

Abschlussbericht

Diffserv-basierter Multicast zur Dienstgüteunterstützung für E-Learning

im Rahmen des Schwerpunktprogramms Verteilte Verarbeitung
und Vermittlung digitaler Dokumente
– SPP 1041 –

1.1 DFG-Geschäftszeichen

ZI 342/10-1

1.2 Antragsteller

Prof. Dr. Martina Zitterbart, Universitätsprofessorin
Geburtsdatum: 12.5.1963, Nationalität: Deutsch
Potsdamer Ring 46
76344 Eggenstein
E-Mail: zit@tm.uka.de

1.3 Institut/Lehrstuhl

Institut für Telematik, Lehrstuhl Prof. Zitterbart
Universität Karlsruhe (TH)
Postfach 6980
76128 Karlsruhe
Tel. +49 721 608 6411
Fax: +49 721 608 6789
Web: <http://www.tm.uka.de/itm/>

1.4 Thema des Projekts

DSMC – Diffserv-basierter Multicast zur Dienstgüteunterstützung von E-Learning

1.5 Berichtszeitraum, Förderzeitraum insgesamt

Förderzeitraum: 24 Monate
Berichtszeitraum: 1.1.2003–30.6.2005 (kostenneutrale Verlängerung)

1.6 Fachgebiet, Arbeitsrichtung

Praktische Informatik (Computernetze, Internet)

1.7 Anwendungsfelder

E-Learning, Tele-Teaching, Gruppenkommunikation

1.8 Beteiligte Kooperationspartner

keine

2. Zusammenfassung

2.1 Allgemeinverständliche Darstellung

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Dienstgüte für Multicast im Internet bereitzustellen, insbesondere in Bezug auf Anwendungen im Kontext von E-Learning. Dienstgüte (Quality of Service, QoS) bezeichnet im Wesentlichen die konkrete Zusicherung von Bandbreite, Verzögerung und Paketverlust an eine Kommunikationsbeziehung. Unter Multicast versteht man das Senden von Daten an eine Gruppe von Empfängern anstatt an einen einzelnen Empfänger. Konkret wurde im Rahmen des Vorhabens die Bereitstellung von Dienstgüte für Multicast für das Internet angestrebt. Daher sollte soweit wie möglich auf die aktuell standardisierte Dienstgütearchitektur (Diffserv) und auf standardisierte Multicastrooutingprotokolle (PIM-SM) zurückgegriffen werden.

Im Rahmen des Projekts wurde ein triggerbasierter Ansatz für die Bereitstellung von Dienstgüte für IP-Multicast entworfen und prototypisch implementiert. Wesentlich für einen möglichen Einsatz im Internet war es dabei, den Grundsatz „kiss“ (keep it simple and stupid) zu beherzigen, dem alle wichtigen Protokolle im Internet folgen. Der entstandene Entwurf

- ist skalierbar durch nur am Netzrand ausgelöste Trigger,
- ist robust gegenüber (transienten) Inkonsistenzen im Routing und bei Fehlkonfigurationen,
- benötigt keine Modifikationen am für das Internet standardisierten Multicast-Routingprotokoll PIM-SM und
- berücksichtigt das Neglected Reservation Subtree Problem (NRS-Problem).

2.2 Ausblick auf künftige Arbeiten und mögliche Anwendungen

Zukünftige Arbeiten werden versuchen, die in diesem und im Vorgängerprojekt aus Phase 2 dieses Schwerpunktprogramms DiDelBi prototypisch implementierten Verfahren

weiter in den laufenden Standardisierungsprozess der IETF einzubringen. Dazu müssen die von uns entwickelten Konzepte losgelöst werden vom zentralisierten Dienstgütemanagement, wie es in diesem Forschungsvorhaben Anwendung findet, und auf das alternative dezentrale Modell übertragen werden. Die beim dezentralen Modell eingeschränkte Sicht der Managementknoten auf das Netz lässt dabei neue Probleme insbesondere hinsichtlich der Skalierbarkeit aufkommen, die es zu lösen gilt.

Ein weiterer Punkt, der mit dem Arbeitspaket 2 dieses Projekts nur ansatzweise angegangen werden konnte, ist die Standardisierung der Beschreibung von Dienstgüteparametern für die Signalisierung, Voraussetzung für eine internetweite Ende-zu-Ende-Verfügbarkeit von diffservbasierter Dienstgüte.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind von Anwendungen nutzbar, die das Internet als Transportmedium einsetzen und ein Mindestmaß an Dienstgüte erfordern, neben E-Learning beispielsweise VoIP-Telefonkonferenzen, Video-Broadcasting oder Online-Spiele, also alle Gruppenanwendungen mit stringenter Zeitbeziehung. Die weitere Konvergenz von Telefonie, Fernsehen und Internet und damit einhergehende zunehmende Abhängigkeit vom Internet werden nicht nur die benötigten Kapazitäten sondern auch die Qualitätsanforderungen an das Internet deutlich ansteigen lassen. Das derzeitig zur Bereitstellung und zur Sicherstellung von Dienstgüte praktizierte Overprovisioning, also dem Ausnutzen verfügbarer Ressourcen nur zu einem kleinen Bruchteil, sollte deshalb schrittweise durch ein im Rahmen der IETF standardisiertes Dienstgütemanagement abgelöst werden, wozu mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben ein Beitrag geleistet wurde.

3. Arbeits- und Ergebnisbericht

3.1 Ausgangslage

Das heutige Internet arbeitet wie bereits zu seinen Anfängen in den 70er Jahren nach dem so genannten Best Effort Servicemodell. Dies bedeutet, dass alle IP-Datagramme gleich und entsprechend der augenblicklich verfügbaren Ressourcen (Bandbreite, Pufferspeicher) bestmöglich, also mit möglichst geringer Verzögerung und mit möglichst geringem Paketverlust, weitergeleitet werden. Der Kopf des IP-Datagramms enthielt zwar seit Beginn ein Type-of-Service-Feld (TOS) [1], mit dem das IP-Datagramm einer von acht Prioritätsstufen (Precedence) zugeordnet und die Dienstgüte mit verschiedenen abstrakten Parametern wie geringe Verzögerung, hoher Durchsatz oder hohe Zuverlässigkeit spezifiziert werden konnte. Weitverbreitete Verwendung haben jedoch nur die Prioritäten und auch nur zur Absicherung von Routingprotokollen gegen den übrigen Best-Effort-Verkehr gefunden [2].

