

Verkehrsmessungen und Lastmodellierung im Internet



Dr.-Ing. *Joachim Charzinski* ist seit 1997 Mitarbeiter der Siemens AG im Bereich Information and Communication Networks. Von 1985 bis 1991 studierte er Elektrotechnik an der Universität Stuttgart und war dort von 1992 bis 1997 Mitarbeiter am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, wo er über Medienzugriffsverfahren im Rückkanal passiver optischer Zugangsnetze promovierte. Seine Arbeitsschwerpunkte sind Messung und Modellierung von Internet-Verkehr, Messung und Bewertung der Dienstgüte für Datenverkehr, Mechanismen zur Verbesserung der Dienstgüte in IP-Netzen und Leistungsbewertung von Netzen, Protokollen und Systemen.

Messung und Modellierung von Internet-Verkehr, Messung und Bewertung der Dienstgüte für Datenverkehr, Mechanismen zur Verbesserung der Dienstgüte in IP-Netzen und Leistungsbewertung von Netzen, Protokollen und Systemen.



Dipl.-Ing. *Johannes Färber* studierte von 1989 bis 1995 Elektrotechnik an der Technischen Universität München. Er war anschließend bei der Mannesmann Pilotentwicklung im Bereich elektronischer Zahlungsverkehr beschäftigt und arbeitet seit 1996 an der Universität Stuttgart als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung. Sein Arbeitsschwerpunkt ist die Messung

und Charakterisierung von Internet-Verkehr.



Dipl.-Inform. *Norbert Vicari* ist seit Juli 2001 Mitarbeiter der Infosim Networking Solutions AG. Von 1989 bis 1995 studierte er an der Universität Würzburg Informatik und war dort von 1995 bis 2001 Mitarbeiter am Lehrstuhl für verteilte Systeme (Informatik III). Sein Arbeitsgebiet war die Modellierung und Leistungsbewertung von Systemen zur Datenübertragung. Forschungsschwerpunkt war die Messung und Charakterisierung

von Internet-Verkehr, was auch sein Dissertationsthema ist.

KURZFASSUNG

Seit mehr als acht Jahrzehnten werden in Kommunikationsnetzen Verkehrsmessungen durchgeführt, um statistische Daten über das Verhalten der Netznutzer und die Auslastung der Netze zu gewinnen. Damit werden letztlich die Grundlagen für Verkehrsmanagement und Netzausbau gelegt, so dass die Netzbetreiber ihren Nutzern eine adäquate Dienstgüte anbieten können. Heute werden durch das Internet eine Vielzahl von Kommunikationsdiensten ermöglicht, die teilweise sehr komplex zu charakterisieren sind. In diesem Beitrag werden einige Probleme der Modellierung von Internet-Verkehr und der nötigen Messungen zur Bestimmung der Modellparameter betrachtet. Anhand eines auf mehreren Ebenen rückgekoppelten Modells für Web-Verkehr wird gezeigt, wie Modellierung und Modellparameterisierung für den Web-Dienst möglich sind. Abschließend werden einige verbleibende Probleme bei der Simulation von Internet-Verkehr besprochen.

1 EINFÜHRUNG

Verkehrsmessungen werden aus den unterschiedlichsten Gründen durchgeführt. Bereits seit dem frühen 20. Jahrhundert wurden auf der Basis der Beobachtungen des Verhaltens von Telefonteilnehmern mathematische Modelle erstellt, um damit die notwendige Anzahl von Leitungen zum Erreichen einer festgelegten Dienstgüte zu bestimmen. Im Falle von Telefonnetzen wird beispielsweise bereits in der Phase der Netzplanung die Häufigkeit, mit der neue Telefonanrufe mangels verfügbarer Kapazität im Netz abgelehnt werden müssen, auf eine vertretbare Größe begrenzt.

Im laufenden Netzbetrieb wird der Verkehr beobachtet, um längerfristige Veränderungen des Teilnehmerverhaltens festzustellen und daraus gegebenenfalls resultierende Kapazitätsengpässe des Netzes rechtzeitig zu erkennen und zu beheben. In Netzen mit adaptivem Routing werden Messdaten auch verwendet, um die Verkehrslenkung so nachzuführen, dass eine möglichst gleichmäßige Netzauslastung erreicht wird. Außerdem werden oft aktive Messungen mit Testverbindungen oder -paketen durchgeführt, um in einem laufenden Netz die erreichte Dienstgüte zu überprüfen.

In komplexen, teilweise selbstkonfigurierenden Netzen wie dem Internet werden weitergehende Messungen durchgeführt: Dabei wird die Größe und die Topologie des Netzes und die Verkehrslenkung im Netz erforscht [6,7,11] oder die Dynamik der Protokolle [27,25,17], der Verkehrslenkung [21], des Anwendungs- und des Nutzerverhaltens [14,12,8] untersucht. Ziel der Untersuchungen ist oft, die aus dieser Dynamik resultierenden Netzprobleme zu analysieren, um die Leistungsfähigkeit von Diensten zu bewerten und um generell das Ver-

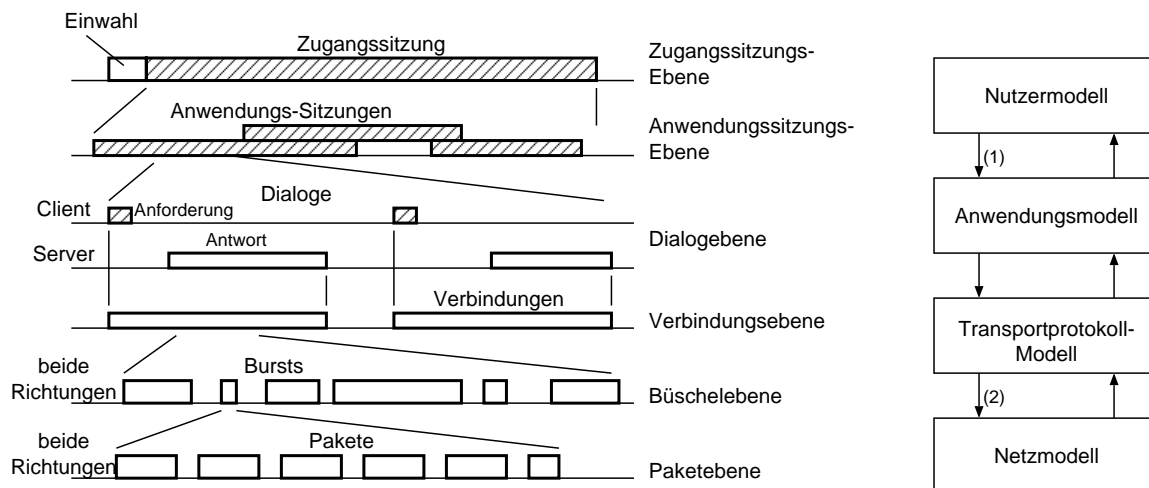


Abb. 1: Aktivitätsebenen und ihr Zusammenhang mit der Verkehrsmodellierung

kehrverhalten komplexer Datenanwendungen zu verstehen [20,18,4,9]. Die Ergebnisse dieser Messungen werden unter anderem dazu verwendet, um daraus Modelle für Netz-, Nutzer- oder Anwendungs-Simulationen abzuleiten oder um die Effizienz neuer Vorschläge für Architekturen [29,16], Mechanismen oder Protokollvarianten abzuschätzen.

