

[H06]

Oliver Heckmann; **Efficiency and Quality of Service of IP Networks**; it - Information Technology Journal, 3(06), June 2006, S. 177-180.

Effizienz und Dienstgüte von IP Netzwerken

Efficiency and Quality of Service of IP Networks

Oliver Heckmann, Technische Universität Darmstadt, GI-Dissertationspreis 2004

Zusammenfassung Effizienz und Dienstgüte sind zwei sehr wichtige Eigenschaften von IP Netzwerken. Aus der Sicht eines Internet Netzwerkbetreibers (engl.: Internet Service Provider, ISP) untersuchen wir in dieser Arbeit, wie man die Effizienz und Dienstgüte verbessern kann. Hierzu betrachten wir die Netzwerkarchitektur, die Interkonnektion und die Verkehrs- und Netzwerkanpassungsmaßnahmen (engl.: network & traf-

fic engineering). ▶▶▶ **Summary** Efficiency and quality of service are two vital properties for IP Networks. From the perspective of an Internet Service Provider (ISP), we analyse in this work how to improve the efficiency and quality of service of an IP network in the areas of the network architecture, the interconnections, and network/traffic engineering measures.

KEYWORDS C.2.6 [Internetworking], C.2.1 [Network Architecture and Design], C.2.2 [Network Protocols], C.2.3 [Network Operations], C.4 [Performance of Systems], C.2.4 [Distributed Systems]

1 Einleitung

Das Internet besteht aus über 30.000 miteinander verbundenen IP (Internet Protocol) Netzwerken. Diese Netzwerke werden von Tausenden von *Internet Netzwerkbetreibern* („Internet Service Provider“, ISP) betrieben. Internet Netzwerkbetreiber bieten Dienste an, die im Wesentlichen in dem Weiterleiten von IP Paketen bestehen. Zwischen den Netzwerkbetreibern herrscht eine starke Konkurrenz und ein großer Kostendruck, was sich unter anderem durch regelmäßige Konkursfälle bemerkbar macht (beispielsweise Worldcom oder KPNQwest).

Die Dissertation von Herrn Dr. Oliver Heckmann wurde mit dem GI-Dissertationspreis 2004 ausgezeichnet. Das Promotionsverfahren wurde an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Die Gutachter des Promotionsverfahrens waren Prof. Ralf Steinmetz (TU Darmstadt) und Prof. Jon Crowcroft (University Cambridge). Die englischsprachige Dissertation ist online publiziert und unter <http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000522/> verfügbar.

Wegen der hohen Konkurrenz und der fehlenden Marktregulierung ist es für einen Netzwerkbetreiber überlebenswichtig, sein Netzwerk *effizient* zu betreiben. Effizienz lässt sich in diesem Zusammenhang als das Verhältnis zwischen dem transportierten Verkehr und den dafür anfallenden Kosten ausdrücken. Die Menge des transportierten Verkehrs kann man je nach betrachtetem Problem z.B. in Form des Verkehrsvolumens oder der Anzahl von Endnutzern bzw. Kunden messen. Die anfallenden Kosten können hierbei durchaus auch nichtmonetäre Kosten – etwa die algorithmische Komplexität eines Verfahrens – umfassen.

In letzter Zeit finden zunehmend Multimediaanwendungen wie IP Telefonie (z.B. via dem Session Initiation Protocol SIP oder Skype), Netzwerkspiele oder „Video on Demand“ Akzeptanz und Verbreitung bei den Endnutzern. Diese Multimediaanwendungen haben ein

anderes Verkehrsverhalten als der bislang vorherrschende elastischere Datenverkehr, wie ihn das World Wide Web (WWW) oder Peer-to-Peer Dateitauschbörsen erzeugen. Außerdem stellen diese Anwendungen andersartige und im Allgemeinen strengere Anforderungen an die Dienstgüte der Netzwerke. Dienstgüte ist das wohldefinierte und kontrollierbare Verhalten eines Netzwerks in Bezug auf quantitativ messbare Parameter wie Verlust, Verzögerung und Jitter. Daher ist neben der Effizienz auch eine wohldefinierte *Dienstgüte* („Quality of Service“) wichtig für Internet Netzwerkbetreiber. Explizite Dienstgüteunterstützung in einem Netzwerk ermöglicht ferner eine Dienst differenzierung nach Preis und Qualität, sowie das Anbieten von Mehrwertdiensten wie Premium Transportdiensten.

Effizienz und Dienstgüte sind also die beiden herausragenden Ziele eines modernen Internet Netz-

werkbetreibers. Hieraus ergibt sich die dieser Arbeit zugrunde liegende Fragestellung, wie man die Effizienz und Dienstgüte aus Sicht eines Internet Netzwerkbetreibers optimieren kann.