Ende der 90er wurde mit der Differentiated Services (Diffserv) Architektur [3] die ursprüngliche Idee des TOS-Felds verallgemeinert zum Konzept des Diffserv Codepoints (DSCP) [2], der ein so genanntes Per-Hop Behavior (PHB) selektiert. Damit wurde konkret standardisiert, wie die zu erbringende Dienstgüte mit dem DSCP verknüpft wird und welche konkreten Zusicherungen das selektierte PHB gibt. Diffserv löst die Mitte der 90er Jahre entwickelte Integrated Services (Intserv) Architektur [4] mit ihrem Reservierungsprotokoll RSVP [5] ab, die als nicht hinreichend skalierbar für das Internet angesehen wird.

Diffserv betrachtet jedoch allein den Datenpfad. Es fehlt damit ein standardisiertes Signalisierungsprotokoll vergleichbar zu RSVP. Der Einsatz von Diffserv beschränkt sich daher noch weitgehend auf den Intradomänenfall oder auf statische Konfigurationen zwischen benachbarten Diffservdomänen. Beispiele für eine solche Verwendung von Diffserv sind die Priorisierung von VoIP-Verkehr der netzinternen Kunden bis zum eigenen POTS-Gateway oder die Priorisierung von VPNs, die Firmenkunden zur Vernetzung ihrer verschiedenen Standorte angeboten werden. Die im allgemeinen Internet bereitgestellte Ende-zu-Ende Dienstgüte ist dagegen weiterhin nur Best Effort. Erste Schritte zur Standardisierung der Signalisierung laufen derzeit im Rahmen der IETF-Arbeitsgruppe Next Steps in Signaling (NSIS) [6], an der sich das Institut für Telematik aktiv beteiligt [7]. Jedoch wurden bis zum aktuellen Zeitpunkt noch keine Standards verabschiedet.

Mitte der 80er Jahre wurde von Deering und Cheriton das Multicastservicemodell für das Internet vorgeschlagen [8]. Im Gegensatz zum Unicastmodell werden IP-Datagramme nicht nur an genau einen Zielhost gesendet sondern an eine ganze Gruppe von Hosts. Ein Multicastrooutingprotokoll übernimmt den Aufbau eines Verteilbaums, über den jedes Paket eines Senders vervielfacht und an alle Mitglieder der Multicastgruppe weiterleitet wird [9]. Man unterscheidet zwei Arten von Multicast: Any Source (ASM) und Single Source Multicast (SSM). ASM bezeichnet die n:m-Kommunikation, auch als Multipeer bezeichnet [9], und ist das klassische Servicemodell für Multicast im Internet [10]. Hier können mehrere (n) Hosts IP-Datagramme an eine Multicastgruppe (mit m Empfängern) senden. Die Gruppe wird allein durch die Zieladresse, die Gruppenadresse, gekennzeichnet. SSM bezeichnet die 1:n-Kommunikation und befindet sich gerade in der Standardisierung [11, 12]. Es baut auf der in den 90er Jahren von verschiedenen Autoren [13, 14] vorgeschlagenen Idee auf, die Multicastgruppen senderspezifisch zu machen. Bei SSM kennzeichnet daher erst das als Multicastchannel bezeichnete Tupel aus (Senderadresse, Gruppenadresse) die Multicastgruppe (mit n Empfängern) eindeutig. Nur dieser eine Sender kann an den Multicastchannel senden.

Während beim Unicastrouting der Pfad bereits feststeht, bevor die Kommunikation beginnt, wird durch das Multicastroouting erst durch den Gruppenbeitritt von Empfängern und durch die ersten IP-Datagramme des Senders der Verteilbaum aufgebaut. In der IETF-Arbeitsgruppe Protocol Independent Multicast [15] werden drei Routingprotokolle standardisiert: PIM-SM (Sparse Mode), PIM-DM (Dense Mode) und BIDIR-PIM (Bi-directional). Sie benötigen ein beliebiges (Protocol Independent) Unicast-Routingprotokoll zur Bereitstellung der Topologieinformation (Routen zu Unicastadressen). Die ersten Multicastrooutingprotokolle bestimmten dagegen diese Information selbst (DVMRP [16]) oder erweitern ein Unicastroutingprotokoll und übernehmen damit sowohl das Unicast- wie das Multicastroouting (MOSPF [17]).

Die drei Protokolle der PIM-Familie repräsentieren drei grundsätzlich verschiedene Verfahren des Multicastroutings. PIM-SM [18, 19] verwendet Rendezvousstellen (Rendezvous Points, RP) zur Lokalisation von Sendern und unidirektionale Bäume zum Verteilen der Daten: IP-Datagramme des Senders werden initial im so genannten Register Tunnel zum RP getunnelt und Empfänger werden durch in Richtung des RPs gesendete so genannte Join-Nachrichten an den Verteilbaum angekoppelt. Das Problem der skalierbaren Abbildung von Gruppenadressen auf RPs wird durch so genannte Embedded-RP-Adressen [20] und das Problem des Single Point of Failure und der Verkehrskonzentration am RP durch Anycast RPs [21] gelöst. RPs stellen das jüngste der drei Verfahren dar. PIM-DM [22] arbeitet nach dem ältesten der drei Verfahren: Flood-and-Prune [23]. Darüber hinaus unterstützt PIM-DM so genannte State-Refresh-Nachrichten, die anstelle von Datenpaketen periodisch geflutet werden können und damit den Verbrauch an Bandbreite zur Signalisierung deutlich reduzieren helfen. Bei BIDIR-PIM [24] ersetzt das Konzept des Rendezvous-Point Links (RPL) die Aufgabe des RPs. Die Datenverteilung erfolgt im Unterschied zu den beiden anderen Protokollen der PIM-Familie über bidirektionale Bäume. Daten werden also nicht nur vom RPL zu den Gruppenmitgliedern sondern auch von den Sendern zum RPL über den Baum weitergeleitet. Bidirektionale Bäume wurden erstmals beim Multicast-Routingprotokoll Core Based Trees (CBT) [25] vorgeschlagen und skalieren für Gruppen mit vielen Sendern erheblich besser als PIM-SM oder PIM-DM [26].