In diesem Beitrag werden zunächst prinzipielle Ansätze zur Modellierung von Internet-Verkehr und die Funktion der wesentlichen Internet-Dienste beschrieben. Anschließend werden Aspekte der Messung im Internet näher beleuchtet und Modelle für WWW-Verkehr vorgestellt. Der Beitrag schließt mit einer Diskussion der Probleme bei der Simulation von Internet-Verkehr.

2 MODELLIERUNGSANSÄTZE

Entsprechend der Aktivität von Nutzern, Anwendungen und Protokollen auf verschiedenen zeitlichen und systematischen Ebenen gibt es auch verschiedene Modellierungsansätze für System- und Verkehrsmodelle. In Abb. 1 sind mehrere Ebenen der Aktivität von Nutzern und Anwendungen im Netz zusammengestellt. Nutzer, die keine permanente Verbindung zum Internet haben, müssen zunächst eine Einwahlverbindung zum Datennetz herstellen, bevor ihre Zugangssitzung beginnen kann. In dieser Zugangssitzungsebene wird somit die Einwahlaktivität von Nutzern und die Dauer der Zugangssitzungen erfasst.

Während einer Zugangssitzung können verschiedene Anwendungen genutzt werden, wobei dank multiprozessfähiger Betriebssysteme und des paketorientierten Netzzugangs auch mehrere Anwendungen gleichzeitig Kommunikationsbeziehungen ins Netz unterhalten können.

Innerhalb einer Anwendungssitzung laufen bei einer Client-Server-Anwendung Dialoge zwischen der auf der Nutzerseite angesiedelten Client-Anwendung und dem Server ab. Diese werden – je nach Anwendung – auf Verbindungen abgebildet, wobei das Transmission Control Protocol (TCP) im Internet eine gesicherte virtuelle Ende-zu-Ende-Verbindung auf der Basis des durch das Internet Protocol (IP) gegebenen verbindungslosen Paketübermittlungsdienstes des Netzes bereitstellt. Zwischen Dialogen und Verbindungen besteht nicht unbedingt eine 1:1-Beziehung – es können auch mehrere Dialoge nacheinander in derselben Verbindung bearbeitet werden, genauso wie die Daten eines Dialoges in mehreren, teils paral-

lelen Verbindungen mit einem oder mehreren Servern übertragen werden können.

Innerhalb einer Verbindung werden in beiden Richtungen Pakete ausgetauscht. Sowohl die Anwendungsprotokolle als auch das Transportprotokoll TCP benötigen den bidirektionalen Datenaustausch. Dieser Datenaustausch erfolgt nicht notwendigerweise in Form eines gleichmäßigen Paketstromes, sondern es treten oft Bündel (*Bursts*) von Paketen auf, die meist auf Funktionen der Anwendungsschicht oder auf die Fluss-Steuerung der Transportschicht zurückzuführen sind.

Die Modelle für die verschiedenen Ebenen gliedern sich, wie in Abb. 1 dargestellt, grob in Nutzer-, Anwendungs-, Transportprotokoll- und Netzmodelle, wobei genau genommen zwischen jedem dieser Teilmodelle ein bidirektionaler Informationsfluss stattfindet. Sie können grob in den Dimensionen *Rückkopplung*, *Ebenen* und *Bündelung* kategorisiert werden.

Modelle mit *Rückkopplung* reagieren auf Verzögerung und Verlust von Paketen im Netz. Meist wird dies (in Simulationen) durch TCP-Module realisiert, aber auch in analytischen Processor-Sharing-Modellen werden die Eigenschaften der durch TCP erreichten Ratenaufteilung idealisiert nachgebildet. Diese sogenannte Elastizität des durch TCP geregelten Paketverkehrs hat zur Folge, dass mit Verkehrsmodellen ohne Rückkopplung keine Aussagen über Verluste oder Warteschlangenlängen in Netzen getroffen werden können [3].

Modelle, die mehrere *Ebenen* beschreiben, enthalten in der Regel Nachbildungen der Mechanismen auf diesen Ebenen. Korrelationseigenschaften in Verkehrsbündeln oder auf der Paketebene können durch Modellierung der Anwendungs- und Nutzerebene so nachgebildet werden, dass die Modellparameter jeweils physikalisch gedeutet werden können. Als Erweiterung eines einfachen Modells auf der Nutzerebene (Punkt (1) in Abb. 1) können so Modelle für die Paketebene (Punkt (2) in Abb. 1) erzeugt werden.

In den oben beschriebenen Kategorien wird jeweils angenommen, dass die Modelle eine Anwendung und einen Nutzer beschreiben, so dass zur Nachbildung des Verkehrs mehrerer Anwendungen und mehrerer Nutzer entsprechend viele Instanzen des Modells eingesetzt werden müssen. Eine Alternative dazu sind Modelle für Summenverkehr, die mit wesentlich weniger Parametern den Verkehr einer großen Anzahl von Nutzern beschreiben. Die Parameter müssen hier allerdings meist messtechnisch bestimmt werden, da sie aus Nutzer- und anwendungsbezogenen Größen nicht oder nur sehr schwer

herzuleiten sind. Solche Modelle für Summenverkehr, die in der Regel keine Rückkopplung berücksichtigen können, sind beispielsweise als Stimulus für die Validierung von Funktionen der Sicherungsschicht oder von Routern einsetzbar, aber sie erlauben nur wenig Rückschluss auf die Paketverluste oder -verzögerungen in einem Netz.

Zur Untersuchung von Servern werden überdies detailliertere Modelle der Nutzer- und Anwendungsebene eingesetzt, die beispielsweise die Last durch vollständige Transaktionen in Online-Buchläden, -Auktionen oder Agentenprogramme (*Robots*) stochastisch nachbilden [26].

3 DIENSTE

3.1 Internet-Anwendungen

Dank der nahezu vollständigen Trennung von Paketübermittlungsdienst und Anwendungen im Internet haben sich im Laufe der letzten 30 Jahre eine Reihe von Anwendungen mit unterschiedlichen Eigenschaften entwickelt.

Der größte Teil des Verkehrs im Internet wird durch die Übertragung von Dateien in Client-Server-Diensten verursacht, die interaktiv (*WWW, FTP*), im Hintergrund (*E-Mail, Netnews*) oder schritthaltend mit der Darstellung (*Streaming*) geschehen kann. Nicht zu vernachlässigen ist auch der Verkehr, der durch Netzdienste wie Namensauflösung (*DNS*) oder Web-Cache-Aktualisierungen entsteht.

Weiterhin gibt es interaktive Dialogkommunikation in verschiedenen Formen: Schriftliche Kommunikation mit einem Server über Telnet, oder mit anderen Nutzern des Netzes als *Chat*, Sprach- oder Videokommunikation sowie die Echtzeitkommunikation in Form von verteilten Computerspielen (*multiplayer games*). Echte Verteilkommunikation (Internet TV oder Radio) ist aufgrund fehlender Multicast-Fähigkeit des Netzes immer noch stark eingeschränkt und wird in der Regel durch Serverbasiertes *Streaming* emuliert. Auf die in lokalen IP-basierten Netzen zusätzlich zu beobachtenden anwendungsspezifischen Verkehre durch File-Server, Druckserver oder ähnliche Dienste soll hier nicht eingegangen werden.

