

Einsatz von Lasttransformationen und ihren Invertierungen zur realitätsnahen Lastmodellierung in Rechnernetzen

Stephan Heckmüller

Universität Hamburg, Fachbereich Informatik
SSI Schäfer Noell

heckmueller@informatik.uni-hamburg.de

Abstract: Die im Folgenden zusammengefasste Dissertation [Hec11] 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. Diesbezüglich wird die inverse Transformation von Auftragslängen untersucht. Darüber hinaus werden Verfahren vorgeschlagen, um die Charakteristika des Ankunftsprozesses eines zeitdiskreten Warteschlangensystems ausgehend von der Kenntnis des Abgangsprozesses zu rekonstruieren.

1 Einleitung

Die Verfügbarkeit von realistischen Lastmodellen ist für die Bewertung und Planung von Rechnernetzen unverzichtbar. Darüber hinaus spielt bei der Bereitstellung von Ressourcen – wie beispielsweise von Übertragungskapazitäten – die modellbasierte Lastprognose eine wichtige Rolle. Aufgrund der stetig zunehmenden Vielfalt von verteilten Anwendungen und der immensen Verbreitung von Rechnernetzen ist allerdings eine hohe Komplexität der statistischen Eigenschaften der zu modellierenden Lasten in Rechnernetzen zu verzeichnen, wodurch eine realitätsnahe Lastmodellierung sehr erschwert wird.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher mit der Charakterisierung von Lasten in Rechnernetzen an der Vielzahl von in solchen Netzen existierenden Schnittstellen. Die Abhängigkeit der Lasteigenschaften von der jeweilig betrachteten Schnittstelle ist hierbei als Folge des Aufbaus moderner Rechnernetze besonders zu betonen. Diese Rechnernetze konstituieren einerseits verteilte Systeme, welche sich aus einer Vielzahl von Netzknoten zusammensetzen. Andererseits sind in jedem dieser Knoten die zur Kommunikation benötigten Protokolle in einer Schichtenarchitektur organisiert, wobei die jeweiligen Protokollimplementierungen im Allgemeinen nur mit den direkt angrenzenden Schichten interagieren.

Diese Vielzahl von Einzelkomponenten trägt jeweils einen Teil zur Auftragserfüllung (z. B. zum Verbindungsaufbau zwischen kommunizierenden Instanzen oder zur Übermittlung von Dateneinheiten) bei und verändert so die Eigenschaften der an sie übergebenen Last durch die vorgenommene Weiterverarbeitung. Diese modifizierte Last wird an die nachfolgende Komponente über die gemeinsame Schnittstelle zwischen den beiden Komponenten weitergegeben. Dies impliziert, dass die durch ein Einzelsystem wahrgenommene Last nicht mehr der originären Last entspricht, sondern bereits alle durch vorhergehende Module vorgenommenen Modifikationen in der Last enthalten sind. Daher ist es unabdingbar, diese schnittstellenspezifische Sequenz von Lastmodifikationen in die Betrachtung miteinzubeziehen, um so zu einem validen Modell der Last an einer gegebenen Schnittstelle zu gelangen. Ein solches Modell stellt wiederum die Voraussetzung für eine realistische Leistungsbewertung der betrachteten Systeme dar.

Die Modellierung von Lastveränderungen wird in der vorliegenden Arbeit durch das Konzept der *Lasttransformation* formalisiert. Diese beschreibt die durch ein verarbeitendes System vorgenommene Transformation von der eingehenden *Primärlast* zu der ausgehenden *Sekundärlast*. Hierbei sind insbesondere Transformationen von Aufträgen und ihren Attributen und die Transformation von zeitlichen Eigenschaften eines Auftragsstroms zu unterscheiden. Es wird das Ziel verfolgt, analytische Modellierungstechniken zu entwickeln, welche sowohl die Transformation von zeitlichen Eigenschaften als auch von Auftragslängen umfassen.

