



# **Signalisierung und Abrechnung von Dienstgüte in einem dienste-integrierenden Internet mittels RSVP**

Deutsche Zusammenfassung der Dissertationsschrift  
vorgelegt am Fachbereich Informatik  
der Technischen Universität Darmstadt von

**Diplom-Wirtschaftsinformatiker Martin Karsten**

geboren am 10.07.1971 in Kempen-Hüls, jetzt Krefeld

zur Erlangung des Grades eines  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Darmstadt 2000  
Hochschulkennziffer D17

Vorsitz: Prof. Dr. Wolfgang Henhapl  
Erstreferent: Prof. Dr. Ralf Steinmetz  
Korreferent: Prof. Dr. David Hutchison (Lancaster University, UK)

Tag der Einreichung: 15. Mai 2000  
Tag der Disputation: 5. Juli 2000



## Kapitel 1: Einführung

Im ersten Kapitel werden die grundsätzlichen Ziele sowie der Aufbau der Dissertation vorgestellt. Innerhalb der Arbeitsgruppen der *Internet Engineering Task Force* (IETF) wurden in den letzten Jahren verschiedene Vorschläge für die Unterstützung von zuverlässiger *Dienstgüte* (*Quality of Service, QoS*) in paketvermittelten Netzen entwickelt. Durch die jeweiligen Vor- und Nachteile und die daher zu erwartende Unterschiedlichkeit von tatsächlichen Dienstgüte-Technologien für ein zukünftiges dienste-integrierendes Internet, ist ein einheitlicher Signalisierungsmechanismus notwendig, um die Dienstanforderungen von Endsystemen entlang des gesamten Übertragungspfades zu übermitteln. Ein solcher Signalisierungsmechanismus muß dann auch die Möglichkeit umfassen, Abrechnungsinformationen auszutauschen. In dieser Arbeit wird im Wesentlichen die Eignung des *Resource Reservation Protocols* (RSVP) als Signalisierungsmechanismus für diesen Zweck untersucht. Hierzu ist es notwendig, sowohl die technischen als auch die abrechnungsrelevanten Eigenschaften konzeptionell und experimentell zu evaluieren. Ein Hauptziel dieser Arbeit ist es, möglichst flexible Mechanismen vorzuschlagen und zu untersuchen, nicht jedoch die Ausarbeitung von optimalen Strategien, beispielsweise zur Preisfindung. Weiterhin ist ein entscheidendes Ziel die weitmöglichste Anwendung von standardisierten Technologien.

### **Aufbau der Arbeit**

Die Arbeit gliedert sich in 7 Kapitel. Im zweiten Kapitel wird die Motivation für den Untersuchungsgegenstand, sowie Ziele und Methoden der Arbeit dargestellt. Kapitel 3 erläutert technische und ökonomische Grundlagen. Im Anschluß daran wird in Kapitel 4 die Architektur eines flexiblen Signalisierungssystems von Dienstgüteanforderungen beschrieben, basierend auf einer erweiterten Version von RSVP. Die technischen Eigenschaften von RSVP werden in Kapitel 5 eingehend untersucht. Diese Untersuchung benutzt auf einer neuen Implementierung, basierend auf einem innovativen Design. Kapitel 6 befaßt sich mit den ökonomischen Anforderungen an ein dienste-integrierendes Internet. Es werden Kalkulationsmodelle und Abrechnungsmechanismen vorgestellt und auf Anwendbarkeit überprüft. Die Arbeit wird in Kapitel 7 mit der Zusammenstellung der wichtigsten Ergebnisse sowie einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten abgeschlossen. In den Anhängen werden spezielle Aspekte und Grundlagen erklärt, die aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht in den Hauptteil der Arbeit aufgenommen wurden.

