Voice over IP in Weitverkehrsnetzen?

Falko Dressler, Ursula Hilgers, Peter Holleczek

Regionales Rechenzentrum Zentrum der Universität Erlangen–Nürnberg,
Martensstraße 1, 91058 Erlangen
Falko.Dressler@rrze.uni-erlangen.de / Ursula.Hilgers@rrze.uni-erlangen.de /
Peter.Holleczek@rrze.uni-erlangen.de

Zusammenfassung Schon seit längerer Zeit zeigt sich der Trend, dieselbe Netz–Infrastruktur sowohl für Daten– als auch für Sprachdienste zu nutzen. Sprache und Bild sind dabei die am meisten interessierenden Multimedia–Anwendungen. In dieser Arbeit wird untersucht, welche Quality of Service Anforderungen notwendig sind, um eine „gute" Voice over IP Übertragung durchzuführen. Dabei werden objektive Größen, die in Labortests gewonnen werden, durch subjektive Eindrücke von Testpersonen ergänzt. Ein weiterer Schwerpunkt der Untersuchungen liegt darauf, in den Tests Situationen aus Weitverkehrsnetzen zu simulieren und einfache QoS–Mechanismen in diesem Rahmen zu untersuchen.

1 Einleitung

Mit Voice over IP (VoIP) wird die Übertragung von Sprachdaten zusammen mit textbasierten Daten über das gleiche Transportprotokoll, IP, bezeichnet. Dabei wird eine Punkt–zu–Punkt–Verbindung zwischen zwei Endgeräten über das IP Netzwerk aufgebaut. Die Sprachdaten erhalten dabei die gleiche Behandlung in den Netzwerkkomponenten wie die übrigen Daten im Netzwerk, so daß auch nur der „Best Effort" Dienst, den das IP Protokoll anbietet, zur Verfügung steht.

Diese Arbeit versucht zunächst, die Dienstgüteanforderungen zu spezifizieren, die für die VoIP Übertragung vom Netzwerk bereitgestellt werden müssen. Anschließend wird das Verhalten von Sprachübertragung in überlasteten IP Netzwerken untersucht. Eine angeschlossene Diskussion soll Möglichkeiten zeigen, bessere Qualität in VoIP Übertragungen zu erreichen. Eine Zusammenfassung bewertet die Ergebnisse, die aus den Tests gewonnen worden sind.

2 Protokolle für das Telefonieren über das Internet

Um über das Internet telefonieren zu können, bauen Signalisierungsprotokolle eine Telefonverbindung zu zwei Endgeräten auf. Die Verteilung der

Sprachdaten selber wird mit Hilfe von Übertragungsprotokollen durchgeführt.

Die Telefone, die in dieser Untersuchung eingesetzt werden, verwenden das Signalisierungsprotokoll H.323 [ITU98]. Dieses stellt keine QoS für die Datenübertragung durch das Netzwerk zur Verfügung.

Die Übertragung von Echtzeit Multimedia–Daten wird mit dem Real Time Transport Protocol (RTP) [Sch99] durchgeführt, das meist UDP für den Datentransport nutzt. RTP fragmentiert den Bitstrom, den ein Encoder aus den gesprochenen Worten generiert, in Übertragungsrahmen. Dabei wird jedem Frame ein RTP–Header hinzugefügt. Beim Empfänger werden die Rahmen wiederum in einem Bitstrom dekodiert. Um verlorene oder vertauschte Pakete zu erkennen, werden den Rahmen Sequenznummern hinzugefügt. Obwohl RTP keine QoS unterstützt, erlauben Zeitstempel im RTP–Header, Jitter und Verluste, die während der Übertragung auftreten können, zu erkennen bzw. zu messen. Um die Dienstgüte der Übertragung zu überwachen, wird RTP durch das RTP Control Protocol (RTCP) ergänzt. Eine seiner Hauptaufgaben ist das periodische Versenden von Kontrollpaketen, die zu allen Endpunkten geschickt werden, um Rückmeldung über die Qualität einer Verbindung zu erhalten. Dieser Feedback Mechanismus kann von adaptiven Applikationen dazu verwendet werden, die Senderate zu reduzieren.