Die Modellierung der Transformationsprozesse erfolgt als (transformationsspezifische) Abbildung auf stochastischen Prozessen. Ausgehend von der stochastischen Beschreibung der Primärlast und dem jeweiligen Transformationsprozess ist hierzu ein Modell der Sekundärlast anzugeben, welches wiederum ein stochastischer Prozess ist. Bei der Leistungsbewertung von Systemen, welche die transformierte Sekundärlast verarbeiten, kann so sichergestellt werden, dass die Auswirkungen der gegebenen Lasttransformation auf die Lasteigenschaften berücksichtigt werden. Somit kann die Realitätsnähe der Lastbeschreibung an nachfolgenden Schnittstellen erhöht werden. Aufgrund der hohen Flexibilität dieser Prozessbeschreibung operieren die vorzuschlagenden modellbasierten Transformationen auf *Batch Markovian Arrival Processes* (BMAP). BMAPs sind zeitkontinuierliche Markovsche Modelle und erlauben die Modellierung von sog. Batch-Ankünften – also der zeitgleichen Ankunft von mehreren Aufträgen.

Im Folgenden werden modellbasierte Transformationen für eine Reihe von Verarbeitungsmechanismen vorgeschlagen: Zunächst wird die Lasttransformation, wie sie sich durch das Hinzufügen von Headerdaten ergibt, modelliert. Daraufhin werden die Auswirkungen von

Fragmentierungsmechanismen betrachtet und diese als Abbildung auf BMAPs formuliert [HW07a]. Des Weiteren werden die Einflüsse von Paketverlusten auf die Lasteigenschaften betrachtet. Aufbauend auf den gewonnenen Modellen ist es möglich, in effizienter Weise den bei gegebenem Ankunftsprozess und Fehlermodell erzielbaren Durchsatz zu bestimmen. Dieser Sachverhalt kann zur Optimierung von Übertragungsparametern genutzt werden [HW07b].

Ein weiterer betrachteter Verarbeitungsmechanismus ist der Token-Bucket-Regulator. Solche Regulatoren werden in Rechnernetzen zur Lastglättung eingesetzt und stellen sicher, dass eine spezifizierete Paketankunftsrate langfristig nicht überschritten wird. Diesbezüglich wird der Abgangsprozess eines solchen Systems wiederum als markovscher Prozess beschrieben [HW08, HW09]. Die Güte aller Transformationsalgorithmen wird durch umfangreiche Validationsstudien untermauert. Zur Durchführung der vorgeschlagenen Transformationen wurde des Weiteren ein auf dem Konzept der Datenflussarchitektur basierendes Werkzeug entworfen [HSW08].

Die Betrachtung von markovschen, modellbasierten Transformationen wird schließlich abgeschlossen mit Validationsstudien, in denen transformierte Modelle mit realem, gemessenem Verkehr verglichen werden [HW10]. Es zeigt sich dabei, dass auch komplexe Transformationssequenzen im Realsystem mit Hilfe der vorgeschlagenen Methoden mit guter Genauigkeit nachgebildet werden können. Dies untermauert die Nützlichkeit dieser Methoden.

Neben der Frage nach der Prognostizierbarkeit von Lasten an einer gegebenen Schnittstelle aufbauend auf Lastbeschreibungen an vorgelagerten Schnittstellen ist ebenso die Rekonstruierbarkeit der ursprünglichen Lasteigenschaften von Interesse, wie sie vor der Durchführung gegebener Lasttransformationen vorlagen. In der vorliegenden Arbeit wird diese Fragestellung zunächst als inverses Problem der Lasttransformation formalisiert – der *inversen Lasttransformation*. Diesbezüglich werden zunächst Algorithmen zur Rekonstruktion von Auftragslängen vorgeschlagen. Es werden Aufträge betrachtet, welche durch kommunizierende Anwendungsinstanzen an das unterliegende Netz übergeben wurden [HMB⁺10].

Darüber hinaus werden inverse Transformationen im Kontext diskreter Warteschlangensysteme untersucht. Hierbei ist die Zielstellung, ausgehend von der Kenntnis des Abgangsstroms auf Charakteristika eines unbekanntes Ankunftsstromes zu schließen. Diesbezüglich erfolgt der Einsatz von Tobit-Regressionsmodellen [Ame84]; diese Modelle sind insbesondere in den Sozial- und Wirtschaftswissenschaften populär. Ein Einsatz im Kontext der Rechnernetze ist dem Autor nicht bekannt. Mit Hilfe der vorgeschlagenen Methoden ist es möglich, Rückschlüsse auf Charakteristika des Ankunftsprozesses zu ziehen, die bisher nicht rekonstruierbar waren. Die erzielten Ergebnisse ermöglichen die Parametrisierung von Algorithmen zur Leistungsbewertung oder zur Lastprognose und können so zur Optimierung des Systemverhaltens genutzt werden [HW11].