## Kapitel 2: Motivation

Dieses Kapitel beschreibt die grundlegende Motivation für die Auswahl der Untersuchungsgegenstände dieser Arbeit, sowie für deren Ziele und Methoden. Die Vision für die Arbeit an Signalisierung für Dienstgüte im Internet ist gegeben durch die Aussicht, derzeit existierende unterschiedliche Netzinfrastrukturen (z.B. Telefon und Kabelfernsehen) in der Zukunft durch ein einziges Netz, basierend auf dem *Internet Protocol* (IP), zu ersetzen. Ein solches integriertes Netz verspricht eine höhere ökonomische Effizienz durch Skalierungseffekte. Die entscheidende offene Frage ist die nach der optimalen Technologie zur Bereitstellung unterschiedlichster Dienste. Hierfür liegen eine Reihe von Vorschlägen vor, die jedoch derzeit nicht abschließend bewertet werden. Ein entscheidender Faktor bei der Bewertung ist die Zusammensetzung der Nachfrage für ein solches Netz. Hierbei kann zwischen *elastischen* und *inelastischen* Anwendungen unterschieden werden. Falls beide Arten von Anwendungen in einer signifikanten Menge auftreten, erscheint die Verwendung einer paketvermittelten Netzintegrationsschicht in Kombination mit speziellen Mechanismen zur Sicherstellung von Dienstgüte für inelastische Verkehrsflüsse sinnvoll. Eine zweite Herausforderung für die Entwicklung des Internets ergibt sich durch, in diesem Kontext bisher unbekannte, kommerzielle Anforderungen an den grundlegenden Kommunikationsdienst.

Durch die resultierende Unterschiedlichkeit der jeweils gewählten Technologien, ergibt sich die Notwendigkeit einer einheitlichen Signalisierungsarchitektur zur Aushandlung von Ende-zu-Ende-Diensten. Dies wird so auch vom *Internet Architecture Board* beschrieben. Da die bisherigen Standardisierungsvorschläge noch nicht ausreichend untersucht wurden, ist es wichtig, diese einer eingehenden Prüfung zu unterziehen, bevor neue Mechanismen entwickelt werden. Das einzig derzeit relevante Protokoll ist RSVP.

Es ist nicht praktikabel, technische Alternativen zur Bereitstellung von Dienstgüte abschließend zu bewerten. Insbesondere entzieht die hohe Komplexität der Fragestellung bei nur unvollständig vorhandener Information den globalen Einsatz von derartigen Technologien einer vollständigen mathematischen oder experimentellen Analyse. Daher werden in dieser Arbeit konstruktive Vorschläge für die Verwendung von RSVP gemacht und durch eine Diskussion von Einsatzmöglichkeiten bewertet. Weiterhin wurde eine innovative Implementierung von RSVP erstellt und im Rahmen dieser Arbeit präsentiert und experimentell auf ihre technischen Möglichkeiten hin untersucht. Analog zur grundsätzlichen Bewertung von Dienstgüte-Techno-

logien ist es nicht möglich, Abrechnungsmechanismen einer vollständigen und abschließenden Bewertung zu unterziehen. Daher werden auch auf diesem Gebiet konstruktive Vorschläge präsentiert und durch eine Enumeration der Einsatzgebiete bewertet. Diese Mechanismen sind experimentell implementiert und somit grundsätzlich in ihrer Funktionsweise verifiziert worden. Außer der Entwicklung dieser Mechanismen werden in dieser Arbeit Kalkulationsmodelle entworfen und dargestellt, die auf die neuartige Komplexität von Preiskalkulation für Internet-Kommunikationsdienste eingehen.

### **Kapitel 3: Grundlagen zu Dienstgüte und Ökonomie**

Im dritten Kapitel der Dissertation werden die grundlegenden Begriffe zum Verständnis von Dienstgüte im Internet und dem ökonomischen Kontext erläutert. Zunächst werden die grundlegenden Komponenten zur Bereitstellung von Dienstgüte aufgezählt und erläutert. Danach folgt eine kurze Einführung in die Funktionsweise von RSVP. Alternative Vorschläge zur Signalisierung von Dienstgüteanforderungen werden im folgenden Abschnitt aufgeführt und mit RSVP verglichen. Keiner dieser Vorschläge besitzt eine vergleichbar hohe Flexibilität. Schließlich werden einige Gesamtentwürfe für Dienstgüte-Architekturen vorgestellt, die in jeweils in ihrer Gesamtheit nicht realistisch für einen Internet-weiten Einsatz sind, aber entscheidenden Einfluß auf die wissenschaftliche Diskussion der letzten Jahre hatten.