Bevor die Sprachdaten auf das Netzwerk gesendet werden, werden sie mit dem Pulse Code Modulation (PCM) [ITU93] Verfahren kodiert. Diese Methode verwandelt die analogen Telefonsignale in digitale Signale um. Dies wird mit Hilfe einer Amplituden und Zeitquantisierung durchgefürt, der Pulse Amplitude Modulation (PAM). Das durch PCM kodierte Signal ist ein Bitstrom.

3 Qualitätsanforderungen von VoIP

Wesentlich für die subjektive Beurteilung der Dienstgüte ist der Eindruck eines Anwenders bei Ausführung eines Dienstes. Diese subjektiven Ergebnisse können durch objektive Messungen ergänzt werden. Die subjektive und objektive Qualität wird mit Hilfe von speziellen Parametern beschrieben. Diese sind zur Beurteilung der Dienstgüte von VoIP Durchsatz, Delay, Delay Variation, Verluste und Fehler. Um eine gute Übertragungsqualität zu erhalten, sollten die Verlustrate, das Delay und die Delay Variation klein sein. Zur Beurteilung der objektiven Übertragungsqualität kann die Verständlichkeit verwendet werden: Sprache sollte so übertragen werden, daß sie verständlich ist und daß keine Echos entstehen.

In den im Folgenden präsentierten Tests wird davon ausgegangen, daß eine Verbindung erfolgreich aufgebaut worden ist. Die Delays und Fehler, die während des Verbindungsaufbaus entstehen, werden nicht berücksichtigt.

Abbildung 1 stellt den verwendeten Testaufbau dar. Er besteht aus zwei Ethernet LANs, an die zwei VoIP Telefone der Firma Cisco angeschlossen sind. Beide LANs sind über Cisco Router mit IOS 12.0(10)S gekoppelt. Das Netzwerk zwischen ihnen ist eine STM1 ATM Verbindung, die ein WAN simulieren soll. Ein Netzwerk Analysator INTERWATCH 95000 mit einem Impairment–Werkzeug ist in diese Verbindung eingeschleift. Um realistisches Netzwerkverhalten zu simulieren, kann es Bitfehler und Verzögerungen auf der Verbindung erzeugen. Ein RADCOM VoIP Analysator, eine Erweiterung zum RADMCOM Netzwerk Monitor, kann VoIP Verkehr auf einer Leitung unabhängig vom Verkehr anderer Verbindungen analysieren. Er wertet Informationen bezüglich des Jitters, der Paketverluste, der Unterdrückung von Pausen (Silence Suppression) und vertauschte Pakete aus.

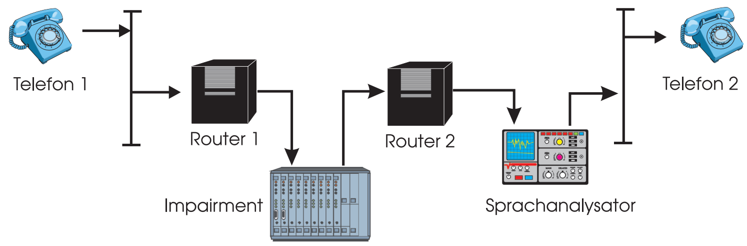

Abbildung1. Testaufbau um die Übertragungsqualität von VoIP zu untersuchen.

In allen Tests wird klassische Musik über die Telefonverbindung übertragen, da diese Art von Ton auch unerfahrenen Testern erlaubt, vergleichbare Ergebnisse zu erhalten. In einem zweiten Test sprechen zwei Personen über die Verbindung miteinander. Damit wird sowohl der uni– als auch der bidirektionale Übertragungsweg getestet, wesentlich für eine vollständige Beurteilung der Übertragungsqualität von Sprache.

Zuerst wird eine Referenzmessung mit dem Testaufbau in Abbildung 1 durchgeführt. Das Impairment ist ausgeschaltet. Es werden keine Paketverluste festgestellt und die Qualität der Sprache ist gut.