2 Lasttransformation

Innerhalb von Netzen von Bedienstationen ist die Last, wie sie an einer einzelnen Station anliegt, im Allgemeinen von der Dienstleistung anderer Stationen abhängig. Dies gilt im Besonderen für gegenwärtige Rechnernetze, welche in Schichten und verteilten Einzelsystemen organisiert sind. Jede Station beeinflusst hier die Last der jeweilig nachfolgenden Station, wie in Abbildung 1 beispielhaft dargestellt. Die so hervorgerufene Veränderung der Lastcharakteristiken wird im Folgenden als *Lasttransformation* von Primär- zu Sekundärlast bezeichnet. In der vorgenannten Abbildung modellieren diese Transformationen beispielsweise Fragmentierung und Headergenerierung in einer *IP*-Protokollinstanz oder Paketverluste bei der drahtlosen Übertragung.

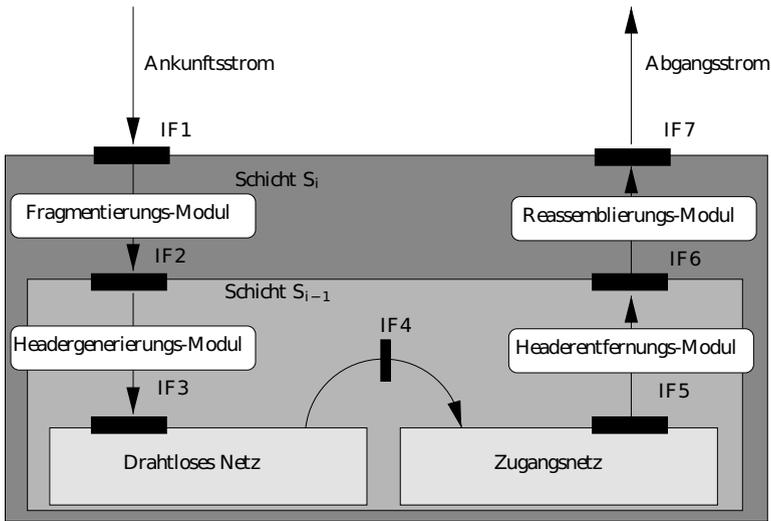


Abbildung 1: Übertragung eines Paketes als Ablauf von Transformationen; IF1,...,IF7 bezeichnen die Schnittstellen (*interfaces*)

Um diese Transformationen formal beschreiben zu können, wird Last, wie in Definition 1 [Wol99] dargestellt, definiert.

Definition 1 Die Last $L = L(E, S, IF, T)$ wird definiert als eine Sequenz von Aufträgen, die während des Beobachtungsintervalls T an das Bediensystem S durch seine Umgebung E übergeben werden. Die Aufträge werden über die Schnittstelle IF übergeben, welche das Bediensystem von seiner Umgebung trennt. \diamond

Die Last kann somit durch eine Sequenz von Aufträgen a_i , die während des betrachteten Zeitintervalls T eintreffen, beschrieben werden. Für wohldefinierte Lasten sei der Ankunftsprozess definiert als Tupel aus Ankunftszeitpunkten t_i und den Aufträgen a_i , wobei

\mathcal{A} die Wertemenge der Aufträge sei.

$$\{(a_i, t_i) | a_i \in \mathcal{A}, t_1 \leq t_2 \leq \dots \leq t_N, t_{1,\dots,N} \in T\} \quad (1)$$

Einzelne Aufträge a_i können hierbei beispielsweise Datenübertragungs- oder Verbindungsaufbauwünsche repräsentieren. Das vorgestellte Konzept ist weiterhin nicht auf Modellierung von Rechnernetzen beschränkt. Zur Modellierung von Datenbanksystemen könnten beispielsweise Transaktionen als Aufträge modelliert werden, um so zu einer Lastbeschreibung gemäß Definition 1 zu gelangen. Als Lasttransformation bezeichnen wir hierauf aufbauend die Transformation der an ein verarbeitendes System übergebenen Primärlast in die abgehende Sekundärlast, wie sie durch die Verarbeitung erfolgt.

