

# A System-oriented Approach to Efficiency and Quality of Service for Internet Service Providers\*

Dr.-Ing. Oliver Heckmann

TU Darmstadt  
Merckstr. 25, 64283 Darmstadt  
Telefon: 06151-16-5188  
mail@oheckmann.de

**Abstract:** Diese Dissertation untersucht, wie man die Effizienz und Dienstgüte eines IP Netzwerkes aus der Sicht eines Internet Netzwerkbetreibers optimieren kann und sollte. Da die Gesamteffizienz und -dienstgüte von verschiedenen Aspekten des Betriebs eines Netzwerkes abhängt, wird ein systemorientierter Ansatz in der Dissertation entwickelt und verwendet, d.h. es werden verschiedene Aspekte des Betriebs eines Netzwerkes und ihre gegenseitigen Beeinflussungen untersucht. Die untersuchten Aspekte untergliedern sich in drei Bereiche: die Netzwerkarchitektur, die Interkonnektion (Anbindung an andere Netzwerke) und den Bereich der Verkehrs- und Netzwerkanpassungsmaßnahmen (*traffic and network engineering*).

## 1 Ziel und Ansatz

Das Internet besteht aus über 30000 autonomen Systemen (AS), wobei jedes autonome System wiederum aus einer Menge von IP Netzwerken besteht, die einer gemeinsamen Routing Strategie unterliegen [IAN04]. Diese Netzwerke werden von tausenden von *Internet Netzwerkbetreibern* ("Internet Service Provider", ISP) betrieben. Internet Netzwerkbetreiber bieten Dienste an, die im Kern in dem Weiterleiten von IP Paketen bestehen.

Wegen der hohen Konkurrenz dieser Netzwerkbetreiber untereinander und der fehlenden Marktregulierung ist es für einen Netzwerkbetreiber überlebenswichtig, sein Netzwerk *effizient* zu betreiben. Effizienz ist in der Dissertation definiert als das Verhältnis zwischen dem transportierten Verkehr und den dafür anfallenden Kosten. Die anfallenden Kosten können auch nichtmonetäre Kosten – etwa die Komplexität eines Verfahrens – umfassen.

Neben der Effizienz ist auch eine wohldefinierte *Dienstgüte* ("Quality of Service") wichtig für Internet Netzwerkbetreiber, weil viele der momentan starke Verbreitung findenden Multimediaanwendungen wie Sprach- und Videokommunikationsdienste hohe Anforderungen an die Dienstgüte des Netzwerkes stellen. Dienstgüte ist das wohldefinierte und kontrollierbare Verhalten eines Netzwerkes in Bezug auf quantitativ messbare Parameter wie Verlust, Verzögerung und Jitter [Sch01]. Dienstgüteunterstützung in einem Netzwerk

---

\*Ein systemorientierter Ansatz zu Effizienz und Dienstgüte für Internet Netzwerkbetreiber

ermöglicht eine Dienstdifferenzierung nach Preis und Qualität, sowie das Anbieten von Mehrwertdiensten wie Premium Transportdiensten.

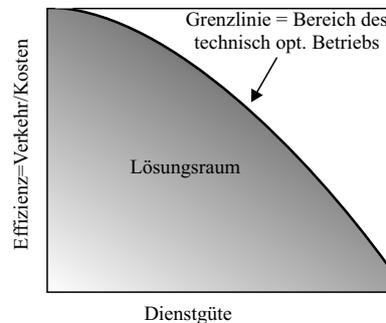


Abbildung 1: Zielkonflikt zwischen Effizienz und Dienstgüte

Effizienz und Dienstgüte sind also zwei sehr wichtige Ziele für einen modernen ISP. Hieraus ergibt sich die dieser Dissertation zugrunde liegende Fragestellung, *wie man die Effizienz und Dienstgüte aus Sicht eines IP Netzwerkbetreibers optimieren kann*. Zwischen beiden Zielen besteht in weiten Teilen ein *Zielkonflikt*, wie er in Abb. 1 verdeutlicht ist. Der Lösungsraum in Abb. 1 stellt die möglichen technischen Lösungen dar, also z.B. die möglichen Netzwerkarchitekturen und Interkonnektionskombinationen. Eine sehr hohe Dienstgüte führt zu hohen Kosten oder nur zu einer geringen Menge an zulässigem Verkehr, daher kann die Effizienz bei sehr hoher Dienstgüte nicht beliebig hoch sein. Das gleiche gilt umgekehrt.

