* is considered. Here, the investigation begins with the identification of the relevant types of inverse load transformations for the different interfaces of modern computer networks. After the general discussion of inverse load transformation the inverse transformation of request lengths is investigated. We introduce methods for reconstructing request lengths as induced by communicating application instances based on packet measurements. The presented methods are evaluated by comparing the results derived from measured packets to the corresponding measured request lengths from real applications.

An addition, methods are proposed which allow the reconstruction of characteristics of arrival processes to discrete-time queueing systems. For this, only the departure process of the system has to be observed. Simulation studies demonstrate the applicability of the proposed methods in the context of polling mechanisms used in wireless networks.

The results presented in this thesis constitute partial solutions for two highly relevant, complex problems. It was shown that, by using the concept of load transformation, it is possible to obtain valid load predictions for interfaces which are not necessarily observable in real systems. Moreover, inverse load transformation allows the reconstruction of important characteristics of the originally generated primary load.



## Danksagung

Ein besonderer Dank gilt dem Betreuer meiner Arbeit Herrn Prof. B. E. Wolfinger, der durch seine Anregungen und Ratschläge wesentlich zur Entstehung dieser Arbeit beigetragen hat.

Herzlich möchte ich mich auch bei Herrn Prof. H. Daduna für die zahlreichen Verbesserungsvorschläge und die konstruktive Kritik bedanken. Herrn Prof. M. Siegle danke ich für die Übernahme des Drittgutachtens.

Des Weiteren gebührt den Mitarbeitern der Arbeitsgruppe Telekommunikation und Rechnernetze am Fachbereich Informatik der Universität Hamburg ein besonderer Dank für die vielen interessanten Anregungen und nicht zuletzt für das angenehme Arbeitsklima.

Bei den Herren Rafael Dembski, Aaron Kunde, Nils Kannenberg und Michael Spork möchte ich mich für die Unterstützung im Rahmen studentischer Arbeiten bedanken. Den Herren L. Braun und Dr. G. Münz danke ich für die gute Zusammenarbeit im Rahmen des DFG-Projektes LUPUS.



# Inhalt

<b>I</b>	<b>Einführung und Grundlagen</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Rechnernetze und Lasttransformation</b>	<b>9</b>
2.1	Verarbeitungsvorgänge in Rechnernetzen . . . . .	9
2.1.1	Die Vermittlungsschicht . . . . .	10
2.1.2	Die Transportschicht . . . . .	12
2.1.3	Mechanismen zur Bereitstellung von Dienstgüte . . . . .	14
2.2	Lasttransformation . . . . .	16
2.2.1	Klassifikation von Lasttransmutationsprozessen . . . . .	21
2.2.2	Simulative Lasttransformation . . . . .	23
2.2.3	Analytische Lasttransformation . . . . .	24
<b>II</b>	<b>Lasttransformation auf markovschen Ankunftsprozessen</b>	<b>29</b>
<b>3</b>	<b>Lasttransformation für Markovsche Ankunftsprozesse</b>	<b>31</b>
3.1	Batch Markovian Arrival Processes (BMAPs) . . . . .	31
3.1.1	Definition . . . . .	31
3.1.2	Enthaltene Prozessklassen . . . . .	33
3.2	Lasttransformation auf BMAPs . . . . .	36
3.3	Verwandte Ansätze . . . . .	38
3.3.1	Wartesysteme . . . . .	38
3.3.2	Lastmodellierung mit Markovschen Ankunftsprozessen . . . . .	42
3.4	Headergenerierung . . . . .	44

<b>4</b>	<b>Modellierung von Fragmentierungsmechanismen</b>	<b>47</b>
4.1	Anpassung der Fragmentanzahl . . . . .	53
4.1.1	Heavy-Tailed Auftragslängen . . . . .	55
4.1.2	Negative Binomialverteilungen . . . . .	57
4.2	Die Verteilung der Fragmentlängen . . . . .	59
<b>5</b>	<b>Modellierung von Verlustprozessen</b>	<b>63</b>
5.1	Prognose der mittleren Ankunftsrate . . . . .	67
5.2	Vergleich mit Simulationsresultaten . . . . .	71
5.3	Berücksichtigung von Übertragungswiederholungen . . . . .	77
<b>6</b>	<b>Modellierung von Ratenkontrollmechanismen</b>	<b>81</b>
6.1	Verkleinerung des Zustandsraums . . . . .	85
6.2	Validationsstudien . . . . .	87
<b>7</b>	<b>Realisierung eines Transformationswerkzeugs</b>	<b>99</b>
7.1	Realisierung des Plugin-Mechanismus . . . . .	103
7.2	Nebenläufige Ausführung . . . . .	107
<b>8</b>	<b>Fallstudie I: Prädiktion induzierter Videosekundärlasten mit Hilfe markovscher Lasttransformationen</b>	<b>109</b>
8.1	Modellierung von Videoströmen durch BMAPs . . . . .	110
8.1.1	Grundlagen von Videokodierungsverfahren . . . . .	110
8.1.2	Bestimmung des Zustandsübergangsgraphen . . . . .	112
8.1.3	Modelle mit wechselnden Veränderungsintensitäten . . . . .	113
8.2	Bewertung der Transformationsalgorithmen . . . . .	117
 <b>III Inverse Lasttransformation und ihre Anwendung</b>		
<b>9</b>	<b>Inverse Lasttransformation</b>	<b>133</b>
9.1	Typen inverser Lasttransformationen . . . . .	134
9.1.1	Inverse Transformation von Adressattributen . . . . .	136
9.1.2	Inverse Transformation von Längenattributen . . . . .	138
9.1.3	Inverse Transformation sonstiger Auftragsattribute . . . . .	139
9.1.4	Inverse Transformation von zeitlichen Eigenschaften . . . . .	141
9.2	Verwandte Forschungsgebiete . . . . .	142

<b>10 Inverse Transformation von Auftragslängen</b>	<b>145</b>
10.1 Fragmentlängen verschiedener Auftragslängenverteilungen . . .	149
10.2 Rekonstruktion bei sequentiellem Nachrichtenaustausch . . . .	149
10.3 Rekonstruktion mit Hilfe von Paketlängen . . . . .	151
10.4 Rekonstruktion durch Verwendung des TCP-PUSH-Flags . . .	154
10.5 Momente der rekonstruierten Auftragslängen . . . . .	155
10.6 Bewertung der Rekonstruktionsalgorithmen . . . . .	157
<b>11 Inverse Transformation von Abgangsprozessen</b>	<b>165</b>
11.1 Normalverteilte Ankunftsprozesse . . . . .	169
11.2 Autoregressive Prozesse . . . . .	174
11.3 Korrelierte Ankünfte . . . . .	178
11.4 Erweiterungen des Modells . . . . .	182
11.4.1 Mehrere Warteschlangen . . . . .	182
11.4.2 Schwankungen der Bedienkapazität . . . . .	184
11.5 Nutzung zur Pufferdimensionierung . . . . .	187
<b>12 Fallstudie II: Rekonstruktion von Ankunftsprozess-Eigenschaften in drahtlosen Netzen</b>	<b>191</b>
12.1 Ressourcenreservierung in WLAN-Netzen . . . . .	191
12.2 Simulationsresultate . . . . .	193
12.3 Übertragbarkeit auf andere drahtlose Netze . . . . .	197
<b>IV Fazit und Ausblick</b>	<b>201</b>
<b>13 Resümee und Ausblick</b>	<b>203</b>