3.1 Delay und Jitter

In IP Netzwerken sind die Standard Queueing Algorithmen, die in den Netzwerkkomponenten implementiert sind, verantwortlich für die erzeugte Variation des Delays, den Jitter. Die meisten Probleme bei der Multimedia–Übertragung werden durch zu großen Jitter hervorgerufen. Bei der Audio und Videoübertragung ist die maximale Ankunftszeit zwischen Paketen definiert, so daß alle Pakete, die sie überschreiten, verworfen werden. Einer nahezu konstanten Zwischenankunftszeit kommt eine Schlüsselfunktion bei Übertragungen mit konstanten Bitraten zu.

Konstantes Delay

Für den ersten Test wird das Impairment–Werkzeug so konfiguriert, daß es einen konstanter Jitter in die Verbindung einspeist. Das Ergebnis ist in Tabelle 1 abgebildet.

Tabelle1. Konstantes Delay bei der VoIP Übertragung.

konstantes Delay [$msec$]	Paket–verluste [%]	subjektiver Eindruck
0	0	gute Qualität
0,2	0	gute Qualiät
0,5	0	geringe Verzögerung der Sprache, gute Qualität der Musik
1000	0	verzögerte Kommunikation, gute Qualiät der Musik

Dieser Test zeigt, daß steigendes konstantes Delay die Qualität der unidirektionalen Sprachübertragung nicht stört. Ist die Verzögerung größer als eine Sekunde, wird die bidirektionale Kommunikation durch lange Pausen sehr negativ beeinflußt. Dieser Effekt ist von der Satelliten–Übertragung bekannt.

Delay mit geometrischer Verteilung

Das Impairment–Werkzeug erlaubt, die Verteilung des Delays zu variieren, so daß der Jitter vergrößert werden kann. Aus den verschiedenen Möglichkeiten, die der Verkehrsanalysator anbietet, wird die geometrische Verteilung gewählt. In Tabelle 2 sind die Resultate der Tests zusammengefaßt, bei denen mittels Impairment–Werkzeug eine Variation des Delays basierend auf einer geometrischen Verteilung erzeugt wird. Leider kann das Impairment–Werkzeug maximal einen Jitter von 10 msec erzeugen. Dieser ist aber nicht groß genug, so daß Qualitätseinbußen bei der

Sprachübertragung zu erkennen sind. Aufgrund dieser Erfahrung, aber auch für weitergehende Tests, wird derzeit an der Universität Erlangen ein IP basiertes Impairment–Werkzeug im Rahmen einer Diplomarbeit entwickelt.

Tabelle2. Geometrische Verteilung des Delays.

Jitter [$msec$]	Paket–verluste [%]	subjektiver Eindruck
0	0	gute Qualität
10	0.554	gute Qualität

3.2 Übertragungsfehler

In heutigen LANs treten Übertragungsfehler nur mit einer sehr geringen Rate auf. Das unterscheidet sie von Weitverkehrsnetzen, weshalb im folgenden der Effekt von Übertragungsfehlern auf einer VoIP Verbindung untersucht wird.

Bitfehler

Die Ergebnisse eines Tests, bei dem das Impairment Bitfehler in den ATM–Strom eingespeist hat, ist in Tabelle 3 zusammengefaßt. Interessant ist, daß ab einer Fehlerrate über 10^{-3} keine Audioübertragung mehr möglich ist. Erstes Knacken ist schon bei einer Rate von 10^{-5} zu hören. Leider kann das Impairment–Werkzeug nur Fehlerraten mit einer Granularität von 10er Potenzen (10^{-1}, 10^{-2}, 10^{-3} etc.) erzeugen.

Tabelle3. Übertragungsfehler bei der VoIP Übertragung.