Ökonomische Untersuchungen von Kommunikationsdiensten können entweder aus volks- oder betriebswirtschaftlicher Sicht unternommen werden. In jedem Fall sind diese Untersuchungen mit Unschärfen behaftet, da vereinfachende Annahmen getroffen werden müssen und somit nur ein Ausschnitt der Realwelt betrachtet wird. Zunächst werden in diesem Abschnitt die grundsätzlichen Konzepte und Bewertungskriterien erklärt und danach werden grundlegenden Arbeiten über Abrechnung für Internet-Kommunikation aus dem Gebiet der Wohlfahrts-ökonomie vorgestellt. Im betriebswirtschaftlichen Bereich existieren nur wenige Arbeiten zur Untersuchung der Profitabilität von dienste-integrierenden Kommunikationsnetzen. Die existierenden Ansätze werden hier vorgestellt.

## Kapitel 4: Signalisierungsarchitektur für Dienstgüte

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Betrachtung von RSVP als Signalisierungsmechanismus zur Aushandlung von Dienstanforderungen innerhalb und zwischen Netzen, die durch IP miteinander verbunden sind und möglicherweise heterogene Dienstgüte-Technologien verwenden. In diesem Kapitel wird eine konzeptionelle hierzu Gesamtarchitektur vorgestellt, basierend auf einer erweiterten Version von RSVP. Ein Signalisierungsprotokoll kann zwei verschiedene Rollen repräsentieren. Es kann als verteilter Algorithmus zur Erbringung eines bestimmten Dienstes betrachtet werden, sowie als Schnittstelle zur Spezifizierung von Anforderungen zwischen administrativen Einheiten. In diesem Kapitel wird eine zunächst einfache Taxonomie für Signalisierungsarchitekturen präsentiert, um diese Unterscheidung zu verdeutlichen.

Die in dieser Arbeit vorgeschlagene Architektur ist weniger konkret, als vergleichbare Ansätze, aber wesentlich flexibler. Es werden drei Rollen definiert, die ein Netzknoten in bezug auf eine Dienstklasse annehmen kann. Insbesondere können verschiedene Dienstklassen in verschiedenen Teilnetzen unterschiedlich realisiert werden, und auf dem Kontrollpfad unterschiedlich detaillierte Signalisierungsaktivität auslösen. Die Rolle des *QoS Enabler* beschreibt die aktive Teilnahme eines Knotens an Dienstgütemechanismen, während die Rolle des *Service Enabler* die Teilnahme an der Ende-zu-Ende Signalisierung ausdrückt. Diese Signalisierungsarchitektur kann mittels RSVP realisiert werden. Das resultierende System ist in der Lage, sowohl grobgranulare Dienstgüteaushandlungen zwischen Netzdomänen abzuwickeln, als auch feingranular Anforderungen von Anwendungsströme von Endsystem zu Endsystem zu signalisieren. Es ist außerdem möglich, alle derzeit in der Diskussion befindlichen Dienstklassen zu unterstützen.

Die Spezifizierung von RSVP muß an zwei Stellen erweitert werden, um die Realisierung der Signalisierungsarchitektur zu ermöglichen. Zum einen muß das Adressierungsschema erweitert werden, welches derzeit nur die Adressierung von Endsystemen oder Multicast-Gruppen erlaubt. Zum anderen muß ein Mechanismus definiert werden, der es Zwischenknoten ermöglicht, die Menge an Zustandsinformation für Dienstangebote zu reduzieren. Zur Erweiterung des Adressierungsschema kann die Notation einer *Compound Address* verwendet werden. Hierdurch kann eine RSVP-Adresse aus einer oder mehreren Endsystem- oder Netzadressen gebildet werden. Um das Verhalten an Übergangsknoten zu definieren, wird der *Scoping Style* eingeführt, der bestimmt, ob die Nachricht nur entlang des gemeinsamen Teilpfades zwischen

allen System, oder bis zu den endgültigen Endsystemen oder Netzen übertragen wird. Diese Erweiterung erlaubt insbesondere die Einbeziehung des *Differentiated Services* (DiffServ) Modells in die Signalisierungsarchitektur. Die zweite Erweiterung wird als *Hop Stacking* bezeichnet. Dieser Mechanismus ermöglicht Zwischenknoten, ihre Adresse in eine Adressliste in der PATH-Protokollnachricht einzufügen, so daß eine resultierende Dienstanfrage ihren Weg durch das Netz zurück zum Sender nehmen kann, ohne daß in jedem Zwischenknoten entsprechende Zustandsinformation abgespeichert werden muß.