Leider besteht zwischen Effizienz und Dienstgüte häufig ein Zielkonflikt. Dieser ist abstrakt in Bild 1 visualisiert. Der Lösungsraum in Bild 1 stellt die möglichen technischen Lösungen dar, also z. B. die verfügbaren Netzwerkarchitekturen oder die denkbaren Interkonnektionskombinationen, zwischen denen ein Internet Netzwerkbetreiber auswählen kann. 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.

Nun stellt sich die Frage, an welchem Punkt des Lösungsraums in Bild 1 ein Netzwerkbetreiber sein Netzwerk betreiben sollte. Zunächst ist festzuhalten, dass ein Netzwerk immer in einem Punkt auf der Grenzlinie des Lösungsraums betrieben werden sollte, da die anderen Lösungen nicht Pareto-optimal sind. Das bedeutet, ausgehend von einem anderen Punkt ließe sich die Effizienz oder die Dienstgüte verbessern, ohne dass das jeweils andere Ziel leidet. In der hier beschriebenen Dissertation wird umfassend untersucht und gezeigt, wie man ein Netzwerk entlang der Grenzlinie des Lösungsraums betreibt. Die-

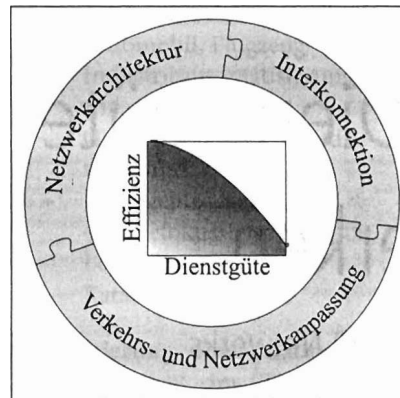


Bild 2 Systemorientierter Ansatz.

ser Bereich stellt den Bereich des technisch optimalen Betriebs dar. Hierzu werden in der Dissertation Analysen und Experimente durchgeführt und Optimierungsmodelle aufgestellt, gelöst und evaluiert.

Es bleibt die Frage offen, in welchem Punkt entlang dieser Grenzlinie ein einzelner Netzwerkbetreiber sein Netzwerk betreiben sollte. Sollte er beispielsweise eher niedrige Dienstgüte aber sehr hohe Effizienz (und damit geringe Preise) wählen, das andere Extrem oder einen Punkt in der Mitte? Diese Entscheidung ist nicht technischer Art, sondern hängt von der Marktposition und dem Geschäftsmodell des Netzwerkbetreibers ab. In verwandten Arbeiten wird (häufig implizit) ein bestimmter Punkt als Ziel angenommen. In dieser Arbeit hingegen werden explizit keine Annahmen darüber getroffen, wo entlang der Grenzlinie ein Netzwerk betrieben werden soll. Die Dissertation behandelt damit also ausdrücklich auch

den Fall, dass ein Netzwerkbetreiber sein Netzwerk in einem Punkt mit sehr hoher Effizienz aber eher geringerer Dienstgüte betreibt.

2 Ansatz

Wie die Dissertation 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 Bild 2), mit dem die genannten Bereiche bezüglich Effizienz und Dienstgüte untersucht, optimiert und ihre gegenseitigen Abhängigkeiten berücksichtigt werden.

Im folgenden Teil dieses Beitrags gehen wir kurz auf die wesentlichen Erkenntnisse in diesen drei Bereichen ein.

3 Architektur

Im Bereich der Netzwerkarchitekturen liegt der Fokus auf Methoden zur Dienstgütererbringung und deren Effizienz. Zunächst werden die unterschiedlichen Ansätze analytisch untersucht, dann experimentell untermauert und vertieft.

Um den Effekt von Dienstgütedifferenzierung analytisch erfassen zu können, werden in der Dissertation neuartige analytische Modelle hergeleitet. Sie erlauben es, aus einer Mischung von elastischen und unelastischen Verkehrsquellen den Überdimensionierungs-

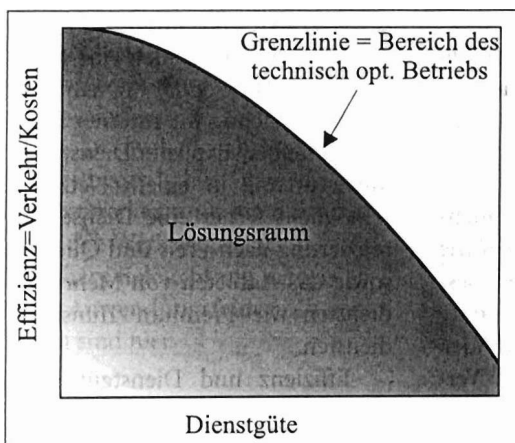


Bild 1 Zielkonflikt zwischen Effizienz und Dienstgüte.

faktor 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 in wissenschaftlichen Arbeiten von einem deutlich geringeren Faktor aus.