Fehler–rate	Paket–verluste [%]	subjektiver Eindruck
0	0	gute Qualität
10^{-5}	2.24	leichtes Knacken
10^{-4}	22.9	Knacken in der Musik; unverständliche Sprache
10^{-3}	keine Audioübertragung ist mehr möglich	

Paketverluste
Die größten Probleme in Weitverkehrsnetzen werden durch Paketverluste verursacht. Viele ISPs entwerfen ihre Netze für eine mittlere Last, so daß schon kleinere Datenstöße (Bursts) bei den Routern zu Überläufen bei den Warteschlangen führen, da diese limitiert sind. Dadurch werden Pakete verworfen. Zusätzlich erreichen die Netzwerke durch die ständig steigenden Bandbreitenanforderungen im Internet ihre Grenzen. Viele Transportprotokolle haben eigene Konzepte, um diesem zu begegnen. TCP reduziert die Übertragungsbandbreite bei Pakteverlusten und überträgt die verlorenen Pakete erneut. Echtzeit Applikationen wie Video oder Audio können auf Verluste nicht genauso reagieren. Es ist erforderlich, daß Pakete solche Applikationen so schnell erreichen wie möglich — mit kleinem Jitter, sonst sind sie wertlos. Diese Applikationen werden meist über das Protokoll RTP übertragen, damit sie anhand der RTP–Informationen eine optimale Übertragung durch eine evtl. Reduzierung der Bitrate erzielen können, wenn die Ende–zu–Ende Verbindung zu schlecht ist. VoIP sendet aber schon mit einer so kleinen Rate, daß eine weitere Reduzierung nicht mehr möglich ist.

Tabelle4. Paketverluste bei der VoIP Übertragung.

Zellverlust–rate	Paket–verluste [%]	subjektiver Eindruck
0	0	gute Qualität
10^{-4}	0.069	gute Qualität
10^{-3}	0.785	Knacken
10^{-2}	8	Störungen bei der Musikübertragung, teilweise unverständliche Sprache
10^{-1}	72.3	unverständliche Sprachverbindung

Das Ergebnis des Tests, bei dem Paketverluste in die Verbindung eingespeist worden sind, ist in Tabelle 4 abgebildet. Eine Paketverlustrate größer als 10^{-1} führt dazu, daß die VoIP Übertragung unmöglich wird. Ab einer Verlustrate von 10^{-2} ist eine verständliche VoIP Übertragung nicht mehr durchführbar.

4 Verhalten in überlasteten Netzwerken

Um die Qualität feststellen zu können, die ein Netzwerk Anwendungen zur Verfügung stellt, ist es wichtig, das Verhalten der Netzwerkkomponenten in Überlastsituationen zu überprüfen und den Einfluß auf die Qualität der Sprachübertragung zu untersuchen.

Der Testaufbau ist in Abbildung 2 dargestellt. Die Routing Funktionalität wird von einem Linux PC durchgeführt (SuSE Linux 6.4). Das Betriebssystem unterstützt QoS Routing Funktionen [Alm99]. Im folgenden Test wird der VoIP Verkehr sowohl mit Hilfe von Telefonen als auch mit einem Verkehrsgenerator erzeugt. Der Test vergleicht das Standard Scheduling Verfahren FIFO (First in, First out) mit Class Based Queueing (CBQ). CBQ ist ein Link–Sharing Mechanismus, der es verschiedenen Verkehrsklassen erlaubt, die Bandbreite auf einem Link kontrolliert zu teilen [FJ95].

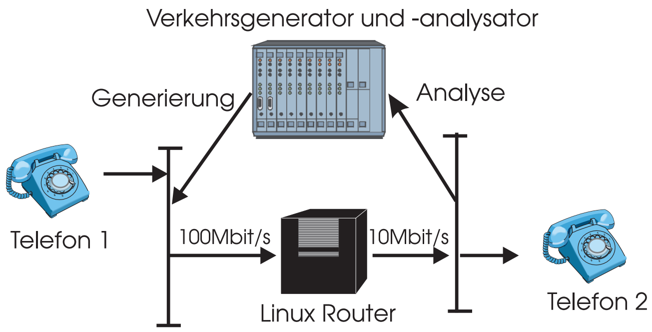

Abbildung2. Testaufbau, um das Verhalten beim Telefonieren in überlasteten Netzwerken zu überprüfen.