Im Kontext moderner, auf dem *Internet Protocol* basierender Netze lassen sich eine Reihe von verschiedenen Attributtypen identifizieren. Das für die Leistungsbewertung wohl wichtigste Attribut sind die Auftragslängen, weil diese in einer Vielzahl von Systemen unmittelbar den zur Verarbeitung notwendigen Aufwand bestimmen. Die Transformation von Längenattributen vollzieht sich zumeist bei der Verarbeitung von Aufträgen der nächsthöheren Schicht. Beispiele hierfür sind das Hinzufügen von Headerdaten, sowie die Fragmentierung, Segmentierung und die Kompression von zu versendenden Nutzdaten. Welche Attribute bei der Lastspezifikation zu berücksichtigen sind, hängt vom zu modellierenden Szenario ab. In der hier zusammengefassten Arbeit erfolgt aus vorgenannten Gründen eine Beschränkung auf das Längenattribut.

Von großer Wichtigkeit ist darüber hinaus das zeitliche Verhalten. Obwohl es prinzipiell möglich wäre, auch diese Eigenschaft direkt als Auftragsattribut zu repräsentieren, nimmt das zeitliche Verhalten in der gegebenen Lastdefinition ausdrücklich eine Sonderstellung ein. Dies spiegelt einerseits die Notwendigkeit wider, den Auftragsstrom als zeitbehafteten Vorgang zu betrachten. Andererseits ist eine Trennung zwischen Attributen und zeitlichem Verhalten nützlich, um zu einer klaren Unterscheidung von Transformation der Auftragsattribute und des zeitlichen Verhaltens zu gelangen.

Die Eigenschaften der Sekundärlast lassen sich oftmals nicht direkt beobachten. In solchen Fällen kann im Rahmen eines modellbasierten Ansatzes der Einfluss des Systems auf die induzierte Primärlast durch ein Transformationsmodell erfasst werden. Die hieraus resultierende modellbasierte Transformation ermöglicht die Abbildung der für die jeweilige Untersuchung relevanten Primärlasteigenschaften auf die korrespondierenden Sekundärlasteigenschaften. Unter der Voraussetzung hinreichender Validität kann das so gewonnene Sekundärlastmodell zur Lastprognose eingesetzt werden. Die beschriebenen Zusammenhänge sind in Abbildung 2 illustriert.

In Abbildung 1 war bereits zu erkennen, dass oftmals mehrere Transformationsvorgänge sequentiell auf die initiale Primärlast wirken. Die Modellierung solcher Sequenzen ist mit Hilfe des Konzeptes modellbasierter Lasttransformationen auch aufgrund der klaren Trennung zwischen verarbeitendem System und der Umgebung gut handhabbar: Die zunächst isoliert betrachteten elementaren Transformationsschritte werden verknüpft, indem die jeweils prognostizierte Sekundärlast als Primärlast des nachfolgenden Systems aufgefasst wird.

Komplexe Transformationen können somit als Hintereinanderausführung mehrerer ele-