Abschließend werden in diesem Kapitel kompositorisch Beispielszenarien aufgeführt und es wird erläutert, wie sich diese Beispielszenarien in der beschriebenen Signalisierungsarchitektur realisieren lassen. Dies bestätigt die Hypothese, daß *ein* flexibler Signalisierungsmechanismus ausreicht, um der Heterogenität von Dienstgüte-Technologien gerecht zu werden.

## **Kapitel 5: Implementierung und Evaluierung**

Diese Kapitel behandelt und präsentiert die wesentlichen praktischen und experimentellen Arbeiten, die für die Dissertation durchgeführt wurden. Zur Bewertung von RSVP wurden zunächst existierende Arbeiten hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit und Aussagekraft untersucht. Neben der in dieser Dissertation beschriebenen Arbeit, existiert eine frei verfügbare Implementierung von RSVP, welche üblicherweise als Referenz-Implementierung betrachtet wird, die jedoch unter Software-Qualitätsmaßstäben als nicht besonders gut einzustufen ist und nicht-triviale Fehler enthält. Außerdem existieren nur wenige veröffentlichte Arbeiten, die die Leistungsfähigkeit von RSVP untersuchen. Keine dieser Arbeiten gibt jedoch hierüber letztendlich zuverlässig und nachvollziehbar Aufschluß. Weiterhin ist ein weiterer wichtiger Aspekt bei der Bewertung von RSVP durch eine Reihe von sehr neuen Protokollerweiterungen und -vervollständigungen gegeben, die jedoch nicht bei dem experimentellen Teil dieser Arbeit berücksichtigt werden konnten.

Da existierende Zahlen als nicht ausreichend und die einzige existierende Implementierung als nicht hochwertig genug eingeschätzt wurden, wurde im Rahmen dieser Dissertation eine komplett neue Implementierung von RSVP entwickelt. Zunächst wird das grundsätzliche Design beschrieben. Es basiert auf relationaler Modellierung und, da ein relationales Modell nicht direkt und effizient im Rahmen einer normalen Programmiersprache (d.h. ohne spezielle Da-

tenbank) umgesetzt werden kann, auf objektorientierter Modellierung. Zustandsinformation wird in feingranularen Objekten und Beziehungen zwischen diesen abgespeichert. Die Beschreibung der Protokolloperationen wird dann basierend auf dieser Modellierung durchgeführt. Dieser Entwurf für die Abspeicherung der Zustandsinformationen ist in Abbildung 1 als Entity-Relationship-Diagramm dargestellt.

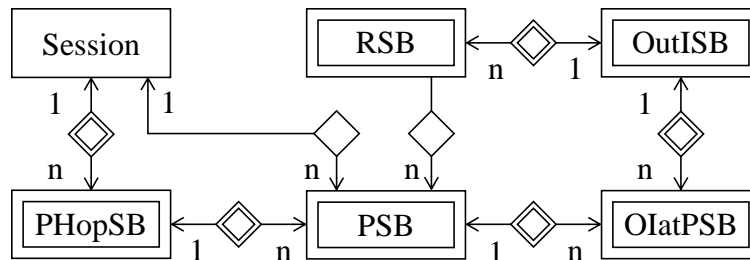


Abbildung 1: Entity-Relationship-Diagramm für Zustandsinformationen

Neben den generellen Entwurfszielen wurden spezifische Aspekte der Implementierung von RSVP betrachtet und im Entwurf berücksichtigt. Eine Reihe von offenen Fragen besteht für die Interaktion zwischen RSVP und den Modulen für *Traffic Control* bzw. *Policy Control*, insbesondere um z.B. Eigenschaften von ATM-Netzen gerecht zu werden. Die gewählten Lösungsansätze werden in der Arbeit beschrieben.