Im Folgenden beschränken wir uns auf die Haupt-Anwendung *WWW* – zum einen, weil sie den größten Anteil am Internet-Verkehr hat und zum anderen, weil sie im Vergleich zu den viel modellierten Audio- und Videoübertragungsdiensten die interessantesten Eigenschaften zeigt. Die Übertragung der Dateien im *WWW* geschieht über Verbindungen des Protokolles der Anwendungsschicht (*HTTP*), die über Verbindungen des Transportprotokolles *TCP* realisiert werden. Beim Abruf von Web-Seiten (wie auch beim Abruf von Nachrichten aus einer Mailbox) können innerhalb einer Verbindung mehrere Dateien nacheinander übertragen werden. Darüberhinaus setzen viele Web Browser noch mehrere parallele Verbindungen ein, um gleichzeitig mehrere Elemente von Web-Servern zu laden, so dass – falls die Zugangsleitung nicht der Engpass ist – eine Seite insgesamt schneller dargestellt werden kann als wenn alle Elemente nacheinander geladen würden.

3.2 Charakteristische Größen

Auf einer gegebenen Ebene wird Verkehr in erster Linie durch den Zeitpunkt des Eintreffens einer Anforderung und die Größe der Anforderung bzw. die damit assoziierte Bearbeitungsdauer beschrieben.

Die wesentlichen Parameter auf der Nutzerebene sind die Häufigkeit und Dauer der Einwahlsitzungen sowie die Auswahl und Nutzung der einzelnen Anwendungen, wobei letzteres –

bedingt durch die Kombination entsprechender Funktionen in der Software – teilweise unabhängig von Eingriffen der Nutzer geschieht, wenn beispielsweise ein Web Browser gleichzeitig periodisch den Eingang neuer E-Mails überprüft.

Die wesentlichen Charakteristika des Web-Verkehrs sind die Verteilungen der Dateigrößen, die Anzahl von Dateiabrufen pro Anwendungssitzung und pro angeforderter Web-Seite. Auf der Nutzerseite kommen hier noch Angaben über die Geduldsspanne für das Laden von Seiten und die Dauer des Lesevorganges bis zum Abruf der nächsten Seite dazu. Bedingt durch die Funktionsweise von *TCP* und *IP* sind die zu beobachtenden Paketgrößen nicht nur durch Charakteristika des betrachteten Dienstes, sondern ganz wesentlich auch durch technische Eigenschaften und Konfigurationsparameter der Endsysteme und Netzkomponenten bestimmt.

Weiterhin hat die verwendete Software auf Client- und Serverseite einen Einfluss darauf, wieviele Elemente nacheinander in einer Verbindung übertragen werden und wieviele parallele Verbindungen verwendet werden, was wiederum die Anzahl der Elemente beeinflusst, die in einer Verbindung übertragen werden. Außer durch Algorithmen und Grenzen in der Client- und Serversoftware werden diese Größen auch noch durch Inkompatibilitäten von Protokollimplementierungen beeinflusst. Zusammen mit diesen Größen bestimmt schließlich die im Netz (mit *TCP*) erzielbare Datenrate, wie lange die Übertragung der Elemente einer Web-Seite wirklich dauert.

Die Anzahl der einzeln zu ladenden Elemente pro Web-Seite ist keine rein technische Eigenschaft, sondern sie hängt stark von der durch die Web-Designer bei der Seitenerstellung eingesetzten Software und den gewählten Design-Paradigmen und Features (z.B. *Javascript*) ab.

Nicht zuletzt kann auch die Entscheidung, Web-Seiten auf dem Server dynamisch zu erzeugen, die Verkehrscharakteristiken völlig verändern. Aufgrund der Eigenschaften des *HTTP*-Protokolles muss nach der Übertragung einer dynamisch erstellten Web-Seite, deren Größe vor der Übertragung nicht bekannt war, die entsprechende *HTTP/TCP*-Verbindung geschlossen werden, so dass zum Laden weiterer Elemente der Seite neue Verbindungen geöffnet werden müssen.

Desweiteren zeigen die beobachteten Größen starke Schwankungen in Tages- und Wochenrhythmen und – in den meisten Fällen – ein Wachstum bei der Betrachtung über mehrere Monate.

4 VERKEHRSMESSUNG

4.1 Methodik

Im Folgenden betrachten wir nur die passive Messung mit dem Ziel der Charakterisierung des Internet-Verkehrs zur Lastmodellierung.

Vor der Durchführung einer Messung muss Klarheit über das Messziel bestehen, d.h. der zu charakterisierende Verkehr muss hinsichtlich Verkehrsebene, Ort und zeitlichem Zusammenhang so genau wie möglich festgelegt werden. Idealerweise können so auch die zu speichernden Datenmengen erheblich reduziert werden.

Die Messgrößen hängen zunächst von der betrachteten Verkehrsebene ab. Auf *IP*-Paketebene handelt es sich dabei vor allem um die Größe und den Ankunftszeitpunkt eines Pakets. Aber auch die *IP*-Adressen und die enthaltenen Daten höherer Protokolle sollen meist erfasst werden (z. B. Protokolltyp, Port-Nummern, Header-Felder). Die Messung auf höheren Verkehrsebenen ist in der Regel nicht direkt möglich und führt

dann auf die Messung auf IP-Paketebene zurück, aus deren Ergebnissen auf die gewünschten Parameter geschlossen werden kann.

Zur Aufzeichnung der Messgrößen können zum einen Monitor-Optionen der Netzinfrastruktur verwendet werden. Die Verwendung eigener Messgeräte, welche den Verkehr passiv mitprotokollieren, ist allerdings vorzuziehen, um die Messung nicht durch zusätzliche Belastung des Netzes zu verfälschen. Neben Spezialmessgeräten werden oft einfache PCs mit geeigneter Monitor-Software wie z.B. *tcpdump* [33] oder *etherreal* [34] eingesetzt, die sich durch ihren günstigen Preis, große Speicherkapazität und einfache Handhabung auszeichnen. Allerdings haben solche Geräte auch eine begrenzte Genauigkeit, die durch Betriebssystem, Speicherhardware, Busse und Netzwerkkarte vorgegeben wird. Für einen Linux PC mit *tcpdump*, so wie er für einen Teil unserer Messungen verwendet wurde, kann eine maximale Genauigkeit von etwa 10 µs erreicht werden [2].

Weiterhin spielt die Wahl von Messort, Messzeitpunkt sowie Messdauer eine entscheidende Rolle. Abb. 2 veranschaulicht, welchen Einfluss der Messort auf die beobachteten Verzögerungen hat. Die Antwortzeit auf eine Anfrage des Clients hängt davon ab, wo Anfragepaket und Antwortpaket beobachtet werden. Gleiches gilt für Antwortzeiten aus Sicht des Servers. Zudem ändert sich die Zusammensetzung des Verkehrs mit dem Messort. Beispielsweise umfasst der beobachtete Verkehr aus der Sicht eines WWW-Browsers die Verbindungen zu allen besuchten Servern innerhalb der Sitzungen eines Nutzers, während aus Sicht eines WWW-Servers das Verhalten vieler Nutzer beobachtet wird, allerdings nur innerhalb des Angebots dieses Servers.

Messzeitpunkt und Messdauer sind für die Bewertung der Mess-Ergebnisse entscheidend. Die Intensität der Internet-Nutzung weist typische Schwankungen im Tagesverlauf mit Hauptverkehrszeiten um Mitternacht (zumindest bei studentischen Nutzern) und verkehrsarmen Zeiten am frühen Morgen auf. Treten während der Messdauer Änderungen im mittleren Verkehrsaufkommen auf, muss dies bei der Auswertung erkannt und berücksichtigt werden, da der Datensatz u.U. keine Stationarität mehr aufweist. Hier muss ein Kompromiss zwischen kleinen Messdauern für stationäre Werte und großer Messdauer für ausreichende statistische Relevanz gefunden werden. Die in Abb. 3 dargestellte mittlere erreichte Übertragungsrate von einzelnen TCP-Verbindungen zeigt die Abhängigkeit des elastischen Verkehrs von solchen tageszeitlichen Randbedingungen.