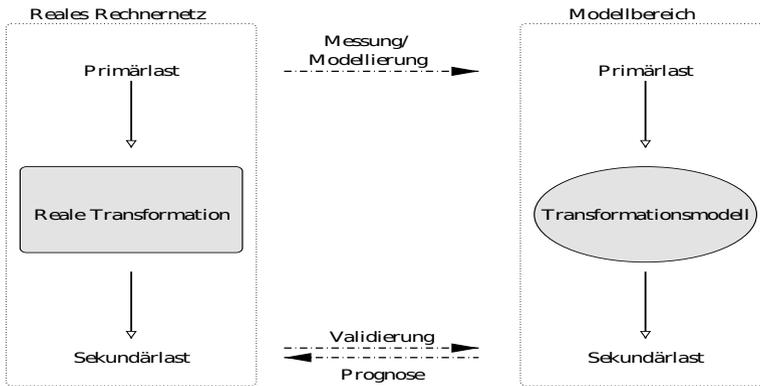


Abbildung 2: Lasttransformationen in realen Rechnernetzen und im Modellbereich

mentarer, modellbasierter Transformationen aufgefasst werden, welche zumeist einfacher zu charakterisieren sind. Dieses modulare Vorgehen ermöglicht es, Systeme zu modellieren, die ansonsten nicht oder nur sehr schwer charakterisierbar sind. Des Weiteren können durch dieses Vorgehen viele Transformationsmodelle wiederverwendet werden, weil bestimmte Mechanismen – wie Fragmentierung oder Headergenerierung – in einer Vielzahl von Systemen eingesetzt werden.

3 Lasttransformation auf BMAPs

Obwohl es natürlich möglich ist, Lasttransformationen in direkter, algorithmischer Art und Weise – d.h. durch direkte Transformation einer Folge von Primärlastaufträgen insbesondere mittels Simulation – vorzunehmen, birgt diese Herangehensweise einige Nachteile:

- Die Sekundärlastbeschreibung, die durch die Transformation konkreter Auftragssequenzen gewonnen wird, ist im Allgemeinen nicht der analytischen Behandlung zugänglich. Dies gilt insbesondere auch für warteschlangentheoretische Methoden (vgl. z. B. [DKL09, ST10]), was die Berechnung von Leistungskennwerten erschwert.
- Auch wenn für die Primärlast ein stochastisches Modell vorliegt, muss die Beschreibung des Sekundärlastmodells deterministisch sein. Dies folgt aus der Tatsache, dass simulative Transformationsmethoden nur auf konkrete Ankunftssequenzen – also auf Realisierungen der unterliegenden Prozessbeschreibung – angewendet werden können. Dies reduziert die Allgemeingültigkeit der Lastbeschreibung.

Aus den vorgenannten Gründen werden in der Dissertation Lasttransformationen vorgeschlagen, welche direkt auf die jeweiligen Prozessbeschreibungen angewendet werden können und so die analytische Handhabbarkeit und die Allgemeingültigkeit erhalten. Da aber gleichzeitig eine breite Anwendbarkeit der Modelle wünschenswert ist, gilt es, zu starke Beschränkungen durch die zu wählende Modellklasse zu vermeiden. Diese beiden

Ziele werden durch die verwendeten *Batch Markovian Arrival Processes* (BMAP) erreicht (vgl. [Luc93]). Diese gestatten die realitätsnahe Beschreibung der Last gemäß einer Vielzahl von Anwendungstypen und sind gleichzeitig analytisch handhabbar.

Die entwickelten Lasttransformationen lassen sich als Abbildungen auf *BMAPs* verstehen

$$T_{BMAP} : BMAP^p \rightarrow BMAP^s. \quad (2)$$

In der hier zusammengefassten Dissertation werden Lasttransformationen in realen Systemen als Abbildungen auf *Batch Markovian Arrival Processes* (BMAPs) modelliert. Neben der Charakterisierung des zeitlichen Verhaltens erlauben BMAPs als zweidimensionale Beschreibungstechnik die Modellierung eines Auftragsattributes unter Verwendung der Batch-Größe. Prinzipiell ist es möglich, beliebige Attribute mit abzählbarer Wertemenge zu erfassen. Aufgrund der herausragenden Wichtigkeit der Auftragslänge gilt jedoch die Aufmerksamkeit diesem Attribut. Wird der Verarbeitungsaufwand durch abweichende Auftragscharakteristika bestimmt, kann die Batch-Größe alternativ als Indikator für die Komplexität des Auftrages verwendet werden. In beiden Fällen wird somit sowohl das zeitliche Verhalten als auch der für die einzelnen Aufträge notwendige Arbeitsaufwand erfasst, so dass davon ausgegangen werden kann, dass die Sekundärlast für die Leistungsbewertung nachfolgender verarbeitender Systeme hinreichend genau charakterisiert wird.

