

Ermittlung, Bewertung und Messung
von Kenngrößen zur Bestimmung der
Leistungsfähigkeit eines Mobilfunknetzes
in Bezug auf Voice over IP

Diplomarbeit von
Marcus C. Gottwald

Freie Universität Berlin, Institut für Informatik,
Prof. Dr.-Ing. Jochen Schiller

in Zusammenarbeit mit:
Qosmotec Software Solutions GmbH, Aachen

Juli 2006

Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war es, Grundlagen zu schaffen, die einen verlässlichen und aussagekräftigen Test der Qualität einer Nutzung von Voice over IP über ein Mobilfunknetz ermöglichen. Ein solcher Test war in ein vorhandenes Testsystem einzubinden.

Zunächst werden die Motivation der Interessengruppen und die derzeit zur Verwendung kommende Technik erläutert. Es folgt die Beschreibung einer Methode, mit deren Hilfe Eigenschaften der zu testenden Paketdatenübertragungsstrecke während einer Übertragung ohne Hinzufügen von Daten effizient ermittelt werden können.

Im Anschluss werden messbare und für die Qualitätsbestimmung potentiell relevante Größen ermittelt. Die Wichtigkeit dieser Größen, die bereits untersucht oder noch unbekannt sein kann, wurde überprüft, wofür der Aufbau einer automatisierten Sprachdatenübertragung und die Emulation einer Funkübertragungsstrecke benötigt wurden. Einige Ideen komplexerer Größen wurden entwickelt.

Die im Laufe der Untersuchungen entstandenen Verfahren wurden an die Fähigkeiten des gegebenen Testsystems angepasst und in das System integriert.

Danksagung

Mein Dank geht an Qosmotec und dort insbesondere Axel C. Voigt, der nicht nur die Idee für das Thema dieser Arbeit hatte, sondern auch stets bereitstand, um das eine oder andere Detail zu besprechen.

Ein ganz persönlicher Dank gilt Jürgen Nickelsen für Motivation, ständigen Antrieb und akribisches Nachhaken bei fragwürdig formulierten Aussagen, sowie Waltraud Lucht, die durch ihre Freude an schöner Sprache genau die Richtige war, um auch solche Stellen anzustreichen, über die ich niemals gestolpert wäre.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	7
1.1	Voice over IP	7
1.2	Voice over IP im Mobilfunk	8
1.2.1	Mobilfunkanbieter und Gerätehersteller	10
1.2.2	Interesse der Anwender	12
1.2.3	Push-to-talk over Cellular	13
1.2.4	Verhinderung?	14
1.3	Qosmotec Software Solutions	15
1.3.1	Tätigkeitsfeld	15
1.3.2	Das Lab Test System von Qosmotec	16
1.3.3	Was erreicht werden soll	20
2	VoIP-Technik	21
2.1	Gesprächsaufbau	22
2.1.1	SIP	23
2.1.2	H.323	23
2.2	Sprachdatenübertragung	24
2.2.1	Datentransport	24
2.2.2	Codecs	28
2.2.3	Analogdatenübertragung außer Sprache	31
2.3	Sicherheit	32
2.4	QoS-Klassen/Priorisierung	34
2.4.1	QoS für IP	35
2.4.2	QoS von Daten im Mobilfunk	36
2.5	Skype	39
3	Zwischenschritt: Eigenschaften der Übertragungsstrecke	41
3.1	Messbare Eigenschaften	41
3.1.1	Datenrate	43

3.1.2	Laufzeit, Laufzeitschwankungen, Verlustrate	44
3.2	Zusammenspiel mit LTS	44
3.3	Praktische Umsetzung	45
3.3.1	Erfassung der Paketinformationen	45
3.3.2	Auswertung der Paketinformationen	47
4	Ermittlung messbarer Kenngrößen	49
4.1	Gesprächsaufbau	49
4.2	Sprachdaten	50
4.2.1	Sprachdatenübertragung	50
4.2.2	Sprachcodierung	52
4.3	Spezialfall Mobilfunk	53
4.3.1	Datenrate	53
4.3.2	Paketverlust	53
4.3.3	Leerlaufzeiten	53
4.3.4	Bewegung	55
4.4	Liste der Kenngrößen	56
5	Wichtung der Kenngrößen	57
5.1	Sprachqualität	57
5.2	Verknüpfung von Kenngrößen und Qualität	59
5.2.1	Sprachdatenübertragung	59
5.2.2	Fax und DTMF-Töne	62
5.3	Eigenschaften der Übertragungsstrecke	62
5.3.1	Netzwerk-Emulation	65
5.4	Funktionstests und erste Messungen	66
5.4.1	Paketlaufzeit	66
5.4.2	Verlustrate	67
5.4.3	Schwankung der Laufzeit	68
5.4.4	Größte Lücke zwischen Paketen in korrekter Reihenfolge	69
5.4.5	Zwischenstand	72
5.4.6	Weitere Ideen	72
5.5	Weitere Literatur	72
6	Ermittlung der Werte durch das LTS	75
6.1	Paketübertragung	75
6.2	VoIP-Sprachübertragung	76
6.2.1	Sprachdaten	76
6.2.2	Leerlaufzeit	78

6.3	Technische Optimierungsmöglichkeiten	79
6.3.1	Eigenschaften der Übertragungsstrecke	79
6.3.2	Verbesserung der Übertragungstechnik	80
6.3.3	Mögliche Erweiterungen	81
7	Schluss	83
7.1	Aufgeworfene Überlegungen	83
7.1.1	Messbare Kenngrößen	83
7.1.2	Durchführung der Tests	84
7.1.3	Emulation der Übertragungsstrecke	84
7.1.4	Sprachdatenübertragung	84
7.1.5	Wichtung und Qualitätsbestimmung	85
7.1.6	Aufgaben der Netzbetreiber	85
7.2	Was wir gelernt haben	85
A	Auskünfte der Mobilfunknetzbetreiber	87
A.1	Vodafone D2 GmbH	88
A.2	E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG	89
	Literatur	91
	Abbildungsverzeichnis	100
	Tabellenverzeichnis	100
	Stichwortverzeichnis	101