Der Linux PC hat ein 100 Mbit/s Interface, das über ein LAN mit `Telefon1` verbunden ist. Das zweite Interface des Linux PC ist mit einem 100 Mbit/s Ethernet Interface mit `Telefon2` verbunden. Ein Verkehrsgenerator und –analysator HP4200B ist mit beiden LANs gekoppelt. Es sind zwei UDP Ströme konfiguriert: einer für die Sprachübertragung und einer für Hintergrundlast. In einem ersten Test produziert der Generator Verkehr für beide Ströme und analysiert den Durchsatz, der auf dem zweiten LAN gesendet wird. Die Hintergrundlast wird während der Tests in den folgenden Schritten erhöht: 8 Mbit/s, 10 Mbit/s, 12 Mbit/s and 20 Mbit/s. Das Ergebnis ist in Tabelle 5 abgebildet.

Tabelle5. Beeinflussung der VoIP Qualität durch ein überlastetes Interface mit FIFO Scheduling und CBQ.

		FIFO		CBQ	
gesendete Hintergrund–last $[Mbit/s]$	gesendeter VoIP Verkehr $[Kbit/s]$	empfangene Hintergrund–last $[Mbit/s]$	empfangener VoIP Verkehr $[Kbit/s]$	empfangene Hintergrund–last $[Mbit/s]$	empfangener VoIP Verkehr $[Kbit/s]$
8	59.5	8	59.6	8	59.6
10	59.5	9.22	51.1	9.21	58.3
12	59.5	9.21	38.4	9.15	59.3
20	59.5	9.08	23.8	9.41	60.0

Offensicht wird die Bandbreite der Sprachverbindung und damit auch die Qualität beim FIFO Scheduling durch das überlastete Interface beeinflußt. Der Hintergrundverkehr von 20 Mbit/s drosselt den Sprachstrom auf 23,8 Kbit/s. Auf der anderen Seite wird bei CBQ der Sprachverkehr geschützt, die Bandbreite wird nicht durch steigende Hintergrundlast reduziert sondern bleibt konstant. Anschließend wird der Test wiederholt, wobei der Sprachverkehr von den beiden Telefonen erzeugt wird. Die subjektiven Eindrücke dieses Tests bestätigten die objektiven Ergebnisse aus Tabelle 5.

5 Diskussion

Die Ergebnisse im vorigen Kapitel haben gezeigt, daß überlastete IP Netzwerke mit Standardverhalten nicht die qualitativen Anforderungen von VoIP Daten erfüllen können. Das Standard IP Protokoll mit FIFO Scheduling ist keine gute Lösung, Echtzeit Multimedia–Daten zu übertragen. Es müssen Konzepte eingesetzt werden, die das IP Protokoll um die Fähigkeit erweitern, QoS zu unterstützen. Diese sollten z. B. Scheduling Algorithmen wie CBQ enthalten, die hochpriore Daten vor „Best Effort“ Verkehr schützen.

Ein Ansatz dazu ist das Differentiated Services Konzept [Bla98] der IETF. Es erweitert das IP Protokoll um einen skalierbaren Mechanismus, der Applikationen unterschiedliche Dienstklassen zur Verfügung stellt. Die IP Pakete werden den verschiedenen Dienstklassen zugewiesen, wobei die Zuordnung zu einer Klasse vom Werte des Type of Service Byte im IP Header abhängt. Dieser Wert entscheidet auch über die Anwendung von Verkehrskontrollfunktionen wie Policing bzw. Traffic Shaping. Für jede Dienstklasse wird in Abhängigkeit ihrer Priorität die Behandlung in den Netzwerkkomponenten, das Per Hop Behaviour (PHB), durchgeführt. Dieses ist durch Scheduling– und Queuemanagement–Verfahren implementiert. Als Scheduling–Mechanismus wäre der im vorigen Abschnitt vorgestellte CBQ–Algorithmus möglich, der den Sprachstrom bei Überlast schützt. Aber auch der Algorithmus Weighted Fair Queueing (WFQ) [Par92] ist bereits auf Routern implementiert. Er weist jeder Warteschlange in einem Routerinterface ein Gewicht zu, das den Anteil an Ausgangsbandbreite für die Anwendungsflüsse in dieser Warteschlange festlegt. So kann ein unterschiedliches Verhalten für verschiedene Dienstklassen erreicht werden. Verfahren zur Überlastkontrolle, wie Random Early Detection (RED) zum Beispiel [FJ93], reduzieren in Router Interfaces die durchschnittliche Länge der Warteschlangen und verwerfen Pakete, bevor diese komplett gefüllt sind. Dadurch sind Protokolle wie TCP in der Lage, ihre Rate zu reduzieren.