Ein Netzwerkbetreiber sollte sein Netzwerk entlang der Grenzlinie des Lösungsraums betreiben, da sonst Effizienz und/oder Dienstgüte erhöht werden könnten, ohne dass das jeweils andere Ziel leidet (die Punkte unterhalb der Grenzlinie sind nicht Pareto-optimal). In dieser Dissertation wird untersucht und gezeigt, wie man ein Netzwerk entlang der Grenzlinie des Lösungsraums betreibt. Dieser Bereich stellt den Bereich des technisch optimalen Betriebs dar. Hierzu werden in der Dissertation Analysen und Experimente durchgeführt und Optimierungsmodelle aufgestellt, gelöst und evaluiert.

Im Unterschied zu verwandten Arbeiten wird in dieser Dissertation auch keine Annahme darüber getroffen, wo entlang der Grenzlinie ein Netzwerk betrieben werden soll, da dieser Punkt von der Marktposition und dem Geschäftsmodell des Netzwerkbetreibers abhängt. Die Dissertation behandelt damit also ausdrücklich auch den Fall, dass ein Netzwerkbetreiber sein Netzwerk in einem Punkt mit sehr hoher Effizienz (geringe Kosten) aber nur geringer Dienstgüte betreiben will.

Wie diese Arbeit zeigt, hängt die Dienstgüte und Effizienz stark von der Netzwerkarchitektur, den Verkehrs- und Netzwerkanpassungsmaßnahmen ("Traffic Engineering" und "Network Engineering"), sowie der Anbindung an andere Netzwerke ("Interconnections") ab.

Aus diesem Grund entwickelt und verfolgt diese Arbeit einen systemorientierten Ansatz (siehe Abb. 2), mit dem die genannten Bereiche bezüglich Effizienz und Dienstgüte unter-

sucht, optimiert und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt werden. Verwandte Arbeiten (z.B. [Sto00, Sch01, Weh02, Xia00, Men04]) beschäftigen sich zum überwiegenden Teil nur mit einem Ziel (z.B. Dienstgüte) oder einem Teilbereich, ohne die anderen Bereiche einzubeziehen und zu berücksichtigen.

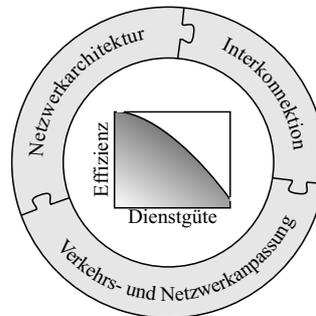


Abbildung 2: Systemorientierter Ansatz

## 2 Netzwerkarchitektur

Im Bereich der Netzwerkarchitekturen liegt der Fokus der Untersuchung auf Methoden zur Dienstgüteebringung und deren Effizienz. Zunächst werden die Methoden analytisch untersucht, dann werden die Ergebnisse experimentell untermauert und vertieft.

Um den Effekt von Dienstdifferenzierung analytisch erfassen zu können, werden in der Dissertation neuartige analytische Modelle hergeleitet. Sie erlauben es, aus einer Mischung von elastischen und unelastischen Verkehrsquellen den Überdimensionierungsfaktor von reinen Best-Effort Netzwerken im Vergleich zu Netzwerken, die eine explizite Dienstdifferenzierung erlauben, zu bestimmen. Mit Hilfe dieser Modelle wird in der Arbeit gezeigt, dass der nötige Überdimensionierungsfaktor eines Best-Effort Netzwerkes höher ist, als bislang in der Literatur angenommen und analytisch begründet wurde. Der Faktor liegt für die meisten realistischen Fälle zwischen drei und fünf, bislang ging man von einem weitaus geringeren Faktor aus.

In einer umfangreichen experimentellen Untersuchung werden dann die verschiedenen Aspekte der Dienstgütearchitekturen der IETF (Intserv [BCS94], Diffserv [BBC<sup>+</sup>98] neben Best-Effort) genauer verglichen. Die Studie gibt genauen Aufschluss über die Zusammenhänge und Zielkonflikte der verschiedenen Aspekte wie beispielsweise "per-flow" gegenüber "per-class" Scheduling oder zentrale gegenüber dezentrale Zugangskontrolle. Eine Erkenntnis aus den Experimenten sind die sehr guten Ergebnisse, die sich bereits mit sehr einfachen und gut skalierbaren Dienstgütearchitekturen erzielen lassen. Dies ist ein wichtiges Ergebnis für ISPs, die Standardisierungsgremien und die Wissenschaft, die sich bislang zum überwiegenden Teil auf die komplexeren Architekturen konzentrierten.