Es ergibt sich so das in Abbildung 3 dargestellte Procedere: Die durch eine der genannten Prozessbeschreibungen modellierte Primärlast wird als BMAP repräsentiert und kann dann mit Hilfe der modellbasierten Lasttransformation so modifiziert werden, dass die aus der gegebenen Lasttransformation resultierende Sekundärlast als BMAP-Modell gegeben ist. Zur Modellierung der Primärlast als BMAP existieren in der Literatur eine Vielzahl von Ansätzen (vgl. z. B. [KLL03, ODT09, CZS10]). Des Weiteren beinhaltet die Klasse der *BMAPs* viele Prozessklassen, welche zur Modellierung von Lasten in Rechnernetzen verwendet werden (wie z. B. Markov-Modulierte Poisson-Prozesse oder Phase-Type-Verteilungen, vgl. oberen Teil von Abbildung 3).

Im Rahmen der Dissertation werden Transformationsalgorithmen vorgestellt, welche es erlauben, eine Reihe der wichtigsten Transformationsvorgänge in heutigen Rechnernetzen zu modellieren. Die Realitätsnähe wird durch Experimente in einem realen Netz demonstriert: Während der Übertragung eines MPEG-Videostroms wurde an mehreren Schnittstellen des Übertragungsweges die auftretende Last aufgezeichnet und deren Eigenschaften mit den Eigenschaften der mittels Transformationsalgorithmen erzeugten Sekundärlastmodelle verglichen. Es konnte durchweg ein hoher Grad an Übereinstimmung erzielt werden. Dies gilt auch für Szenarien, in denen Ratenkontrollmechanismen eingesetzt wurden.

4 Inverse Lasttransformation

Die bisherigen Betrachtungen galten dem Einfluss von Verarbeitungsmechanismen in Rechnernetzen auf die abgehende Sekundärlast. In vielen Fällen kann jedoch nur der bereits transformierte Verkehr beobachtet werden. Hier stellt sich oftmals eher die Frage, ob und wie sich die Eigenschaften der untransformierten Primärlast rekonstruieren lassen. Un-

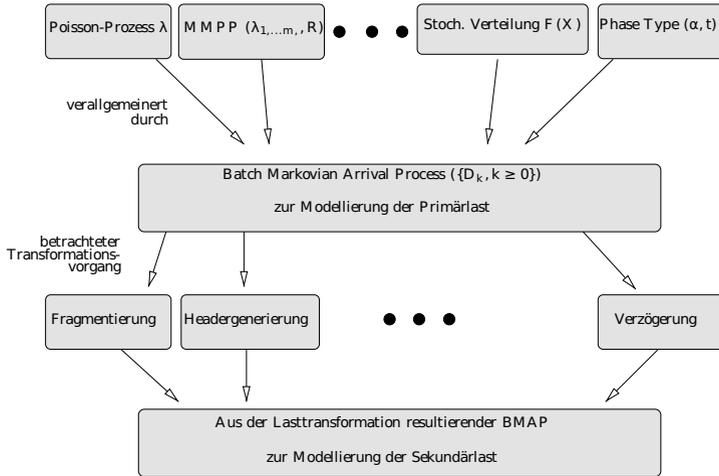


Abbildung 3: Schematische Darstellung der modellbasierten Lasttransformation auf BMAPs und den enthaltenen Prozessklassen

ter Nutzung der in dieser Arbeit verwendeten Begrifflichkeiten lässt sich dies als inverse Problemstellung zur Lasttransformation sehen. Wir bezeichnen dies daher als *inverse Lasttransformation von Sekundär- zu Primärlast*.

Wie bei allen inversen Problemstellungen stellt sich bei der inversen Lasttransformation aber auch die Frage der Durchführbarkeit. Im Gegensatz zur regulären Lasttransformation, deren Machbarkeit aufgrund ihres Einsatzes im realen Netz evident ist, kann diese hier nicht vorausgesetzt werden.

Es wird zunächst aufgezeigt, dass sich in modernen Rechnernetzen eine Vielzahl von inversen Lasttransformationen identifizieren lassen. Zunächst werden diese danach unterschieden, ob sie die Auftragsattribute selbst oder das zeitliche Verhalten der Aufträge der Sekundärlast betreffen. Bezüglich der Auftragsattribute lassen sich die inversen Transformationen weiter nach betroffenem Attributtyp (z. B. Adress- oder Längenattribut) unterscheiden.