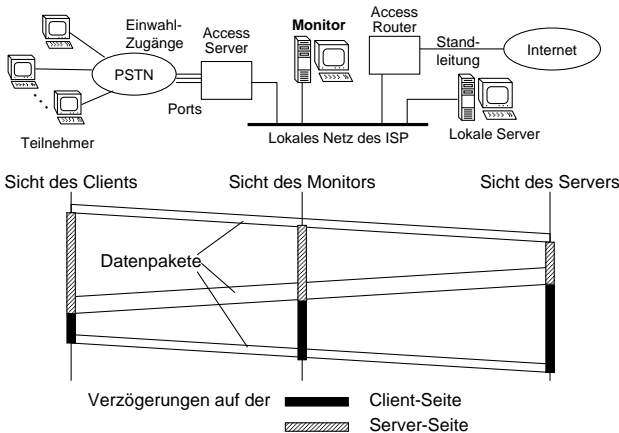


Abb. 2: Abhängigkeit der beobachteten Verzögerungen vom Messort

Abb. 3 zeigt zudem, wie die Mess-Ergebnisse auch von der verfügbaren Bandbreite abhängen. Über der Tageszeit ist der Mittelwert des Durchsatzes aller jeweils zu dieser Tageszeit beobachteten TCP-Verbindungen für verschiedene Geschwindigkeiten der Zugangsleitungen aufgetragen. Zum Vergleich mit den Daten von Modem- und ISDN-Zugängen sind auch Ergebnisse einer älteren Messung an ADSL-Leitungen eingezeichnet. Je nach Geschwindigkeit und Verzögerung der Zugangsleitung kann eine TCP-Verbindung unterschiedlich viel von der Netzkapazität zur Übermittlung der eigenen Daten beanspruchen. Von der wesentlich höheren Datenrate von 2.5Mbit/s auf den ADSL-Leitungen konnten TCP-Verbindungen nur teilweise profitieren, was im wesentlichen an den beschränkten Leitungskapazitäten im Weitverkehrsbereich liegt. Desweiteren ist der Einfluss der Netzauslastung auch an den nachts und morgens erhöhten Durchsatzwerten zu erkennen. Für die korrekte Bewertung von Messungen ist es daher immer nötig, auch die Eigenschaften des beobachteten Netzes zu kennen.

4.2 Probleme der Messung von Internet-Verkehr

Bei der messtechnischen Bestimmung der Dateigrößen, der Dauer von TCP-Verbindungen, der Anzahl geladener Elemente pro Verbindung, Web-Seite oder Web-Sitzung wurden in verschiedenen Studien Verteilungen mit sehr großer Varianz festgestellt [15].

Die komplementäre Verteilungsfunktion $F_X^C(x) = P\{X > x\}$ zeigt die Häufigkeit mit der die Messgröße den auf der Abszisse aufgetragenen Wert übersteigt. Die komplementären Verteilungsfunktionen für Messgrößen mit sehr großer Varianz fallen sehr langsam, teilweise nach Potenzgesetzen mit $F_X^C(x) \sim x^{-\alpha}$, ab. Würde man solche Verteilungen für $x \rightarrow \infty$ extrapolieren, so hätten sie für $\alpha \leq 2$ eine unendliche Varianz und bei $\alpha \leq 1$ sogar einen unendlichen Erwartungswert. Obwohl man aus direkten Messungen natürlich immer endliche Varianzen und Mittelwerte erhält, stellt man fest, dass die gemessene Varianz mit zunehmender Beobachtungsdauer über weite Zeitbereiche ansteigt, so dass weder die Varianz der betroffenen Größen noch ein Konfidenzintervall für ihren Mittelwert zuverlässig bestimmbar ist. Teilweise ist es daher sinnvoll, anstelle von Mittelwert und Varianz eher Überschreitungswahrscheinlichkeiten oder Quantile anzugeben.

Die hohen Varianzen von Größen und Dauern führen zu Langzeitabhängigkeit im beobachteten Verkehr, die wiederum für die im Datenverkehr oft beobachtete asymptotische Selbstähn-

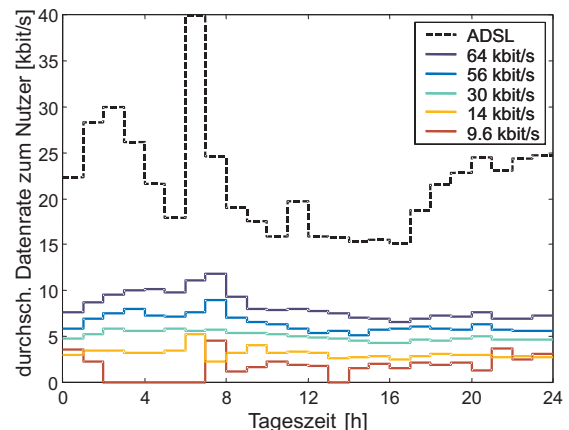


Abb. 3: Abhängigkeit der mittleren Geschwindigkeit in TCP-Verbindungen von der Tageszeit und der Geschwindigkeit der Zugangsleitung. Daten aus [31].

lichkeit [22] oder die "fraktalen" Eigenschaften verantwortlich ist [15].

Eine weitere Schwierigkeit besteht, wie in Abschnitt 4.1 bereits erwähnt wurde, in der direkten Messung auf höheren Verkehrsebenen. Während TCP-Parameter noch leicht aus IP-Paketen herausgelesen werden können, wird es auf höheren Ebenen immer schwieriger, noch einzelne Verbindungen zu erkennen oder Dialogpausen von Sitzungspausen zu unterscheiden.

Für WWW-Verkehr ist beispielsweise das Nutzerverhalten aus Verkehrsmessungen innerhalb des Netzes nicht mehr exakt zu bestimmen. Die Anforderung einer neuen Web-Seite durch den Nutzer löst einen HTTP-Request aus, der nicht von einem automatisch erzeugten HTTP-Request zum Nachladen eines eingebetteten Objektes (sog. Inline Objekt) wie z.B. kleine Bilder, Photos oder Audio-Daten zu unterscheiden ist. Damit kann aus der Messung auf Paketebene nicht mehr auf das exakte Nutzerverhalten geschlossen werden. Eine exakte Erfassung des Nutzerverhaltens ist zwar durch Mitprotokollieren innerhalb der Anwendung möglich, erfordert aber Zugang zu den Anwendungen und kann somit nur in kleinem Maßstab durchgeführt werden, also mit eingeschränkter statistischer Relevanz.

Durch die Verwendung von Heuristiken kann das Nutzerverhalten aus den Mess-Ergebnissen auf Paketebene allerdings abgeschätzt werden. Eine einfache Abschätzung für das Erkennen von nutzergenerierten HTTP-Requests kann beispielsweise über die Zwischenankunftszeit erfolgen: übersteigt sie eine Sekunde, wird die Nachricht einer Nutzeranforderung zugeordnet [24]. Eine andere Möglichkeit besteht in der Auswertung der HTTP Header-Felder: folgt auf einen HTTP-Request nach einem Objekt vom Typ HTML eine Antwort mit Status "OK", so wird der Request einer Nutzeranforderung zugeordnet [10]. Obwohl diese Abschätzungen nicht exakt sind, führen sie zu brauchbaren Ergebnissen.