Derzeit ist PIM-SM im Internet am weitesten verbreitet implementiert [27]. Es ist zudem das einzige Protokoll der PIM-Familie, das senderspezifischen Join-Zustand und damit Source-Specific Multicast unterstützt. Any-Source Multicast unterstützen alle drei Protokolle. PIM-SM eignet sich gut für Multicastgruppen mit im gesamten Internet verteilten Empfängern, da niemals IP-Datagramme geflutet werden. PIM-DM eignet sich wegen des initialen Flutens von Daten und des periodischen Flutens von State-Refresh-Nachrichten nicht für den internetweiten Einsatz. BIDIR-PIM befindet sich noch in der Standardisierung und wird aufgrund fehlender Erfahrungen vorerst nicht domänenübergreifend eingesetzt. Das zentrale Problem stellt die geeignete Abbildung von Gruppenadressen auf RPLs dar. Im Unterschied zu PIM-SM und PIM-DM wird bereits unabhängig von der Existenz von Multicastgruppen je RPL ein vollstän-

diger (das gesamte Netz umfassender) Spannbaum aufgebaut. Zwar wäre bereits ein einziger RPL hinreichend, jedoch wirkt sich ein ungünstig platzierter RPL nachteilig auf die Ausfallsicherheit und die Ende-zu-Ende-Verzögerung aus. Zu viele RPLs dagegen führen durch die erhöhte Anzahl an Zuständen in den Routern zu Skalierbarkeitsproblemen. Kann eine geeignete Balance zwischen Anzahl an Zuständen einerseits und Ausfallsicherheit/Verzögerung andererseits gefunden werden, ist auch der internetweite Einsatz von BIDIR-PIM denkbar.

3.2 Beschreibung der durchgeführten Arbeiten

Für das Forschungsvorhaben wurden zwei Arbeitspakete beantragt: Die Entwicklung und Evaluierung eines multicastfähigen Dienstgütemanagements und die Auswahl von Diensten und deren Untersuchung hinsichtlich der durch Multicast entstehenden Heterogenität, wobei als Anwendung E-Learning angenommen werden sollte:

- 1.1 Konzipierung von Managementinstanzen zur Unterstützung der Multicastkommunikation
- 1.2 Erarbeiten eines Reservierungsverfahrens für Multicast und Multipeer innerhalb bekannter Gruppen
- 1.3 Evaluierung auf Basis simulativer Experimente
- 2.1 Analyse der QoS-Anforderungen von E-Learning und Abbildung des benötigten Ende-zu-Ende QoS auf geeignete Diffserv PHBs/PDBs
- 2.2 Simulative Untersuchung von Durchsatz, Verlustrate, Delay/Jitter und Netzlast hinsichtlich Heterogenität

Der Schwerpunkt auch vom beantragten zeitlichen Umfang lag auf Arbeitspaket 1.

Arbeitspaket 1: Dienstgütemanagement für Multicast

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden verschiedene Verfahren für die Bereitstellung von Multicast/Multipeer im Internet untersucht. Nativer IP-Multicast (vgl. Ausgangslage) existiert seit mittlerweile über zwei Jahrzehnten und hat außerhalb der Forschergemeinde bisher wenig Verbreitung gefunden. Es wurde deshalb im Rahmen des Forschungsvorhabens versucht, Dienstgüteunterstützung/-management für alternative Multicastverfahren umzusetzen. Diese bieten wie IP-Multicast zur Anwendung hin Multicast/Gruppenkommunikation an, bilden dies jedoch auf den allgemein verfügbaren IP-Unicast ab.

Als vielversprechend gilt Application Level Multicast, das im wesentlichen in zwei Ausprägungen auftritt: Endsystem-Multicast, z. B. Narada [28, 29] oder ALMI [30] sowie infrastrukturunterstützt, z. B. Scattercast/Gosamer [31]. Alle Verfahren bauen zwischen den beteiligten Netzknoten ein Overlaynetz bestehend aus Unicastverbindungen auf. Im Falle von Endsystem-Multicast sind nur die Sender/Empfänger selbst beteiligt, also reines Peer-to-Peer, im Falle von infrastrukturbasiertem Multicast werden die Daten von dedizierten gut angebundenen Knoten dupliziert und verteilt. Weiterhin optimieren diese Verfahren die Topologie des aufgebauten Overlays an Hand von netzlastabhängigen Metriken wie Round-Trip-Time (RTT) oder Durchsatz. Dies ist im Fall von Best Effort als zugrundeliegendem Dienst für IP-Unicast gut geeignet, ist jedoch orthogonal zu unserem Dienstgütemanagement (DiDelBi [32]). Unser Dienstgütemanagement zielt ja gerade auf eine garantierte dauerhafte Verfügbarkeit der angeforderten Ressourcen (Bandbreite, Latenz, Paketverlust) ab, die vor Beginn der eigentlichen Kommunikation über ein Reservierungsprotokoll ausgehandelt werden. Es wurde daher versucht, die RTT- und Durchsatzmessungen durch Signalisierung zum Dienstgütemanagement zu ersetzen, um so die Topologie an der physikalisch minimalen Latenz

und der Bandbreite auszurichten. Dies führt jedoch zu sehr hohem Signalisierungsaufkommen, da diese Daten für eine Vielzahl alternativer Pfade ermittelt werden, um daraus den besten auszuwählen. Es wurde versucht, diese Funktion von der Anwendungsschicht in das Dienstgütemanagement zu übernehmen, um dort das Verfahren zu optimieren. Befinden sich die möglichen Knoten des Verteilbaums innerhalb derselben Domäne, reduziert sich die Signalisierung auf eine Anfrage zum Ressourcenmanager der Domäne, da dieser das Optimum autonom bestimmen kann. Liegen die Knoten in verschiedenen Domänen, ergeben sich Einsparungen, wenn die Anfragen vom Ressourcenmanager sequentiell an Nachbardomänen weitergeleitet werden, beginnend mit der Domäne, über die der voraussichtlich optimale Knoten erreicht wird. So können nachfolgende Anfragen an andere Domänen immer dann eingespart werden, wenn die zugehörigen Knoten über Reservierungsaggregate erreicht werden, die ihrerseits bereits eine schlechtere Metrik aufweisen. Für eine geringe Bearbeitungszeit ist dagegen eine weitgehende Parallelisierung von Signalisierungsvorgängen erforderlich, wie sie auch im Vorgängerprojekt DiDelBi umgesetzt wurde. Das verringerte Signalisierungsaufkommen wird also mit längeren Bearbeitungszeiten erkauft. Es konnte kein schnelles und gleichzeitig hinreichend Signalisierung einsparendes Verfahren gefunden werden, das die zusätzliche Komplexität im Dienstgütemanagement und die Einbuße an Flexibilität für den Application Level Multicast rechtfertigt.