Eine Protokollmaschine für RSVP muß eine extrem hohe Anzahl von Zeitgebern verwalten. Die Implementierung einer entsprechenden Datenstruktur (*Timer Wheel*) kann im Fall von RSVP optimiert werden, da die Präzision der Zeitgeber nicht vollständig gewährleistet werden muß. Abweichungen im Bereich von einige Millisekunden sind tolerabel. Durch die Verwendung von unsortierten Containern kann die Zugriffskomplexität auf  $O(1)$  reduziert werden.

Eine weiterer Beitrag dieser Arbeit ist die Realisierung einer parallelen Protokollmaschine. Der Entwurf soll die potentielle Arbeitsweise eines Hochleistungsvermittlungssystems nachbilden, indem für jedes Netzwerkkarte eine dedizierter Kontrollfluß gebildet wird. Es zeigt sich, daß der parallele Entwurf von der objektorientierten Modellierung profitiert. Natürlicherweise kann diese Implementierung die Vorteile einer solchen Parallelisierung nur konzeptionell demonstrieren.

Die Operationen zur Realisierung der in Kapitel 4 vorgeschlagenen Protokollerweiterungen werden separat präsentiert, um zu verdeutlichen, daß sie nur geringfügige Veränderungen her-



vorrufen und keinen entscheidenden Einfluß auf die Komplexität der gesamten Protokollmaschine haben.

Diese Implementierung ist fertiggestellt und ist frei verfügbar. Um ihre Leistungsfähigkeit zu untersuchen, wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt. In diesen Experimenten wurden Standard-PCs (450 Mhz Pentium III) und FreeBSD als Betriebssystem verwendet. Das erste Experiment vergleicht die Leistungsfähigkeit der neuen Implementierung (*KOM rsvpd*) mit dem bestehenden *ISI rsvpd*. Es zeigt sich, daß die Leistungsfähigkeit der neuen Implementierung besser ist, als die des *ISI rsvpd*. Daraus kann geschlossen werden, daß der innovative interne Entwurf zumindest nicht die Leistungsfähigkeit beschneidet. Es ist jedoch möglich, den *KOM rsvpd* speziell für hohe Leistung zu konfigurieren. Das nächste Experiment zeigt die Leistungsgrenzen auf der verwendeten Hardware und zeigt auch, daß Komplexität der Implementierung linear zur Anzahl der Verkehrsflüsse ist. Weiterhin zeigen detaillierte Untersuchungen, daß der Flaschenhals des Systems nicht durch die RSVP Implementierung hervorgerufen wird, sondern durch deren notwendige Interaktionen mit dem Betriebssystem. Weitere Experimente untersuchen die Auswirkungen von unscharfen Zeitgebern und Parallelisierung. Bei beiden Experimenten ist der positive Einfluß der gewählten Optimierung deutlich erkennbar, jedoch noch nicht voll ausgereizt sichtbar, aus dem oben genannten Grund, daß der Flaschenhals nicht in der RSVP Verarbeitung liegt. Das nächste Experiment belegt die Hypothese, daß durch Mechanismen zur Reduktion der Auffrischungsnachrichten, eine weitere deutliche Leistungssteigerung zu erwarten ist. Schließlich werden noch weitere experimentelle Resultate präsentiert, die ebenfalls die hohe Leistungsfähigkeit der Software belegen, aber nicht im zentralen Untersuchungsbereich dieser Arbeit liegen.

Aus den in diesem Kapitel beschriebenen Arbeiten läßt sich folgern, daß oft geäußerte Vermutungen über die extrem hohe Komplexität und damit verbundene Nicht-Realisierbarkeit von RSVP-Signalisierung so nicht gehalten werden können. Es ist möglich, eine klar strukturierte und sehr leistungsfähige Implementierung mit vernünftigem Aufwand zu erstellen und es gibt eine Reihe von vielversprechenden Ansätzen, die Leistungsfähigkeit von RSVP allgemein noch zu steigern. Zum Beispiel konnte durch die experimentellen Ergebnis die zu erwartende Leistungssteigerung durch die Einführung von Reduktionsmechanismen für Auffrischungsnachrichten klar belegt werden.