Die Länge der Aufträge, welche durch kommunizierende Anwendungsinstanzen an das unterliegende Kommunikationsnetz übergeben werden, ist zumeist nicht mehr direkt beobachtbar. Vielfach gilt diesem Attribut jedoch das eigentliche Interesse, z. B. im Kontext von Applikationsklassifikation oder der Modellierung des Nutzerverhaltens. Diese Rekonstruktion stellt insbesondere bei Verwendung von TCP – dem meist verwendeten Transportprotokoll – ein schwieriges Problem dar. Im Rahmen der Dissertation wurden Rekonstruktionsalgorithmen vorgeschlagen, welche sich Eigenschaften des TCP-Protokolls zu Nutze machen. Die Algorithmen nutzen hierbei Flags im Header der TCP-Pakete bzw. die Länge einzelner TCP-Segmente. Unter Verwendung realer Messdaten konnte demonstriert werden, dass für viele Applikationstypen eine Rekonstruktion der Auftragslängen mit guter Genauigkeit möglich ist.

Darüber hinaus werden Methoden zur Rekonstruktion von Ankunftsprozessen diskreter

Wartesysteme vorgeschlagen. In den betrachteten Systemen treffen pro Betrachtungsintervall eine variable Zahl von Aufträgen ein; die Anzahl der pro Intervall bedienbaren Aufträge wird als konstant angenommen. Durch Anwendung von aus der Literatur bekannten Regressionsmodellen – insbesondere dem Tobit-Modell [Ame84] – können auch für nicht unabhängig verteilte Ankunftsanzahlen weitgehende Aussagen über den Ankunftsprozess getroffen werden – ohne dass dieser beobachtet wird.

Zur Rekonstruktion ist lediglich die Kenntnis der Anzahl der Aufträge notwendig, die pro Intervall das System verlassen. Hierauf aufbauend werden Zeitpunkte identifiziert, an denen das Bediensystem leer ist. Für das folgende Intervall ist es nun möglich festzustellen, ob die Anzahl von Abgängen denen der Ankünfte des letzten Intervalls entspricht oder ob das System im entsprechenden Intervall vollständig ausgelastet ist. Die Anzahl der Abgänge in solchen Intervallen bildet die Basis für die Anwendung der vorgenannten Regressionsmodelle. Die vorgeschlagenen Methoden können zur Charakterisierung von Lasten in entfernten Netzknoten verwendet werden (z. B. im Kontext von Polling-Mechanismen) und sind auch im Falle von Tandemnetzen – also einer Sequenz von mehreren Bedienstationen – einsetzbar.

5 Fazit

Durch die im vorliegenden Beitrag zusammengefasste Dissertation konnten signifikante Fortschritte in den Forschungsgebieten Lastmodellierung und Lasttransformation erzielt werden. Mit Hilfe der entwickelten Lasttransformationen auf markovschen Ankunftsprozessen ist es möglich, den Einfluss von Verarbeitungsmechanismen auf die Lasteigenschaften sowohl in Bezug auf das zeitliche Verhalten als auch im Hinblick auf Auftragslängen zu modellieren. Dies erhöht die Validität der verwendeten Lastmodelle. Des Weiteren wurde das Konzept der inversen Lasttransformation eingeführt – also die Rekonstruktion von Primärlasteigenschaften ausgehend von einer bekannten Sekundärlast. Im Kontext der inversen Lasttransformation wurden Algorithmen entwickelt, welche es ermöglichen, Eigenschaften von nicht-beobachtbaren Lasten zu rekonstruieren. Die zahlreichen durchgeführten Studien zur Validierung der entwickelten (inversen) Lasttransaktionsansätze unterstrichen, dass wir in nahezu sämtlichen betrachteten Szenarien eine erfreulich gute Realitätsnähe unserer Transformationsmodelle verzeichnen können und die Modelle somit auch eine gute Praxisrelevanz besitzen dürften.