Ein Hauptargument gegen IP-Multicast ist die im Vergleich zu IP-Unicast erhöhte Zustandshaltung in den Routern. Es wurde daher untersucht, wie sich Dienstgüte für Verfahren bereitstellen lässt, die auf eine Zustandsreduzierung abzielen. Vertreter dieser Klasse sind z. B. REUNITE [33] oder Dynamic Tunnel Multicast [34]. Bei dünn besetzten Multicastbäumen treten häufig (vgl. [35] und Referenzen darin) lange so genannte Unimulticastpfade auf, in denen jeder Knoten genau einen Vater- und einen Kindknoten besitzt. Router auf diesen Pfaden können den Multicastzustand vollständig einsparen. REUNITE kennzeichnet dazu eine Gruppe nicht über ihre Gruppenadresse sondern über das Tupel (Unicast-IP-Adresse, Port), Dynamic Tunnel Multicast kapselt (tunnelt) die Multicastdatagramme in Unicastdatagramme. Unimulticastpfade werden dann vom Dienstgütemanagement wie gewöhnliche Unicastreservierungen behandelt. Um das Dienstgütemanagement skalierbar zu halten, wurden in DiDelBi Reservierungen auf AS-/Diffservdomänenebene aggregiert. Sind die Unimulticastpfade auf Routerbene noch relativ lang, ergaben eigene Untersuchungen im Internet, dass diese Pfade auf AS-Ebene, auf dem das Dienstgütemanagement aggregiert, mit überwiegend nur einem überbrückten Zwischensystem zu kurz sind, um Reservierungszustand einsparen zu können. Anstatt das Unicastaggregationsschema zu übernehmen, wurde daher nach einem an diese Verfahren angepassten Aggregationschema gesucht. Eine vergleichbar gute Zustandsreduktion wie im Routing selbst konnte dabei nicht erzielt werden. Ein dienstgüteunterstützter Multicastdienst auf Basis dieser Verfahren ist möglich, die vergleichsweise schlechtere Skalierbarkeit auf Seiten des Dienstgütemanagements verhindert aber, dass die durch diese Verfahren erreichte gute Skalierbarkeit im Routing ausgenutzt werden kann. Limitiert durch das Dienstgütemanagement bringt diese Klasse von Verfahren daher keinen Vorteil gegenüber nativem IP-Multicast.

Letztlich blieb nur, das von uns eingesetzte zentralisierte Dienstgütemanagement auf nativen IP-Multicast anzuwenden, trotz der immer noch geringen Verbreitung im Internet und trotz der als Gegenargument vorgebrachten aufwendigen Zustandshaltung und damit einhergehenden schlechten Skalierbarkeit von IP-Multicast. Der Aufbau von Multicastrooutingzustand erfolgt im Gegensatz zum Unicastroouting nicht (nur) mit dem Erkennen von Nachbarroutern, sondern im wesentlichen erst mit dem Gruppenbeitritt von Empfängern sowie durch Datenpakete (vgl. Ausgangslage). Ein stabiles Routing, also wenige Änderungen der Netzwerktopologie pro Zeiteinheit, sind jedoch Voraussetzung, damit das Dienstgütemanagement die Ressourcenverfügbarkeit für längere Zeit garantieren kann. Nach einer Routingänderung wird im Falle von Unicast im allgemeinen die alte Reservierung abgebrochen und eine neue aufgebaut, die jedoch aufgrund von Ressourcenknappheit fehlschlagen kann. Denn die Ressourcenverfügbarkeit kann erst überprüft und vor allem die Ressourcenzuteilung in den Routern kann erst konfiguriert werden, wenn das Routing feststeht. Um Routingänderungen bei bestehender

Reservierung zu kontrollieren, muss das Dienstgütemanagement direkt in das Multicasting eingreifen. Damit könnte das unter DiDelBi für Unicast entwickelte Reservierungsverfahren mit einer Erweiterung zur Beschreibung von Multicastpfaden direkt übernommen werden. Der direkte Eingriff in das Multicasting ist jedoch aufwendig, wenig robust und widerspricht dem universellen „kiss“-Prinzip des Internets. Erlaubt man aber eine Abschwächung des Garantiebegriffs und betrachtet Routingänderungen bei Multicast wie jene bei Unicast als unvorhersehbar (was sie eigentlich nicht sind), erlaubt dies, auf Änderungen im Multicastverteilbaum zu reagieren anstatt proaktiv das Multicasting kontrollieren zu müssen. So konnte das Konzept der im Abschnitt 3.3 beschriebenen triggerbasierten Dienstgüteunterstützung entwickelt werden, das sich im Wesentlichen durch seine Einfachheit auszeichnet.

Arbeitspaket 2: Diffserv PHBs/PDBs

Die in Phase 2 des Schwerpunktprogramms V3D2, Teilprojekt DiDelBi [32] entworfenen Diffservdienste wurden zu Beginn des Forschungsvorhabens DSMC noch weiter untersucht [36, 37]. Da das Arbeitspaket 1 deutlich mehr Zeit in Anspruch nahm als eingeplant, konnten für die nicht am Institut entwickelten Diffservdienste EF und AF keine Untersuchungen mehr durchgeführt werden.

3.3 Darstellung der erzielten Ergebnisse

Arbeitspaket 1: Dienstgütemanagement für Multicast

Es wurde das Konzept der triggerbasierten Bereitstellung von Dienstgüte für IP-Multicast entworfen und für das im Internet am weitesten verbreitete Multicastingprotokoll PIM-SM prototypisch implementiert. Die Implementierung basiert auf XORP [38], der nach unserem Wissen einzigen frei verfügbaren PIM-SM-Implementierung nach dem aktuellen Standard [19]. Das Multicasting selbst wurde nicht verändert, so dass die Kompatibilität mit nicht modifizierten (legacy) Multicastingroutern erhalten bleibt und ein inkrementeller Einsatz möglich ist.