## Kapitel 6: Kalkulation und Abrechnung

Kapitel 6 beginnt mit einer Zusammenstellung von Rahmenbedingungen, die für die kommerzielle Benutzung von integrierten Kommunikationsnetzen und deren nutzungsabhängige Abrechnung relevant sind, strukturiert nach unterschiedlichen Sichtweisen. Danach wird ein Rahmen für kostenbasierte Preiskalkulation entwickelt. Zwei entscheidende axiomatische Bedingungen, um Kalkulationsmethoden anwendbar zu machen, werden erarbeitet: Einheitlichkeit und Linearität der Preise für die jeweiligen Ressourcen. Darauf aufbauend wird ein Kalkulationsmodell für die Dienst-Architektur *Integrated Services* entworfen. Um den Ressourcenverbrauch gemäß den obigen Axiomen feststellen zu können, wird eine Abbildung der realen Dienstgüteparameter auf virtuelle Ressourcenparameter definiert. Hierdurch kann dann eine Preisformel ausgedrückt werden. Es wird dargestellt, daß sich diese Methode eignet, um das Optimierungsproblem zur Ermittlung der profitmaximierenden Preise zu vereinfachen. Um die Brauchbarkeit und Nützlichkeit des Ansatzes weiter zu belegen, wird dessen Anwendung auf die *Guaranteed* Dienstklasse exemplarisch untersucht. Diese Untersuchung fördert gewisse Schlußfolgerungen über die Anwendung der Dienstgüteparameter und sogar konstruktive Erweiterungsmöglichkeiten der Dienstspezifikation zutage. Schließlich wird ein formales Modell für verteilte kostenbasierte Abrechnung aufgestellt und dessen interne Korrektheit und Vollständigkeit bewiesen.

Im folgenden Abschnitt werden Protokollmechanismen vorgestellt, die für den flexiblen und effizienten Austausch von abrechnungsrelevanten Informationen geeignet sind. Es wird erläutert und gezeigt, wie sich die Protokollelemente einsetzen lassen, um verteilte kostenbasierte Abrechnung durchzuführen. Diese Mechanismen sind experimentell implementiert worden, um ihre grundsätzlich Realisierbarkeit zu belegen. Kostenbasierte Preiskalkulation wird vermutlich nicht direkt zur Ermittlung von Marktpreisen eingesetzt, dient aber als wichtiger interner Mechanismus, um Vergleichswerte zur Bewertung des operativen Geschäfts, insbesondere im Verhältnis zur Kapazitätsplanung zu erhalten.

Ein weiteres Kalkulationsmodell wird für die Abrechnung von Dienstanforderungen, die einen Dienst zu einem zukünftigen Zeitpunkt reservieren, eingeführt. Derartige Dienstangebote haben das folgende fundamentale Problem. Da bekannt ist, daß zu einem zukünftigen Zeitpunkt Ressourcen benötigt werden, ist es akzeptabel, diese Ressourcen vorher für eine andere Dienstanforderung zu verwenden, deren Dauer unbestimmt ist? Diese Problem erfordert entweder, bei

allen Dienstanforderungen die bindende Angabe einer Dauer oder die Unterbrechung von laufenden Diensten muß in Kauf genommen werden. Frühere Arbeiten zu diesem Thema haben versucht, diese Problem durch rein technische Mechanismen zu lösen und entsprechend eingeschränkte Dienste angeboten. Falls man jedoch das Angebot solcher Dienste mit einer Preiskalkulation gemäß den in diesem Kapitel eingeführten Axiomen verbindet, ist es nicht notwendig, die Spezifikation der Dienstschnittstelle einzuschränken. In dem hier vorgestellte Dienstmodell wird zwischen unterbrechbarer und nicht unterbrechbarer Diensterbringung unterschieden. Der grundsätzliche Preis ergibt sich aus der Addition von linearen Preiskomponenten für die Gesamtdauer des Dienstes, des Anteils von nicht unterbrechbarer Diensterbringung und schließlich für die Dauer zwischen Dienstanforderung und Diensterbringung. Die Menge an einzusetzenden Ressourcen wird als Multiplikator verwendet. Es wird gezeigt, daß durch die Einführung eines solchen Dienstmodells in Verbindung mit linearer Abrechnung die Flexibilität an der Dienstschnittstelle erhöht wird, ohne die Komplexität des Systems insgesamt zu erhöhen. Weiterhin wird die Entscheidung über die Unterbrechbarkeit einer Diensterbringung indirekt an den Benutzer delegiert und in einem natürlichen Marktmechanismus integriert. Da diese Entscheidung ohne die zusätzliche Abrechnungsinformation nicht optimal getroffen werden kann, erhöht dies die Effizienz des Gesamtsystems. Im weiteren wird präsentiert, wie sich die Abrechnungsaspekte dieses Dienstmodells mit den vorher vorgestellten Mechanismen realisieren lassen.