Literatur

- [Ame84] T. Amemiya. Tobit models: A survey. *Journal of Econometrics*, 24(1-2):3–61, 1984.
- [CZS10] G. Casale, E.Z. Zhang und E. Smirni. Trace data characterization and fitting for Markov modeling. *Perf. Eval.*, 67(2):61 – 79, 2010.
- [DKL09] A. Dudin, V. Klimenok und M. H. Lee. Recursive formulas for the moments of queue length in the BMAP/G/1 queue. *IEEE Comm. Letters.*, 13(5):351–353, 2009.

- [Hec11] Stephan Heckmüller. *Einsatz von Lasttransformationen und ihren Invertierungen zur realitätsnahen Lastmodellierung in Rechnernetzen*. Dissertation, Univ. Hamburg, 2011.
- [HMB⁺10] S. Heckmüller, G. Münz, L. Braun et al. Lasttransformation durch Rekonstruktion von Auftragslängen anhand von Paketdaten. *Zeitschrift Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation (PIK)*, 11:113–120, 2010.
- [HSW08] S. Heckmüller, M. Spork und B.E. Wolfinger. Load Transformation of Markovian Arrival Processes: Methods and Tool Support. In *SMCTools 2008*, Oct. 2008.
- [HW07a] S. Heckmüller und B. E. Wolfinger. Load Transformations for Markovian Arrival Processes. In *Proceedings of ASMTA 2007*, Seiten 35–43, June 2007.
- [HW07b] S. Heckmüller und B.E. Wolfinger. Modellierung verlustinduzierender Lasttransformationen für markovsche Ankunftsprozesse. In *MMBnet 2007 Workshop*, Seiten 36–49, 2007.
- [HW08] S. Heckmüller und B. E. Wolfinger. Analytical Modeling of Token Bucket Based Load Transformations. In *Proceedings of SPECTS 2008*, Seiten 15–23, June 2008.
- [HW09] S. Heckmüller und B. E. Wolfinger. Using Load Transformations for the Specification of Arrival Processes in Simulation and Analysis. *Simulation*, 85(8):485–496, 2009.
- [HW10] S. Heckmüller und B. E. Wolfinger. Analytical Load Transformations of Video Streams: Validation Using Measured Traffic. In *Proceedings of SPECTS 2010*, Seiten 202–209, July 2010.
- [HW11] S. Heckmüller und B. E. Wolfinger. Reconstructing arrival processes to discrete queuing systems by inverse load transformation. *Simulation*, 87(12):1033–1047, 2011.
- [KLL03] A. Klemm, C. Lindemann und M. Lohmann. Modeling IP traffic using the batch Markovian arrival process. *Perform. Eval.*, 54(2):149–173, 2003.
- [Luc93] D. M. Lucantoni. The BMAP/G/1 queue: a tutorial. In L. Donatiello und R. Nelson, Hrsg., *Models and Techniques for Performance Evaluation of Computer and Communication Systems*, Seiten 330–358. Springer-Verlag, New York, 1993.
- [ODT09] H. Okamura, T. Dohi und K. S. Trivedi. Markovian Arrival Process Parameter Estimation With Group Data. *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 17(4):1326–1339, 2009.
- [ST10] Z. Saffer und M. Telek. Unified analysis of BMAP/G/1 cyclic polling models. *Queueing Syst. Theory Appl.*, 64(1):69–102, 2010.
- [Wol99] B. E. Wolfinger. Characterization of Mixed Traffic Load in Service-Integrated Networks. *Systems Science Journal*, 25(2):65–86, 1999.



Stephan Heckmüller wurde 1979 in Homberg/Efze geboren. Er studierte Informatik an der Universität Hamburg und schloss das Diplomstudium im Jahr 2006 ab. Seine Diplomarbeit “Bereitstellung von Dienstgüte für aggregierte Multimedia-Ströme in lokalen Broadcast-Netzen” wurde durch die GI/ITG-Fachgruppe “Kommunikation und Verteilte Systeme” ausgezeichnet. Er war von 2006 bis 2011 als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Hamburg tätig. Die Promotion erfolgte im Jahr 2011. Seit 2011 ist Herr Heckmüller als Software-Architekt im Bereich der Intralogistik tätig.