Das Verfahren verwendet einen ausgezeichneten Diffserv Codepoint (DSCP), im Folgenden als LE_u bezeichnet, um neue Teilbäume zu erkennen. Anfangs werden – unabhängig von der tatsächlich vom Sender angeforderten Dienstgüte und dem zugehörigen DSCP – alle IP-Datagramme mit LE_u markiert. Treten neue Empfänger der von diesem Sender bedienten Multicastgruppe bei, triggert spätestens die Weiterleitung eines mit LE_u markierten IP-Datagramms durch den so genannten Designated Router (DR) eines Empfängers eine Nachricht an das Dienstgütemanagement. Das Dienstgütemanagement wird repräsentiert durch einen so genannten Domain Resource Manager (DRM), von dem je Diffservdomäne (mindestens) einer existiert. Der DRM kann daraufhin entsprechend dem vom Sender angeforderten Dienst in den betroffenen Grenzurtern der von ihm verwalteten Domäne den Verkehr des Senders freigeben und DRMs benachbarter Domänen informieren. Es werden so nach und nach alle Grenzurter auf dem Multicastbaum aufwärts Richtung Rendezvous Point bzw. Sender umkonfiguriert, bis schließlich auch im ersten Router nach dem Sender (First Hop Router, FHR) der Verkehr freigegeben und der eigentlich dem angeforderten Dienst entsprechende DSCP verwendet wird. Ab diesem Zeitpunkt steht die angeforderte Dienstgüte tatsächlich bereit. Im Gegensatz zu Unicastreservierungen sind die garantierten Ressourcen damit erst kurz nach Beginn der Kommunikation verfügbar. Gleiches gilt, wenn der Verteilbaum vom Multicasting optimiert wird, was typischerweise nach dauerhaftem Überschreiten einer gewissen Mindestsenderate erfolgt, so dass die für die Optimierung nötige zusätzliche Zustandshaltung und Signalisierung sinnvoll eingesetzt ist. Auch hier wird für eine kurze Übergangszeit der eigentlich garantierte Dienst vom Netz nicht voll erbracht. Da diese Optimierung jedoch nur einmal je Empfänger auftritt (genauer: je einmal pro Tupel (Sender, Gruppenadresse, DR)), ist im Gegensatz zu Unicast für zwei kurze Zeitspannen von einigen wenigen zehntel Sekunden die Dienstqualität gemindert. Die in diesem Forschungsvorhaben entworfene Dienstgüteunterstützung erbringt damit

zwar eine gegenüber der Dienstgüteunterstützung für Unicast aus dem Vorgängerprojekt DiDelBi leicht abgeschwächte Dienstgarantie, bleibt dadurch jedoch einfach und vermeidet den Eingriff in das Multicastrouting.

Das entworfene Verfahren ist robust gegenüber Änderungen bzw. Inkonsistenzen im Unicastrouting, da Router anhand des ausgezeichneten DCSPs auch eine Fehlkonfiguration entdecken und ihrem DRM melden können, der daraufhin einen konsistenten Zustand wiederherstellen kann. Das NRS-Problem wird dadurch gelöst, dass nicht vom DRM kontrollierte Vervielfältigungen von IP-Datagrammen, also ohne explizite Freigabe, auf LE_u ummarkieren, z. B. bei Empfängern in Netzabschnitten mit legacy Routern. Um übrige Dienstklassen vor diesem Verkehr zu schützen, werden mit LE_u markierte IP-Datagramme wie jene des Limited-Effort-Dienstes behandelt.

Die prototypische Implementierung setzt beim Multicastforwarding auf das in Unix-Betriebssystemen übliche Verfahren auf, bei der je Tupel (Senderadresse, Gruppenadresse) eine Struktur abgelegt wird, die bestimmt, an welche Ausgangsinterfaces ein eintreffendes IP-Datagramm weitergeleitet werden soll. Dies wurde so modifiziert, dass mit LE_u markierte IP-Datagramme erkannt und je nach Konfiguration für dieses Tupel eine Nachricht an den DRM getriggert werden kann. Fehlt eine spezielle Konfiguration, wird per Default alles außer Best Effort auf LE_u ummarkiert und eine Nachricht an den DRM getriggert, damit dieser eine Konfiguration bereitstellen kann.

Arbeitspaket 2: Diffserv PHBs/PDBs

Im Rahmen von Diffserv wurden bisher Expedited Forwarding (EF) [39], Assured Forwarding (AF) [40] und das am Institut entwickelte Lower Effort (LE) [41] standardisiert. Daneben wurden von uns Quick Forwarding (QF) [42] und Best Effort Low Delay (BELD) [43] vorgeschlagen.

Für E-Learning-Anwendungen sind folgende Dienste sinnvoll:

- Expedited Forwarding für Chat (Audio/Video)
- Assured Forwarding für Streaming (Audio/Video)
- Lower Effort für Dateitransfer im Hintergrund (z. B. Lernmaterial) und Push-Dienste (Updates)
- Quick Forwarding für Whiteboard, Instant Messaging/Text-Chat und Präsenzprotokolle (Benachrichtigung über Anwesenheit/Abwesenheit)
- Best Effort Low Delay kann anstatt von Quick Forwarding für schmalbandig/drahtlos angebundene Endgeräte verwendet werden, jedoch unter Aufgabe der garantierten Zuverlässigkeit von Quick Forwarding.

Für EF und AF wurden aufgrund von Zeitmangel keine Untersuchungen durchgeführt.

Hintergrundverkehr ist zeitunkritisch. Der durch Limited Effort bereitgestellte Dienst an sich ist damit weniger relevant als der negative Einfluss von LE auf die übrigen Dienste. In [41] wurde gezeigt, dass dieser Einfluss gering ist, also ressourcenintensiver jedoch zeitunkritischer Verkehr mittels LE gut gegen den übrigen Verkehr abgeschottet werden kann.

Für transaktionsorientierten Verkehr, wie er bei Chat-/Instant-Messaging-Anwendungen auftritt, wurde in [37] gezeigt, dass die Bursthaftigkeit von QF-Verkehr trotz Verkehrskontrolle und -formung an den Domänengrenzen auch über mehrere (fünf; typische AS-Pfadlänge im Internet, vgl. [44]) Domänen hinweg weitgehend erhalten bleibt. Der Anteil verzögerter IP-Datagramme wächst nur unwesentlich um wenige Prozent an. Die Heterogenität bei QF wird daher weitgehend von der nicht vermeidbaren physikalisch vorgegebenen (geographische Distanz) Ende-zu-Ende-Verzögerung bestimmt.