5 VERKEHRSMODELLIERUNG

Ziel der Verkehrsmodellierung ist es, geeignete Verkehrsbeschreibungen zu finden, welche die Erzeugung einer realistischen Last auf ein zu simulierendes System ermöglichen. Um die Komplexität der Simulation zu begrenzen, müssen die Quellmodelle möglichst einfach gehalten werden, d.h. zumindest für komplexe Verkehre muss eine Abstraktion auf die wesentlichen Merkmale erfolgen.

5.1 Teilnehmerverkehr pro Dienst

Da Internet-Verkehr eigentlich aus zahlreichen und sehr unterschiedlichen Verkehrsbeziehungen besteht (WWW, E-Mail, FTP, DNS, ...) bietet sich eine Nachbildung von realistischerem Verkehr aus dienstspezifischen Einzelquellen an. Die Dienstenutzung einzelner Teilnehmer kann anschaulich und relativ exakt modelliert werden. Für die Bildung von Summenverkehren bestehend aus vielen Diensten und vielen Nutzern ist dieser Ansatz sehr komplex, aber er ist gut geeignet für die Untersuchung von dienstbezogenen Leistungsmerkmalen, wie z.B. der erreichten Dienstgüte bestimmter Dienste bei verschiedenen Warteschlangenstrategien. Der genau modellierte, dienstspezifische Teilnehmerverkehr würde für solche Untersuchungen zusammen mit relativ einfach gehaltenen Hintergrundquellen eingesetzt werden.

Dass eine Unterscheidung nach Diensten, Zugangstechniken und Nutzerklassen sinnvoll und nötig ist, zeigt Abb. 4. Der sehr große Anteil von HTTP-Verkehr ist offensichtlich und deutet

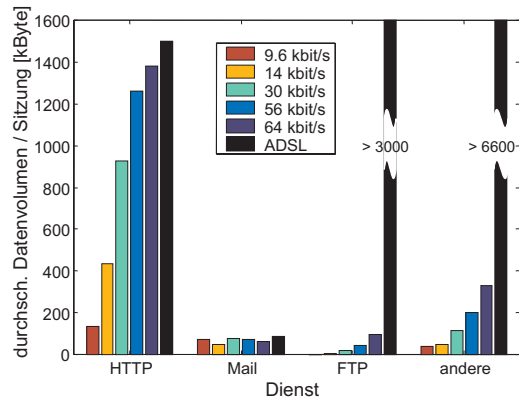


Abb. 4: Mittleres Datenvolumen einer Anwendungssitzung für verschiedene Dienste und Geschwindigkeiten der Zugangsleitungen. Daten aus [31].

darauf hin, dass ein Großteil des Internet-Verkehrs durch WWW-Modelle beschrieben werden kann. Die ungewöhnlich starke Nutzung von ADSL-Verbindungen für FTP und andere Dienste (Videoabruf und Netzspiele) ist Folge der speziellen Konstellation im beobachteten ADSL-Feldversuch.

In [10] wurde ein Quellmodell für WWW-Verkehr vorgestellt. In diesem Modell, werden sog. *Web-Requests* bestehend aus einem Haupt-Objekt und den zugehörigen Inline-Objekten erzeugt. Objektgrößen, Anzahl der Inline-Objekte, Zwischenankunftszeit der Inline-Objekte und Zwischenankunftszeit der *Web-Requests* sind dabei die wesentlichen Modellparameter, welche über Verteilungsfunktionen beschrieben werden und durch Erneuerungsprozesse generiert werden können. Durch die automatische Erzeugung der Inline-Objekte führt diese Beschreibung zu starken Korrelationen auf Paketebene. Das Modell berücksichtigt allerdings nicht die Beschränkungen auf eine maximale Anzahl paralleler TCP-Verbindungen.

5.2 Reaktive Modellierung

Ein Manko insbesondere von Modellen für Summenverkehr auf der Paketebene ist, dass sich die empirische Parameterisierung nur auf Momentaufnahmen gemessener Netze bezieht und von der in diesen Momenten erreichbaren Übertragungsrate abhängt. Auch die dienstspezifischen Mehrebenenmodelle haben das Problem, dass ohne die Berücksichtigung von TCP die angenommenen Übermittlungsdauern für Anforderungen, auf jeden Fall aber das angenommene Nutzerverhalten als unabhängig von der Situation des Netzes modelliert wird. Treten in einem simulierten Netz mehr Paketverluste oder -verzögerungen auf als im Modell berücksichtigt, dann wird das Modell mehr Verkehr erzeugen als reale Nutzer und Anwendungen in derselben Netzsituation und umgekehrt.

Zusätzlich wird die Ungeduld der Nutzer abhängig von der Netzleistung mehr oder weniger häufig zum Abbruch von Übertragungsvorgängen führen. Diese Probleme sind insbesondere auch zu berücksichtigen, wenn der Schritt der Modellierung umgangen werden soll und aufgezeichneter Paketverkehr direkt in simulativen Untersuchungen als Eingangsverkehr verwendet wird.

Bei der Modellierung von Verkehrsebenen lassen sich diese Rückkopplungseffekte relativ leicht berücksichtigen. Für die reaktive Modellierung von Paketverkehr ist dabei insbesondere eine Modellierung des TCP-Protokolles mit seinen Flusskontroll- und Paketwiederholungsmechanismen unerlässlich. Auf der Anwendungsebene kann auf das Ende einer TCP-Übertra-

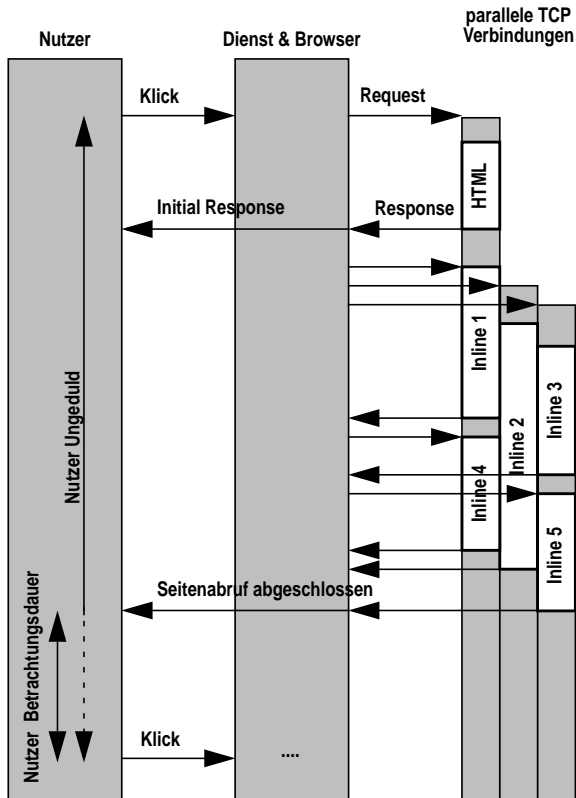


Abb. 5: Reaktives WWW-Verkehrmodell

gung reagiert werden, wenn beispielsweise eine maximale Anzahl gleichzeitig parallel aktiver TCP-Verbindungen modelliert werden soll. Auf Nutzerebene können Anforderungen bei zu langen Antwortzeiten abgebrochen werden.

Im Folgenden stellen wir ein reaktives WWW-Verkehrmodell auf Paketebene vor, das sich in Nutzer-, Anwendungs- und TCP-Ebene unterteilt. In Abb. 5 ist der im Modell nachgebildete zeitliche Ablauf des Abrufs einer WWW-Seite mit allen ihren eingebetteten Objekten durch alle drei Ebenen dargestellt.