In Zusammenhang mit den Experimenten wird auch ein Bandbreitenbroker für *Diffserv* Netzwerke entwickelt, der starke Intserv ähnliche Dienstgütegarantien in einem rein klassenbasierten (und damit besser skalierbaren) Netzwerk geben kann. Gleichzeitig ermöglicht er über ein Überbuchungssystem weitere Effizienzsteigerungen. Diffserv wird häufig – basierend auf dem sog. Charny-Bound – mangelnde Effizienz für Premium-Dienste vorgeworfen. Mit dem Bandbreitenbroker gelingt es, den Charny-Bound zu durchbrechen und die Auslastung eines Diffserv Netzes mit einem Dienst der höchsten Qualität von beispielsweise unter 8% wie vom Charny-Bound vorhergesagt auf über 27% zu steigern.

### 3 Interkonnektion

Neben der Netzwerkarchitektur wird die Effizienz und Dienstgüte eines Netzwerkes auch von der Interkonnektion beeinflusst – also durch die Art und den Umfang der Anbindung an andere Netzwerke.

In dieser Dissertation werden mehrere Ansätze zur Optimierung der Effizienz, Zuverlässigkeit und Dienstgüte der Interkonnektion aufgestellt und evaluiert. Das der Interkonnektion zugrunde liegende Entscheidungsproblem eines Netzwerkbetreibers wird in der Dissertation erstmalig explizit formuliert und mit exakten Methoden gelöst. Um die Realitätsnähe und Relevanz zu garantieren wurde mit mehreren Netzwerkbetreibern und den Betreibern der beiden größten europäischen Internet-Knotenaustauschpunkte kooperiert (LINX und DE-CIX).

Es werden eine Vielzahl von Strategien abgeleitet und untersucht, mit denen eine deutliche Kostenersparnis (Effizienzverbesserung) und Dienstgüteverbesserung erzielen lässt. So lassen sich beispielsweise die Interkonnektions-Kosten – typischerweise der größte Kostenfaktor eines Netzwerkbetreibers – mit den Verfahren um 5% bis über 30% senken.

Im Anhang der Arbeit wird die Betrachtung auf generelle Systemübergänge verallgemeinert und ein mathematisches Rahmenwerk zur Behandlung dieser Sorte von Optimierungsproblemen entwickelt. Es trägt den Namen MPRASE (*Multi-Period Resource Allocation at System Edges*). Es wird gezeigt, dass z.B. das Problem der Optimierung der Auswahl der zugelassenen Datenströme bei der Zugangskontrolle auch in dieses Rahmenwerk fällt – eine schöne Bestätigung für die Anwendung des systemorientierten Ansatzes.

### 4 Verkehrs- und Netzwerkanpassung

Die Rahmenbedingungen von und Anforderungen an Netzwerke ändern sich häufig; Netzwerke können daher nicht einfach statisch betrieben werden. Daher werden im dritten Teil der Dissertation die Anpassungsmaßnahmen der Netzwerkbetreiber betrachtet. Diese unterteilen sich

- in Verkehrsanpassungsmaßnahmen (*traffic engineering*), mit denen kurz- und mit-

telfristig auf sich ändernden Verkehr reagiert wird (z.B. mit Anpassen des Routings),

- und in Netzwerkanpassungsmaßnahmen (*network engineering*), mit denen langfristig die Kapazität und ggf. Struktur des Netzwerks angepasst wird (z.B. Kapazitätserweiterung von Leitungen und Routern).

Schwächen existierender Ansätze zu Verkehrsanpassungsmaßnahmen werden aufgezeigt und behoben. Insbesondere wird gezeigt, dass eine Optimierung auf Grundlage der maximalen Auslastung – wie in verwandten Arbeiten häufig vorgeschlagen – nicht sinnvoll ist. Eine bessere Vorgehensweise wird aus den Erkenntnissen im ersten Teil der Arbeit (Netzwerkarchitektur) hergeleitet. Generell ergibt sich jedoch, dass für viele Topologien und Verkehrsverteilungen die mit *Verkehrsanpassungsmaßnahmen* erzielbaren Gewinne eher gering sind.