BELD nutzt brachliegende Kapazitäten von EF. Jedoch zeigt sich mit zunehmender Anzahl an Hops ein immer größer werdender Paketverlust. Neben dem parallel dazu zunehmenden negativen Einfluss auf Expedited Forwarding (wachsende Paketverzögerung) macht dies den Einsatz von BELD nur am Netzrand auf dem letzten Hop eines Schmalband-Internetzugangs oder in schmalbandigen drahtlosen Netzen sinnvoll, wo neben EF, AF und Best Effort nicht genügend Kapazitäten für QF zur Verfügung gestellt werden können oder sollen. Im Netzinneren wird BELD auf QF abgebildet, so dass infolgedessen bei BELD dieselbe Heterogenität wie bei QF auftritt.

3.4 Ausblick auf zukünftige Arbeiten

Die prototypische Implementierung verwendet das unter Unix übliche Verfahren zum Multicastforwarding, das auf Ein-Prozessor-Systeme zugeschnitten ist. Hochleistungsrouter verwenden dagegen typischerweise je eine CPU pro Linecard/Interface. Die Übertragbarkeit des triggerbasierten Konzepts auf eine verteilte Multicastforwardingarchitektur wie z. B. Input-Output-Filter [45] wäre zu untersuchen.

Sollte sich IP-Multicast, insbesondere in Form von Any Source Multicast, im Internet weiter verbreiten, wird wegen seiner besseren Skalierbarkeit BIDIR-PIM an Bedeutung gewinnen. Ob und wie sich das hier entwickelte triggerbasierte Konzept von PIM-SM auf BIDIR-PIM übertragen lässt oder ob für BIDIR-PIM ein neues Verfahren entwickelt werden muss, wäre zu untersuchen.

Derzeit am Lehrstuhl laufende Vorarbeiten [46, 47] bilden die Grundlage, um die eigenen Signalisierungsprotokolle auf die sich im Standardisierungsprozess befindlichen Protokolle GIMPS und QoS-NSLP [48, 49] abzubilden. Diese Protokollsuite ist derzeit aber in verschiedenen Bereichen noch nicht hinreichend mächtig: Neben offenen Fragen bei der Dienstbeschreibung (vgl. Arbeitspaket 2) ist vor allem die Aggregation von Reservierungen über Domänengrenzen hinweg noch überhaupt nicht vorgesehen. Hier besteht Forschungsbedarf, da ohne starke Aggregationsmechanismen keine für das gesamte Internet skalierbare Lösung erreichbar ist und ein Scheitern parallel zu RSVP unausweichlich scheint. Die institutseigenen Arbeiten aus früheren Forschungsvorhaben haben zwar mögliche Aggregationschemata aufgezeigt, die dabei eingesetzte zentralisierte Struktur und Entkopplung der Signalisierung vom Datenpfad wird von der Standardisierung jedoch als nicht allgemein genug empfunden. Möglichkeiten der Aggregation bei einer direkten an den Datenpfad gekoppelten Signalisierung wären daher zu untersuchen.

3.5 Interdisziplinäre Weiterentwicklung

In diesem Forschungsvorhaben wurden ausschließlich Probleme der Computerkommunikation im Internet betrachtet. Die Forschung in weiteren Disziplinen wurde daher nicht direkt tangiert. Wohl aber können andere Disziplinen, die das Internet als Kommunikationsmedium nutzen, von einer über das derzeitige Servicemodell Best Effort hinausgehenden Dienstgüte profitieren. Gegebenenfalls werden durch die Bereitstellung garantierter Dienste erst neue Anwendungen möglich oder vorhandene Anwendungen auf das Internet übertragbar.

3.6 Anwendung

Neben der Mitarbeit in der IETF bei der Standardisierung fand keine Industriekooperation bzw. industrielle Verwertung statt. Es wurden keine Patente beantragt. Allgemein sind Patente auf zu standardisierende Verfahren hinderlich und werden von der IETF daher abgelehnt bzw. es werden frei verfügbare Verfahren auch bei schlechterer Qualität besseren aber nicht frei verfügbaren Verfahren vorgezogen.

3.7 Beteiligte Wissenschaftler

Beteiligte wissenschaftliche Mitarbeiter

Mark Doll Institut für Telematik, Lehrstuhl Prof. Zitterbart. BAT IIa für 24 Monate, bezahlt aus Mitteln dieses DFG-Projekts.

Relevante Beiträge zu diesem Forschungsvorhaben:

- Konzept der triggerbasierten Dienstgüteunterstützung für Multicast
- Prototypische Implementierung unter XORP [38]

Dr. Roland Bless Institut für Telematik, Lehrstuhl Prof. Zitterbart

Relevante Beiträge zu diesem Forschungsvorhaben:

- Neglegted Reservation Subtree-Problem [50]
- Lower Effort PDB [41]

3.8 Weiterqualifikation

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden insgesamt fünf Diplomarbeiten und eine Studienarbeit durchgeführt, drei weitere Diplomarbeiten laufen noch (vgl. Abschnitt 4.4).

Literatur

- [1] JON POSTEL: *Internet Protocol*. RFC 791 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc791.txt>, September 1981.
- [2] KATHLEEN NICHOLS, STEVEN BLAKE, FRED BAKER und DAVID L. BLACK: *Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers*. RFC 2474 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc2474.txt>, Dezember 1998.
- [3] STEVEN BLAKE, DAVID L. BLACK, MARK A. CARLSON, ELWYN DAVIES, ZHENG WANG und WALTER WEISS: *An Architecture for Differentiated Services*. RFC 2475 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc2475.txt>, Dezember 1998.
- [4] BOB BRADEN, DAVID CLARK und SCOTT SHENKER: *Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview*. RFC 1633 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc1633.txt>, Juni 1994.
- [5] BOB BRADEN, DAVID CLARK und SCOTT SHENKER: *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification*. RFC 2205 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc2205.txt>, September 1997.
- [6] *IETF Working Group Next Steps in Signaling (nsis)*. <http://www.ietf.org/html.charters/nsis-charter.html>.
- [7] *NSIS Discussion Archive*. <http://www.ietf.org/mail-archive/web/nsis/>.
- [8] DAVID R. CHERITON und STEPHEN E. DEERING: *Host groups: A Multicast Extension for Datagram Internetworks*. In: *SIGCOMM '85: Proceedings of the ninth symposium on Data communications*, Seiten 172–179, 1985.
- [9] RALPH WITTMANN und MARTINA ZITTERBART: *Multicast: Protokolle und Anwendungen*. dpunkt, Heidelberg, 1999.
- [10] STEVE E. DEERING: *Host extensions for IP multicasting*. RFC 1112 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc1112.txt>, August 1989.
- [11] *IETF Working Group Source Specific Multicast (ssm)*. <http://www.ietf.org/html.charters/ssm-charter.html>.