Ein Abruf wird durch eine Nutzeraktion (Klick) initiiert. Nach dem Absetzen der ersten *Request*-Nachricht und der Antwort mit dem HTML-Objekt (Initial-Objekt) werden alle weiteren eingebetteten Objekte (Inline-Objekte) mit *Request*- und *Response*-Nachrichten angefordert und übertragen. Die Anwendungsschicht kann dabei eine begrenzte Anzahl paralleler TCP-Verbindungen (z.B. 3) verwenden, was je nach Belegung zu Unterbrechungen und Fortsetzungen der Übertragungen führt. Auf Nutzerebene bestimmen zwei Mechanismen den Zeitpunkt der nächsten Nutzeranforderung. Zum einen beginnt sofort nach einem Klick eine Zeitüberwachung, welche die Ungeduld des Nutzers beschreibt und nach Ablauf einen neuen Klick auslöst. Wenn alle eingebetteten Objekte vor Ablauf der Zeitüberwachung eingetroffen sind, wird diese beendet. Dafür beginnt eine zweite Zeitüberwachung, welche nun die Betrachtungsdauer des Nutzers beschreibt und nach Ablauf ebenfalls einen neuen Klick auslöst. Das Eintreffen der ersten Antwort kann als Dienstgüte-Merkmal genutzt werden, wenn angenommen wird, dass die Anwendung dann bereits lesbaren Text darstellen kann. Rückkopplungen erfolgen also auf allen Modell-Ebenen.

Die Parameterisierung eines solchen Modells ist sehr umfangreich, da für jede Ebene ein Satz von Parametern definiert und bestimmt werden muss. Obwohl diese Parameter meist sehr

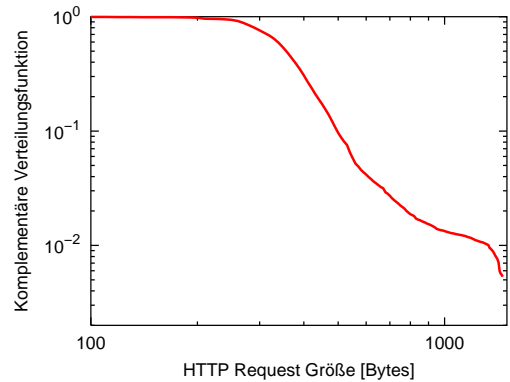


Abb. 6: Verteilung der Größe der HTTP-Requests (Mittelwert = 380 Byte, Standardabweichung = 152 Byte)

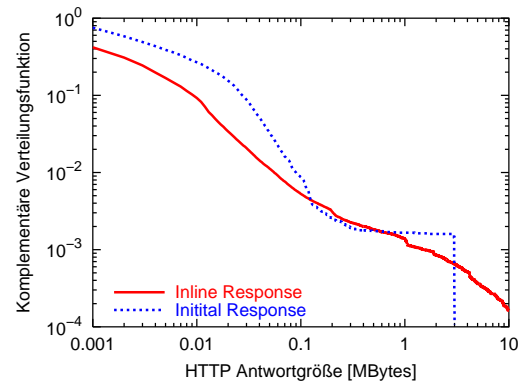


Abb. 7: Verteilung der Größe der HTTP-Responses für Initial- und Inline-Objekte.

anschaulich sind, können sie, wie in Abschnitt 4.2 beschrieben, teilweise nicht exakt bestimmt werden. Daher verwenden wir Heuristiken zur Abschätzung solcher Parameter. Insbesondere die Bestimmung der initialen *Request*-Nachrichten hat starke Auswirkungen auf viele Parameter des Modells. Die Heuristiken sind daher auch zentraler Gegenstand unserer weiteren Forschung.

Grundsätzlich werden alle Parameter durch Auswertung von Verkehrsmessungen bestimmt. Zumindest für einige Parameter können hier die Ergebnisse zahlreicher anderer Arbeiten auf diesem Gebiet verwendet werden [4,10,23,24,30]. Für die Parameterisierung des vorliegenden Modells konnten wir eine Messung am Zugangsknoten des Hochgeschwindigkeitsnetzes des Selfnet e.V. [35] der Studentenwohnheime an der Uni Stuttgart durchführen. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe der von Choi und Limb vorgeschlagenen Heuristik [10].

Wie in Abschnitt 4.2 beschrieben wurde, weisen viele charakteristische Parameter von Internet-Verkehr extrem hohe Varianzen auf. Das langsame Abfallen der komplementären Verteilungsfunktionen für große Werte nach dem Potenzgesetz zeigt sich in einer doppelt logarithmischen Darstellung in einem linearen Verlauf mit Steigung $-\alpha$. Zur Veranschaulichung haben wir daher diese Darstellung für alle Parameter gewählt.

In Abb. 6 bis Abb. 9 sind die komplementären Verteilungsfunktionen für die Größe der *Request*-Nachrichten, die Größe der *Response*-Nachrichten (unterschieden nach Initial-Objekt und Inline-Objekt), die Anzahl der eingebetteten Objekte pro Seite sowie die gemessene Dauer bis zum nächsten nutzergenerierten Seitenabruf abgebildet.

Im Falle der *Request*-Größen erkennt man, dass etwa 99% aller Nachrichten kleiner als 1460 Bytes sind. Bei der üblicherweise verwendeten MTU (*maximum transmission unit*) von

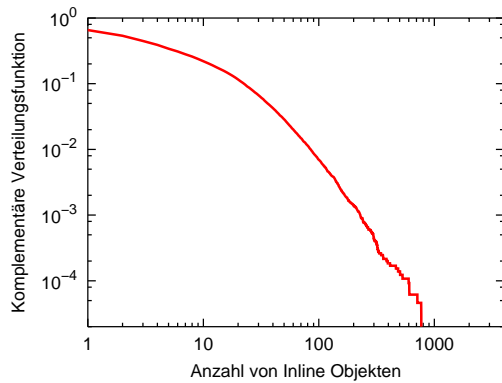


Abb. 8: Verteilung der Anzahl der Inline-Objekte in einer Anforderung (Mittelwert = 8, Standardabweichung = 20)

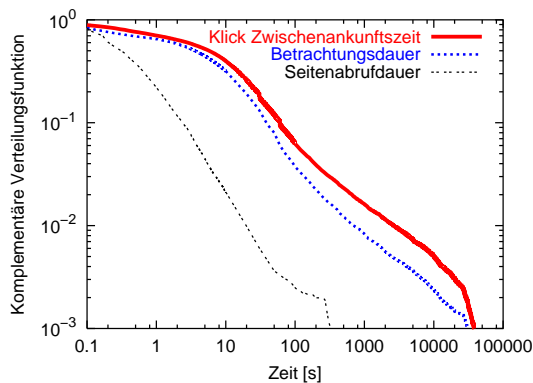


Abb. 9: Zwischenankunftszeit der Klicks, Betrachtungsdauer und Dauer eines Seitenabrufs

1500 Byte können diese in einem einzigen IP-Paket transportiert werden. Im Mittel waren die beobachteten HTTP-Requests 380 Bytes groß.