Wegen des ständig wachsenden Verkehrsvolumens sind Kapazitätserweiterungen die wichtigste *Netzwerkanpassungsmaßnahme* eines Netzwerkbetreibers. Daher werden in dieser Arbeit Kapazitätserweiterungsstrategien entworfen und evaluiert, die auch den Einfluss der verschiedenen Netzwerkarchitekturen und die Verkehrsanpassungsmaßnahmen des Betreibers berücksichtigen. Die entwickelten Verfahren sind den heutigen Verfahren sowohl im Hinblick auf Effizienz und Dienstgüte als auch in Bezug auf die Robustheit weit überlegen.

## 5 Zusammenfassung

In der Dissertation "*A System-oriented Approach to Efficiency and Quality of Service for Internet Service Providers*" von Oliver Heckmann werden neue Modelle und Methoden entworfen sowie existierende Modelle und Methoden evaluiert, mit denen sich die Effizienz und Dienstgüte eines IP Netzwerkes optimieren lässt. Der Aufbau und Betrieb eines Netzwerkes wird aus Systemsicht betrachtet in drei technische Bereiche unterteilt: die Netzwerkarchitektur, die Interkonnektion und die Verkehrs- und Netzwerkanpassungsmaßnahmen. Die Arbeit zeigt, dass alle drei Bereiche einen großen Einfluss auf die Effizienz und Dienstgüte haben, wie in den Bereichen Effizienz und Dienstgüte verbessert werden können und wie die Bereiche aufeinander abgestimmt werden können.

Die englischsprachige Dissertation ist online publiziert und unter <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000522/> verfügbar.

## Literatur

- [BBC<sup>+</sup>98] D. Black, S. Blake, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang und W. Weiss. An Architecture for Differentiated Services. RFC 2475, Dezember 1998.
- [BCS94] R. Braden, D. Clark und S. Shenker. Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview. RFC 1633, Juni 1994.

- [IAN04] IANA (Internet Assigned Numbers Authority). Autonomous System Numbers. <http://www.iana.org/assignments/as-numbers>, Juni 2004.
- [Men04] Michael Menth. *Admission Control and Resilience for Next Generation Networks*. Dissertation, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Mai 2004.
- [Sch01] Jens Schmitt. *Heterogeneous Network Quality of Service Systems*. Kluwer Academic Publishers, Juni 2001. ISBN: 07937410X.
- [Sto00] Ion Stoica. *Stateless Core: A Scalable Approach for Quality of Service in the Internet*. Dissertation, Carnegie Mellon University, Department of Electrical and Computer Engineering, Dezember 2000.
- [Weh02] Klaus Wehrle. *Flexible und skalierbare Dienstgütemechanismen für das Internet der nächsten Generation (Flexible and Scalable Quality of Service Mechanisms for the Next Generation Internet) [in German]*. Dissertation, Universität Karlsruhe, Juli 2002. Shaker, ISBN: 3832204911.
- [Xia00] Xipeng Xiao. *Providing QoS in the Internet*. Dissertation, Michigan State University, Department of Computer Science and Engineering, August 2000.



**Oliver Heckmann** hat von 1994 bis 2000 an der Technischen Universität Darmstadt Wirtschaftsingenieurwesen mit Fachrichtung Elektro- und Informationstechnik studiert. Während seines Studiums war er Stipendiat der Studienstiftung des Deutschen Volkes und Stipendiat des Siemens Internationaler Studentenkreis. Von 2000 bis 2004 hat er als Doktorand am Fachgebiet für Multimediakommunikation gearbeitet. 2003 war er ein "Visiting Scholar" an der Universität Cambridge. Seine Dissertation "A System-oriented Approach to Efficiency and Quality of Service for Internet Service Providers" hat er 2004 am Fachbereich Informatik der TU Darmstadt mit Auszeichnung beendet.

Sein Doktorvater ist Prof. Steinmetz (TU Darmstadt), sein Zweitgutachter Prof. Crowcroft (University Cambridge/UK).

Seit 2005 arbeitet Herr Heckmann als Postdoktorand an der TU Darmstadt und leitet die Forschungsgruppen Peer-to-Peer und IT Architekturen am Fachgebiet Multimediakommunikation. Herr Heckmann ist Mitglied zweier Prüfungskommissionen an der TU Darmstadt und in der Lehre engagiert. Er hat an zahlreichen nationalen und internationalen Forschungsprojekten mitgearbeitet, unter anderem war er der technische Manager des DFN Projektes LETSQoS.