Um die Einsetzbarkeit der Abrechnungsmechanismen weiter zu überprüfen, wird eine dritter Kalkulationsansatz untersucht. Bei der auktionenbasierten Abrechnung werden kontinuierlich die eingehenden Gebote verglichen und nach ihrer Höhe sortiert. Vom höchsten Gebot an werden dann so viele Anforderungen akzeptiert, wie Ressourcen verfügbar sind. Alle Anforderungen werden jedoch zu dem sogenannten Grenzpreis abgerechnet, d.h. dem höchsten Gebot, welches nicht akzeptiert werden konnte. Diese Abrechnungsverfahren hat eine Reihe von ökonomisch wünschenswerter Eigenschaften. Es wird aufgezeigt, daß sich auch dieses Abrechnungsverfahren mittels der vorgestellten Abrechnungsmechanismen realisieren last.

Ingesamt präsentiert dieses Kapitel die Aufbereitung von neuen Problemstellungen bei der kommerziellen Betrachtung von integrierten Kommunikationsnetzen. Es werden Kalkulationsmodelle entwickelt, die zwar nicht gelöst oder optimiert werden, aber den wichtigen Beitrag leisten, die entsprechende Materie aus technischer Sicht so aufzubereiten, daß sie von Ökonomie-Fachleuten ohne spezielle ingenieurwissenschaftliche Kenntnisse weiterbearbeitet wer-

den können. Weiterhin wird anhand der vorgestellten Abrechnungsmechanismen die Einsetzbarkeit von RSVP als Signalisierungsprotokoll in einer kommerziellen Umgebung belegt.

## **Kapitel 7: Schlußfolgerung und Ausblick**

Zunächst werden in diesem Kapitel die wesentlichen Resultate der Arbeit zusammengefaßt. Sie bestehen im wesentlichen aus dem Entwurf und der Untersuchung einer flexiblen Signalisierungsarchitektur, der Realisierung und Evaluierung einer innovativen RSVP Implementierung, sowie aus Konzepten zur Preiskalkulation und dem Entwurf von Protokollmechanismen zur Übertragung von abrechnungsrelevanten Informationen.

Die hauptsächliche Schlußfolgerung dieser Arbeit ist, daß RSVP sehr wohl für den Einsatz als flexibles Signalisierungsprotokoll geeignet ist. Dies konnte konzeptionell und experimentell überprüft werden. Die Flexibilität und Anwendbarkeit in einem kommerziellen Umfeld wurde durch konzeptionelle Evaluierung und Verifikation durch Implementierung nachgewiesen. Die technische Machbarkeit wurde durch Implementierung und experimentelle Analyse belegt.

Zukünftige Arbeiten können von der frei verfügbaren Implementierung profitieren und diese untersuchen und erweitern. Insbesondere die Methode der experimentellen Analyse wird an der TU Darmstadt im Rahmen einer aufzubauenden Versuchsumgebung weiter verfolgt werden, um existierende Vorschläge für zukünftige Kommunikationsdienste im Internet zu untersuchen und, basierend auf dabei gewonnenem fundamentalem Wissen und Erfahrung, konstruktive Eigenbeiträge zu leisten.

## **Anhänge**

Anhang A beschreibt die Funktionsweise von RSVP. Die grundlegenden Relationen zur Modellierung von RSVP werden in Anhang B aufgeführt. Anhang C zeigt ein Entwurfsdiagramm für die Erweiterungen der Traffic Control und Policy Control Schnittstelle und Anhang D erläutert die mathematischen Details der *Guaranteed* Dienstklasse des *Integrated Services* Modell.