Die *Response*-Größen reichen dagegen von wenigen hundert Bytes bis hin zu mehreren Mbytes. Die Unterscheidung nach Initial- und Inline-Objekten zeigt, dass die Initial-Objekte, die normalerweise nur HTML-Code, also Textinformationen mit Referenzen auf alle eingebetteten Objekte enthalten, umfangreicher sind. Allerdings wurden keine Initial-Objekte größer als 3 MBytes beobachtet. Für beide Parameter wurden sehr große Varianzen gemessen, weshalb kein Mittelwert angegeben werden kann (siehe Abschnitt 4.2). Es ist möglich, die Varianz zu reduzieren, indem eine Unterscheidung nach Datei-Typen (Text, Bild, Audio, Video, Binär) durchgeführt wird [1,19].

Die Anzahl der eingebetteten Objekte reicht von 0 bis hin zu fast 1000 referenzierten Objekten. Die Verteilungsfunktion in Abb. 8 weist für große Werte deutliches Abfallen nach dem Potenzgesetz auf. Während die Hälfte aller Klicks WWW-Seiten mit weniger als 3 Inline-Objekten anfordern, werden bei jedem 10. Klick über 20 und bei jedem 100. Klick über 80 Inline-Objekte übertragen.

Im Gegensatz zur Betrachtungsdauer ist die Nutzerungeduld nicht direkt messbar. Sie tritt nur in Erscheinung, wenn die Geduldsspanne kürzer als die Seitenabrufdauer ist - längere Geduldsspannen lassen sich nicht erfassen. Um diese Größe abzuschätzen, muss eine exaktere Auswertung der Messung erfolgen, die zusätzliche Informationen für diese Entscheidung heranzieht. Abb. 9 zeigt die Verteilungsfunktionen für die beobachtete Dauer zwischen zwei Klicks, die Betrachtungsdauer sowie die Dauer eines Seitenabrufs. Diese Größen können zur Bewertung der gefundenen Verteilungen für die Ungeduld genutzt werden.

Eine Möglichkeit zur Verfeinerung des WWW-Modells besteht in der Berücksichtigung von Abhängigkeiten der Betrachtungsdauer und Ungeduld von der übertragenen Datenmenge eines Abrufs, d.h. der Anzahl der Inline-Objekte und ihrer Größen. Eine solche Abhängigkeit motiviert sich durch das größere Interesse eines Nutzers, der eine umfangreiche Seite anfordert und würde die Genauigkeit der Modellierung erhöhen.

6 PROBLEME

Seit der Veröffentlichung "Why we don't know how to simulate the Internet" von Paxson und Floyd [28] haben wir zwar weitere Erkenntnisse über Internet-Verkehr sowohl im Fern- als auch im teilnehmernahen Bereich gesammelt, aber die grundlegenden Probleme sind nach wie vor nicht gelöst.

Ein Grundproblem der großen Varianzen, aber auch der großen Diversität des Netzes, seiner Nutzer und der Anwendungen, ist die Schwierigkeit, Verkehrsmodelle vernünftig zu parametrisieren. Dabei ist es unerheblich, ob es sich um "kanonische" Modelle mit wenigen abstrakten Parametern oder um "erklärende" Modelle mit vielen Parametern mit physikalischer Bedeutung handelt. In beiden Fällen muss die Messdauer zur Bestimmung der Parameter oft länger sein als die Zeit, während der Verkehr als stationär angenommen werden darf.

Das größte Hindernis auf dem Weg zu einer sinnvollen Simulation des heutigen Internet-Verkehr ist die große Varianz in den fundamentalen Größen (Dateigröße, Übertragungsdauer, aber auch Wartedauer, Anzahl von in einer Verbindung abgerufenen Elementen). Die damit zusammenhängende Langzeitabhängigkeit im Verkehr ist daher zumindest für Datenverkehr nicht Ursache, sondern Folge dieser Varianz. Simulationen mit realistischen Parametern haben aufgrund der großen Varianz Laufzeit- und Konfidenzprobleme: Die charakteristischen Merkmale des simulativ erzeugten Verkehrs, z.B. mittlere Dateigrößen oder mittlere Ereignisraten, konvergieren nur sehr langsam gegen die eingestellten Werte. Die Mess-Ergebnisse in einer Simulation mit hochvariantem Verkehr zeigen auch nach langer Simulationszeit noch große Schwankungen [13]. Um die Konfidenzintervalle der Messung um einen Faktor 10 zu verkleinern, muss eine Messung bzw. Simulation bei Verkehr ohne Langzeitabhängigkeit um einen Faktor 100 verlängert werden. Wenn der Verkehr dagegen aus einer Pareto-Verteilung mit $\alpha = 1.2$ erzeugt wird und damit Langzeitabhängigkeiten mit Hurst-Parameter $H = 0.9$ besitzt, dann müsste die Simulation bereits um einen Faktor 10^{10} verlängert werden [5]. Dies hat zur Folge, dass Verkehr mit den direkt gemessenen Parametern und extrapolierten Verteilungen meist nicht sinnvoll simulierbar ist. Der Ansatz, die gemessenen Verteilungen an einer bestimmten Obergrenze abzuschneiden [32], kann hier weiterhelfen und entspricht teilweise sogar den im echten Netz eingesetzten Hilfsmaßnahmen wie Beschränkungen der Dateigrößen bei E-Mail-Übertragungen oder der maximalen Ablagegröße für E-Mails auf einem Mailserver.

Bei dem Versuch der Simulation des Internets über mehrere Zeitebenen und viele Knoten hinweg, wie es beispielsweise für die Untersuchung von Routing-Protokollen wünschenswert wäre, stößt man überdies an die Grenzen der beschreibbaren und simulierbaren Größe und Komplexität von Modellen.

7 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Internet haben sich eine Reihe von Diensten entwickelt, deren Verkehr wesentlich schwieriger zu modellieren ist als der in klassischen Telekommunikationsnetzen beobachtete. Der größte Anteil des Verkehrs im Internet geht heute auf den

Abruf von Seiten aus dem World Wide Web zurück. Daher ist die Modellierung dieses Dienstes und seines Verkehrs für die Untersuchung von Internet-Systemen von zentraler Bedeutung. Je nach Anforderung an die Modelle gibt es verschiedene Modellierungsebenen, wobei die Aussagekraft von Untersuchungen an Netzmodellen mit modelliertem Verkehr stark davon abhängt, ob die Verkehrsmodelle Rückkopplungen von der beobachteten Übermittlungsgüte zum erzeugten Verkehr berücksichtigen. Diese Eigenschaft unterscheidet Modelle für den heute im Internet beobachteten Verkehr von den oft untersuchten Modellen für netzzustandsunabhängig codierte Audio- und Videostreams.

Ein entsprechendes Modell für Web-Verkehr mit Rückkopplungen zwischen mehreren Modellierungsebenen wurde vorgestellt. Es wurde gezeigt, wie die Modellparameter durch Messungen bestimmt werden können, wobei teilweise eine direkte Messung der Parameter nicht möglich ist, so dass Heuristiken eingesetzt werden müssen.

Die direkte verkehrstheoretische Analyse von Systemmodellen mit komplexen Verkehrsmodellen ist meist nicht möglich. Die Analysen basieren oft auf Annahmen von Exponential- oder geometrischen Verteilungen. Die charakteristischen Größen von Internet-Verkehrsmodellen werden dadurch nur unzureichend modelliert: Die Verteilung von Paketgrößen hat eine starke diskret-multimodale Komponente, während Dateigrößen, Sitzungslängen oder die Anzahl von Elementen in einem Kontext (z.B. Web-Elemente pro Klick oder pro Verbindung) hochvariante Verteilungen besitzen, bei denen Mittelwerte und Varianzen messtechnisch praktisch nicht bestimmbar sind.