- [12] HUGH HOLBROOK und BRAD CAIN: *Source-Specific Multicast for IP*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-ssm-arch-06.txt>, September 2004.
- [13] HUGH W. HOLBROOK und DAVID R. CHERITON: *IP multicast channels: EXPRESS Support for Large-scale Single-source Applications*. In: *SIGCOMM '99: Proceedings of the conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communication*, Seiten 65–78, New York, NY, USA, 1999. ACM Press.
- [14] RADIA PERLMAN, CHENG-YIN LEE, TONY BALLARDIE, JON CROWCROFT, ZHENG WANG, THOMAS MAUFER, CHRISTOPHE DIOT JOSEPH THOO und MARK GREEN: *Simple Multicast: A Design for Simple, Low-Overhead Multicast*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.watersprings.org/pub/id/draft-perlman-simple-multicast-03.txt>, Oktober 1999.
- [15] *IETF Working Group Protocol Independent Multicast (pim)*. <http://www.ietf.org/html.charters/pim-charter.html>.
- [16] DISTANCE VECTOR MULTICAST ROUTING PROTOCOL: *Distance Vector Multicast Routing Protocol*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-idmr-dvmrp-v3-11.txt>, Oktober 2003.
- [17] JOHN MOY: *Multicast Extensions to OSPF*. RFC 1584 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc1584.txt>, März 1994.
- [18] STEPHEN DEERING, DEBORAH ESTRIN, DINO FARINACCI, VAN JACOBSON, CHING-GUNG LIU und LIMING WEI: *An Architecture for Wide-Area Multicast Routing*. In: *SIGCOMM '94: Proceedings of the conference on Communications architectures, protocols and applications*, Seiten 126–135, New York, NY, USA, 1994. ACM Press.
- [19] BILL FENNER, MARK HANDLEY, HUGH HOLBROOK und ISIDOR KOUVELAS: *Protocol Independent Multicast - Sparse Mode (PIM-SM): Protocol Specification (Revised)*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-sm-v2-new-11.ps>, Oktober 2004.
- [20] PEKKA SAVOLA und BRIAN HABERMAN: *Embedding the Rendezvous Point (RP) Address in an IPv6 Multicast Address*. RFC 3956 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3956.txt>, November 2004.
- [21] DINO FARINACCI und YIQUN CAI: *Anycast-RP using PIM*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-anycast-rp-03.txt>, April 2005.
- [22] *Protocol Independent Multicast - Dense Mode (PIM-DM): Protocol Specification (Revised)*. RFC 3973 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3973.txt>, Januar 2005.
- [23] STEPHEN E. DEERING und DAVID R. CHERITON: *Multicast Routing in Datagram Internetworks and Extended LANs*. *ACM Transactions on Computer Systems (TOCS)*, 8(2):85–110, 1990.
- [24] MARK HANDLEY, ISIDOR KOUVELAS, TONY SPEAKMAN und LORENZO VICISANO: *Bi-directional Protocol Independent Multicast (BIDIR-PIM)*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-bidir-07.ps>, Juli 2004.
- [25] TONY BALLARDIE, PAUL FRANCIS und JON CROWCROFT: *Core based trees (CBT)*. In: *SIGCOMM '93: Conference proceedings on Communications architectures, protocols and applications*, Seiten 85–95, New York, NY, USA, 1993. ACM Press.
- [26] T. BILLHARTZ, J. BIBB CAIN, ELLEN FARREY-GOUDREAU, DOUG FIEG und STEPHEN GORDON BATSELL: *Performance and Resource Cost Comparisons for the CBT and PIM Multicast Routing Protocols*. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications (JSAC)*, 15(3):304–315, April 1997.
- [27] TOM PUSATERI: *PIM Sparse-Mode IETF Proposed Standard Requirements Analysis*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-pim-proposed-req-01.txt>, Februar 2005.
- [28] YANG-HUA CHU, SANJAY G. RAO und HUI ZHANG: *A Case for End System Multicast*. In: *Proceedings of the 2000 ACM SIGMETRICS international conference on Measurement and modeling of computer systems*, Seiten 1–12, New York, NY, USA, 2000. ACM Press.