Da der DiffServ–Mechanismus nur relative Dienstgüte zur Verfügung stellt [Hil00], sieht eine Erweiterung des Konzeptes vor, Ressourcen Reservierung für Applikationen durchzuführen. Eine Implementation dafür ist das Resource Reservation Protocol (RSVP) [Bra97], das für jeden Anwendungsfluß Ressourcen in den Netzwerkkomponenten und in den Endgeräten reserviert. Leider skaliert dieses Protokoll nicht in WANs [Bra97], weil es auf einem sehr komplexen Signalisierungsprotokoll basiert und für jeden Anwendungsfluß Zustände in jeder Komponente speichert.

6 Zusammenfassung

Die Tests zeigen, daß VoIP garantierte Dienstgüte benötigt. Ein steigendes Delay hat nur Einfluß auf die Übertragung, wenn Sprache bidirektional übertragen wird. Bei unidirektionaler Kommunikation ist nur eine geringfügige Verschlechterung zu erkennen. Einen größeren Einfluß auf die Qualität hat eine Vergrößerung des Jitters. Im schlimmsten Fall führt dieses dazu, daß Daten verloren sind, so daß der Effekt einer steigenden Paketverlustrate entspricht. Letztere aber führen zu einer sinkenden Übertragungsqualität, bereits bei kleinen Verlustraten.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, daß mit Standard Scheduling Algorithmen VoIP in WANs nicht übertragen werden kann. Sonst ist eine reduzierte Übertragungsqualität von Multimedia–Anwendungen, hier VoIP, nicht zu vermeiden. Wesentlich bessere Ergebnisse erhält man durch die Nutzung von teils schon implementierten QoS–Mechanismen für IP.

Literatur

[Alm99] W. Almesberger, *Linux Network Traffic Control - Implementation Overview*, http://icawww1.epfl.ch/linux-diffserv/, April 1999

[Bla98] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, W. Weiss, *An Architecture for Differentiated Services*, Request for Comments 2475, Dezember 1998

[Bra97] B. Braden, L. Zhang, S. Berson, S. Herzog, S. Jamin, *Resource ReSerVation Protocol (RSVP) — Version 1 Functional Specification*, Request for Comments 2205, September 1997

[FJ93] S. Floyd, V. Jacobson, *Random Early Detection Gateways for Congestion Avoidance*, IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1993

[FJ95] S. Floyd, V. Jacobson, *Link–sharing and Resource Management Models for Packet Networks*, In: IEEE/ACM Transactions on Networking, August 1995

[Hil00] U. Hilgers, R. Hofmann, P. Holleczek, *Differentiated Services — Konzepte und erste Erfahrungen.* In: Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation, 2/2000.

[ITU93] ITU–T Recommendation G.711, *Pulse Code Modulation (PCM) of Voice Frequencies*, 1993

[ITU98] ITU–T Recommendation H.323, *Visual telephone systems and equipment for local area networks which provide a non–guaranteed quality of service*, Mai 1998

[Par92] A. K. J. Parekh, *A Generalized Processor Sharing Approach to Flow Control in Integrated Services Networks*
LIDS–TH–2089, MIT Laboratory for Information and Decision Systems, Cambridge, Mass., Februar 1992

[Sch99] H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson, *RTP: A Transport Protocol for Real–Time Applications*, Request for Comments 1889, Januar 1999