Allerdings können auch Simulationen selbst mit aufwendiger Verkehrsmodellierung oft keine statistisch aussagekräftigen Ergebnisse liefern, da die erwähnten hochvarianten Verteilungen zu extrem langen Simulationsdauern führen.

LITERATUR

- [1] M. Arlitt, R. Friedrich, T. Jin. Workload Characterization of a Web Proxy in a Cable Modem Environment. HP Labs Technical Report HPL-1999-48, 990422, 1999, <http://www.hpl.hp.com/techreports/1999/HPL-1999-48.html>
- [2] T. Arnold. Untersuchung der Eignung von PCs als IP-Netzverkehrsmeßgerät. Studienarbeit, Institut für Nachrichtenvermittlung und Datenverarbeitung, Universität Stuttgart, 2001
- [3] Å. Arvidsson, P. Karlsson. On Traffic Models for TCP/IP. In *Proc. ITC 16*, pp. 457–466, Edinburgh, UK, 1999
- [4] P. Barford, M. Crovella. Measuring Web Performance in the Wide Area. *ACM Perf. Eval. Review*, vol. 27, no. 2, pp. 37–48, 1999
- [5] S. Bodamer, J. Charzinski. Evaluation of effective bandwidth schemes for self-similar traffic. In *Proc. ITC Spec. Sem. on IP Traffic*, paper 21, Monterey, CA, USA, 2000
- [6] T. Bray. Measuring the Web. *Computer Networks and ISDN Systems*, vol. 28, no. 13, pp. 994–1005, Paris, France, May 1996. http://www5conf.inria.fr/fich_html/papers/P9/Overview.html
- [7] A. Broder, R. Kumar, F. Maghoul et al. Graph structure in the web. In *Proc. of the 9th International World Wide Web Conference*, Amsterdam, Netherlands, May 2000
- [8] R. Cáceres, N.G. Duffield, A. Feldmann et al. Measurement and analysis of IP network usage and behavior. *IEEE Comm. Mag.*, vol. 38, no. 5, pp. 144–151, May 2000
- [9] J. Charzinski. Measured HTTP Performance and Fun Factors. In *Proc. ITC*, pp. 1063–1074, Salvador, BA, Brasil, 2001
- [10] H.-K. Choi, J.O. Limb. A behavioral Model of Web Traffic. In *Proc. ICNP'99*, Toronto, Canada, 1999, <http://www.cc.gatech.edu/fac/John.Limb/>
- [11] k. claffy. CAIDA: Visualizing the Internet. *Internet Computing Online*, <http://computer.org/internet/v5n1/caida.htm>, 2001
- [12] E. Cohen, H. Kaplan. Prefetching the Means for Document Transfer: A New Approach for Reducing Web Latency. In *Proc. IEEE Infocom*, Tel Aviv, Israel, 2000
- [13] M.E. Crovella, L. Lipsky. Long Lasting Transient Conditions in Simulations with Heavy Tailed Workloads. In *Proc. Winter Simulation Conf.*, Atlanta, GA, USA, pp. 1005–1012, 1997
- [14] M.E. Crovella, R.L. Carter. Dynamic Server Selection in the Internet. In *Proc. IEEE Workshop Arch. and Impl. of High Perf. Comm. Subsys. HPCS*, Mystic, CT, USA, pp. 158–162, Aug. 1995
- [15] M.E. Crovella, A. Bestavros. Self-Similarity in World Wide Web Traffic: Evidence and Possible Causes. *IEEE/ACM Trans. Networking*, vol. 5, No. 6, pp. 835–846, Dec 1997
- [16] F. Douglis, A. Feldmann, B. Krishnamurthy, J.C. Mogul. Rate of Change and other Metrics: a Live Study of the World Wide Web. In *Proc. Usenix Symposium on Internet Technologies and Systems*, Monterey, CA, USA, pp. 147–158, 1997
- [17] A. Feldmann, A.C. Gilbert, W. Willinger. Data networks as cascades: Investigating the multifractal nature of Internet WAN traffic. In *Proc. ACM Sigcomm*, pp. 42–55, Vancouver, B.C., Canada, 1998
- [18] A. Habib, M. Abrams. Analysis of Sources of Latency in Downloading Web Pages. In *Proc. Webnet*, San Antonio, TX, USA, 2000
- [19] H. Hessenmüller, K. Achtmann, J. Charzinski, M. Frank, J. Färber, E. Lehmann, S. Paul, U. Quecke, J. Tölle, W. Zirwas. Das europäische Projekt AMUSE - Der HFR Feldversuch in München. *Fernmeldeingenieur (Sonderheft)*, no. 7/8, Jul./Aug. 1999
- [20] C. Huitema, S. Weerahandi. Internet Measurements: the Rising Tide and the DNS Snag. In *Proc. ITC Spec. Sem. on IP Traffic*, pp. 2.1–2.10, Monterey, CA, USA, 2000
- [21] C. Labovitz, G.R. Malan, F. Jahanian. Internet Routing Instability. In *Proc. ACM Sigcomm*, pp. 115–126, Cannes, France, 1997
- [22] W.E. Leland, M.S. Taqqu, W. Willinger, D.V. Wilson. On the Self-Similar Nature of Ethernet Traffic. In *Proc. ACM Sigcomm*, pp. 183–193, San Francisco, CA, USA, 1993
- [23] Z. Liu, N. Niclause, C. Jalpa-Villanueva, S. Barbier. Traffic Model and Performance Evaluation of Web Servers. research report 3840, INRIA, 1999
- [24] B. Mah. An Empirical Model of HTTP Network traffic. In *Proc. IEEE Infocom'97*, pp. 592–600, Kobe, Japan, 1997
- [25] M. Mathis, J. Semke, J. Mahdavi, T. Ott. The Macroscopic Behavior of the TCP Congestion Avoidance Algorithm. *ACM Comp. Comm. Rev.*, vol. 27, no. 3, pp. 67–82, 1997
- [26] D.A. Menascé, V.A.F. Almeida. Capacity Planning for Web Services. Prentice Hall PTR, Upper Saddle River, NJ, USA, 2002
- [27] J.C. Mogul. Observing TCP Dynamics in Real Networks. *ACM Comp. Comm. Rev.*, vol. 22, no. 4, pp. 305–317, 1992
- [28] V. Paxson, S. Floyd. Why We Don't Know How to Simulate the Internet. In *Proc. Winter Simulation Conf.*, pp. 1037–1044, Atlanta, GA, USA, 1997
- [29] V.N. Padmanabhan, J.C. Mogul. Using Predictive Prefetching to Improve World Wide Web Latency. *ACM Comp. Comm. Rev.*, vol. 26, no. 3, pp. 22–36, 1996
- [30] D. Thie, J. Flohrer. Modellierung des Datenverkehrs von WWW-Clienten. In *Proc. MMB'99*, Trier, Germany, pp. 63–73, 1999
- [31] N. Vicari, S. Köhler, J. Charzinski. The Dependence of Internet User Characteristics on Access Speed. In *Proc. IEEE LCN*, pp. 670–677, Tampa, FL, USA, Nov. 2000
- [32] N. Vicari. Measurement and modeling of WWW sessions: a comparison of Pareto and logarithmic histogram models. In *Proc. 5th Polish Teletraffic Symposium*, Warsaw, Poland, April 1998
- [33] Tcpcdump Homepage. <http://www.tcpcdump.org>
- [34] Ethereal Homepage. <http://www.ethereal.com>
- [35] Selfnet Homepage. <http://www.selfnet.de>