- [29] YANG CHU, SANJAY RAO, SRINIVASAN SESHAN und HUI ZHANG: *Enabling conferencing applications on the internet using an overlay multicast architecture*. In: *SIGCOMM '01: Proceedings of the 2001 conference on Applications, technologies, architectures, and protocols for computer communications*, Seiten 55–67, New York, NY, USA, 2001. ACM Press.
- [30] DIMITRIS PENDARAKIS, SHERLIA SHI, DINESH VERMA und MARCEL WALDVOGEL: *ALMI: An Application Level Multicast Infrastructure*. In: *Proceedings of the 3rd USNIX Symposium on Internet Technologies and Systems (USITS '01)*, Seiten 49–60, San Francisco, CA, USA, März 2001.
- [31] YATIN DILIP CHAWATHE: *Scattercast: An Architecture for Internet Broadcast Distribution as an Infrastructure Service*. Doktorarbeit, University of California at Berkeley, 2000.
- [32] MARK DOLL: *Abschlussbericht: Differentiated Services zum Abruf digitaler Dokumente aus elektronischen Bibliotheken – DiDelBi*. <http://doc.tm.uka.de/2003/doll-DiDelBi-Abschlussbericht2003.pdf>, Juni 2003.
- [33] ION STOICA, T. S. EUGENE NG und HUI ZHANG: *REUNITE: A Recursive Unicast Approach to Multicast*. In: *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Band 3, Seiten 1644–1653. IEEE, März 2000.
- [34] JINING TIAN und GERALD NEUFELD: *Forwarding State Reduction for Sparse Mode Multicast Communication*. In: *INFOCOM '98. Seventeenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Band 2, Seiten 711–719. IEEE, März 1998.
- [35] ROBERT C. CHALMERS und KEVIN C. ALMEROOTH: *On the Topology of Multicast Trees*. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 11(1):153–165, 2003.
- [36] JUAN CARLOS MAUREIRA BRAVO: *Evaluation of a Burst Friendly Treatment for Quick Forwarding PHB*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Juni 2003.
- [37] TOBIAS KÜFNER: *Entwurf und Evaluierung eines Per-Domain Behaviors zur Unterstützung transaktionsorientierter Kommunikationsbeziehungen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Juli 2003.
- [38] *Extensible Open Router Platform (XORP)*. <http://www.xorp.org/>.
- [39] BRUCE DAVIE, ANNA CHARNY, JON BENNETT, KENT BENSON, JEAN-YVES LE BOUDEC, BILL COURTNEY, SHAHRAM DAVARI, VICTOR FIROIU und DIMITRIOS STILIADIS: *An Expedited Forwarding PHB (Per-Hop Behavior)*. RFC 3246 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3246.txt>, März 2002.
- [40] JUHA HEINANEN, FRED BAKER, WALTER WEISS und JOHN WROCLAWSKI: *Assured Forwarding PHB Group*. RFC 2597 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc2597.txt>, Juni 1999.
- [41] ROLAND BLESS, KATHLEEN NICHOLS und KLAUS WEHRLE: *A Lower Effort Per-Domain Behavior (PDB) for Differentiated Services*. RFC 3662 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3662.txt>, Dezember 2003.
- [42] TOBIAS KÜFNER, MARK DOLL, GÖTZ LICHTWALD und MARTINA ZITTERBART: *Speeding up Transaction-oriented Communications in the Internet*. In: *Proceedings of INFORMATIK 2004 – Informatik verbindet, Band 2*, September 2004. 34. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e. V. (GI) 20. – 24. September 2004, Ulm, Germany.
- [43] JÖRG DIEDERICH, MARK DOLL und MARTINA ZITTERBART: *Best-Effort Low-Delay Service*. In: *28th Conference on Local Computer Networks (LCN 2003), Bonn, Germany*. IEEE, Oktober 2003.
- [44] ROLAND BLESS: *Integriertes Management qualitätsbasierter Internetkommunikationsdienste*. Doktorarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2002.
- [45] DAVID THALER und MARK HANDLEY: *On the Aggregatability of Multicast Forwarding State*. In: *INFOCOM 2000. Nineteenth Annual Joint Conference of the IEEE Computer and Communications Societies*, Band 3, Seiten 1654–1663. IEEE, März 2000.
- [46] THOMAS HERZOG: *Implementierung des NTLF-Protokolls*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2005. (noch laufend).

-
- [47] MARKUS OTT: *Implementierung des QoS NSLP Protokolls*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2005. (noch laufend).
- [48] HENNING SCHULZRINNE und ROBERT HANCOCK: *GIMPS: General Internet Messaging Protocol for Signaling*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-nsis-ntlp-07.txt>, Juli 2005.
- [49] JUKKA MANNER, SVEN VAN DEN BOSCH, GEORGIOS KARAGIANNIS und ANDREW McDONALD: *NSLP for Quality-of-Service signalling*. Internet Draft, Work in Progress – <http://www.ietf.org/internet-drafts/raft-ietf-nsis-qos-nslp-07.txt>, Juli 2005.
- [50] ROLAND BLESS und KLAUS WEHRLE: *IP Multicast in Differentiated Services (DS) Networks*. RFC 3754 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3754.txt>, April 2004.

4. Publikationen

4.1 Publikationen in Fachzeitschriften

KEINE.

4.2 Kongressbeiträge

- [1] JÖRG DIEDERICH, MARK DOLL und MARTINA ZITTERBART: *Best-Effort Low-Delay Service*. In: *28th Conference on Local Computer Networks (LCN 2003)*, Bonn, Germany. IEEE, Oktober 2003.
- [2] TOBIAS KÜFNER, MARK DOLL, GÖTZ LICHTWALD und MARTINA ZITTERBART: *Speeding up Transaction-oriented Communications in the Internet*. In: *Proceedings of INFORMATIK 2004 – Informatik verbindet, Band 2*, September 2004. 34. Jahrestagung der Gesellschaft für Informatik e. V. (GI) 20. – 24. September 2004, Ulm, Germany.
- [3] ROLAND BLESS und MARK DOLL: *Integration of the FreeBSD TCP/IP-stack Into the Discrete Event Simulator OMNeT++*. In: *Winter Simulation Conference 2004*, Washington, D. C., USA, Seiten 1556–1561, Dezember 2004.

4.3 Buchbeiträge

KEINE.

4.4 Studien- und Diplomarbeiten, Dissertationen, Habilitationen, Berichte, sonstige Publikationen

- [1] HANS-CHRISTOPH ANDERSEN: *OSPF-Anbindung eines Ressourcenmanagers*. Studienarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, August 2005.
- [2] JUAN CARLOS MAUREIRA BRAVO: *Evaluation of a Burst Friendly Treatment for Quick Forwarding PHB*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Juni 2003.

-
- [3] TOBIAS KÜFNER: *Entwurf und Evaluierung eines Per-Domain Behaviors zur Unterstützung transaktionsorientierter Kommunikationsbeziehungen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Juli 2003.
 - [4] JÉRÔME FREILINGER: *TCP für OMNeT++*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, März 2004.
 - [5] CHRISTIAN KNIERIM: *Dienstgüteunterstützung für Gruppenkommunikation im Internet*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, März 2004.
 - [6] ANDREAS KRAMM: *Entwurf und Implementierung eines First-Hop-Routers mit dynamisch ladbaren Profilen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, Oktober 2004.
 - [7] THOMAS HERZOG: *Implementierung des NTLF-Protokolls*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2005. (noch laufend).
 - [8] MARKUS OTT: *Implementierung des QoS NSLP Protokolls*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2005. (noch laufend).
 - [9] CHRISTIAN WAGNER: *Untersuchung von Ressourcenzuteilungsstrategien für aggregierte Reservierungen*. Diplomarbeit, Universität Karlsruhe (TH), Germany, 2005. (noch laufend).
 - [10] ROLAND BLESS, KATHLEEN NICHOLS und KLAUS WEHRLE: *A Lower Effort Per-Domain Behavior (PDB) for Differentiated Services*. RFC 3662 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3662.txt>, Dezember 2003.
 - [11] ROLAND BLESS und KLAUS WEHRLE: *IP Multicast in Differentiated Services (DS) Networks*. RFC 3754 – <http://www.ietf.org/rfc/rfc3754.txt>, April 2004.