In einer umfangreichen experimentellen Untersuchung werden dann die verschiedenen Aspekte der Dienstgütearchitekturen der IETF (Intserv, Diffserv 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 Netzbetreiber, die Standardisierungsgremien und die Wissenschaft, die sich bislang zum überwiegenden Teil auf sehr viel komplexere Ansätze 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 so genannten 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 beispiels-

weise unter 8% wie vom Charny-Bound vorhergesagt auf über 27% zu steigern.

4 Interkonnektion

Neben der Netzwerkarchitektur wird die Effizienz und Dienstgüte eines Netzwerkes auch von der Interkonnektion beeinflusst. Mit dem Stichwort Interkonnektion beschreibt man die Art und den Umfang der Anbindung eines Netzwerkes an andere Netzwerke über beispielsweise Peering oder Transit Vereinbarungen. IP Pakete passieren zumeist die Netzwerke von mehreren Netzbetreibern, bevor sie ihr Ziel erreichen. Ein Netzbetreiber hat nur über sein eigenes Netzwerk die volle Kontrolle, er kann aber die Effizienz und Dienstgüte der von ihm angebotenen Dienste außerhalb seines Netzes indirekt über die Wahl der Interkonnektionspartner beeinflussen.

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 Netzbetreibers wird in der Dissertation erstmalig explizit formuliert und mit exakten Methoden gelöst. Um die Realitätsnähe und Relevanz zu garantieren, wurde mit mehreren Netzbetreibern und den Betreibern der beiden größten europäischen Internet-Knotenaustauschpunkte kooperiert.

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

5 Verkehrs- und Netzwerkanpassung

Die Rahmenbedingungen von und Anforderungen an Netzwerke än-

dern sich häufig; Netzwerke können daher nicht einfach statisch betrieben werden. Es müssen also auch die Anpassungsmaßnahmen der Netzbetreiber betrachtet werden. Diese unterteilen sich in Verkehrsanpassungsmaßnahmen (*traffic engineering*), mit denen kurz- und mittelfristig 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 Netzwerkes angepasst wird (z.B. Kapazitätserweiterung von Leitungen und Routern).

Existierende Verkehrsanpassungsmaßnahmen lassen sich basierend auf den Erkenntnissen des ersten Teils der Arbeit (Netzwerkarchitektur) verbessern. Generell zeigt 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 Netzbetreibers. 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.

6 Zusammenfassung

Die Effizienz und Dienstgüte moderner IP Netze hängt von verschiedenen Bereichen und Maßnahmen ab, die sich gegenseitig beeinflussen. Die Wahl einer geeigneten Netzwerkarchitektur muss von einer passenden Interkonnektion unterstützt und ergänzt werden. Dank des ständig wachsenden Verkehrsvolumens im Internet sind geeignete Maßnahmen zur Verkehrs- und Netz-



werkanpassung (*traffic & network engineering*) unerlässlich, um die Leistungsfähigkeit eines Netzwerkes im Zeitablauf aufrechtzuerhalten. In der hier beschriebenen Arbeit werden neue Modelle und Methoden entworfen sowie existierende Modelle und Methoden evaluiert, mit denen sich die Effizienz und Dienstgüte eines IP Netzwerkes optimieren lässt. Dabei werden in einem systemorientierten Ansatz die drei genannten Bereiche untersucht und gezeigt, wie die Bereiche aufeinander abgestimmt werden können.



Dr.-Ing. 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 Sie-

mens Internationalen Studentenkreises. Von 2000 bis 2004 hat er als Doktorand am Fachgebiet für Multimediakommunikation gearbeitet. 2003 war er ein „Visiting Scholar“ an der Universität Cambridge. Seit 2005 arbeitet Herr Heckmann als Postdoktorand an der TU Darmstadt und leitet die Forschungsgruppen Peer-to-Peer und IT Architekturen am Fachgebiet Multimediakommunikation. Adresse: TU Darmstadt, Multimedia Communications Lab, Merckstraße 25, 64283 Darmstadt, Deutschland, Tel.: +49-6151-16-5188, Fax: +49-6151-16-6152, E-Mail: heckmann@kom.tu-darmstadt.de