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Voice over IP

Der Begriff *Voice over IP* (VoIP) bezeichnet die Technologie, die zum Einsatz kommt, wenn Telefongespräche nicht über herkömmliche Telefonnetze geführt werden, sondern über Computernetzwerke, die das Internet Protocol (IP) verwenden. Das größte derartige Netzwerk ist der unter dem Begriff *Internet* bekannte weltweite Verbund; gelegentlich wird daher auch von „Internet-Telefonie“ gesprochen. Die Nutzung von VoIP anstelle herkömmlicher Mechanismen für Festnetzanschlüsse (analoge Telefonie, ISDN) ist inzwischen weit verbreitet. Das Marktforschungsunternehmen Forrester Research „rechnet damit, dass VoIP bis 2010 einen Anteil von etwa 30 Prozent im Bereich der privaten Festnetztelefonie erobern wird“. [HeiseForr]

Voraussetzung für die Nutzung von VoIP sind beim Teilnehmer lediglich ein Internetzugang, eine Möglichkeit der Sprachwiedergabe (Lautsprecher/Kopfhörer) und ein Mikrofon sowie Software zur Ansteuerung der Hardware, zur Verwaltung der Gespräche und zur Kodierung und Dekodierung der Sprachdaten. Die notwendige Software ist größtenteils kostenlos erhältlich, die Hardwareanforderungen erfüllt jeder moderne Haushaltscomputer. Erhältlich sind auch Geräte mit der Möglichkeit zum Anschluss von Analog- oder ISDN-Telefonen, tragbare VoIP-Telefone mit WLAN- oder Bluetooth-Kommunikation und Kombinationen aus GSM/UMTS-, DECT- und VoIP-WLAN-Telefonen.

Die Vorteile der Nutzung von VoIP für den Anwender liegen größtenteils in den geringen Kosten und der Unabhängigkeit von einem festen Standort. Die Steuerung des Datenflusses mittels frei erhältlicher Software und die geringen Hardwareanforderungen erlauben aber auch eine äußerst flexible Gesprächsvermittlung, unabhängig von teuren

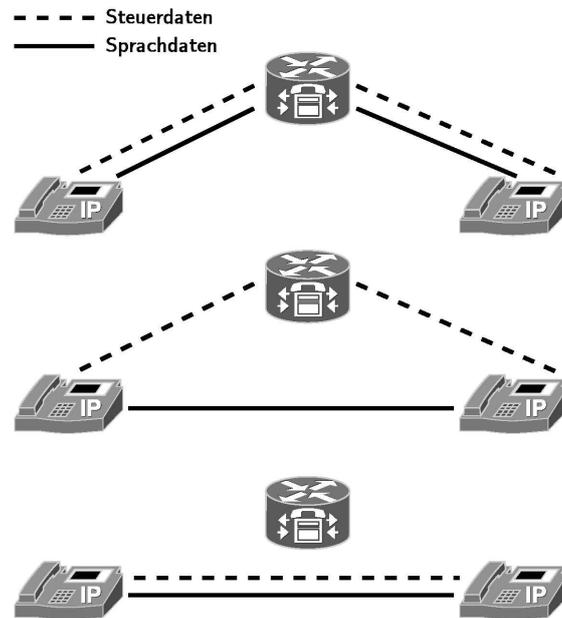


Abbildung 1.1: Varianten des Datenflusses bei VoIP

Telefonanlagen und oft einfacher zu bedienen als Systemtelefone. Wesentlicher Grund für das große Angebot an Geräten und Software-Produkten dürfte sein, dass VoIP-Kommunikation heute fast ausschließlich unter Nutzung offener Standards stattfindet, also Interoperabilität zwischen Produkten unterschiedlicher Hersteller gegeben ist und ein starker Wettbewerb existiert. Zu technischen Einzelheiten siehe Kapitel 2.

Ein weiterer Vorteil ist, dass Teilnehmer eines VoIP-Gesprächs nicht zwangsweise einen Dritten brauchen, um die Verbindung herzustellen und Sprachdaten auszutauschen (siehe Abbildung 1.1). Diese Notwendigkeit besteht nur dann, wenn der Übergang in ein anderes Telefonnetz (zum Beispiel das herkömmliche analoge Netz oder ISDN) gefordert oder der Datenverkehr zwischen den Teilnehmern kontrolliert und eingeschränkt wird.

1.2 Voice over IP im Mobilfunk

Eine Paketdatenübertragung entsprechend dem Standard IPv4 [RFC791] mit der Möglichkeit des bidirektionalen Datenaustauschs zwischen mobilen Nutzern und anderen Internet-Teilnehmern ist in europäischen Mobilfunknetzen seit Einführung des *General Packet Radio Service* (GPRS) verfügbar. Die Kosten für dessen Nutzung unterscheiden sich stark zwischen den Mobilfunkanbietern; die Nutzung eines leitungsvermittelten In-

ternetzugangs über ein Mobilfunknetz entsprechend dem Standard *Global System for Mobile Communications* (GSM) kann für die schnelle Übertragung großer Datenmengen günstiger sein. Inzwischen bieten aber viele Anbieter günstige Tarife mit hohem Inklusivvolumen oder Flatrate für GPRS- und UMTS-Datenübertragung vom und zum Internet.

Die Möglichkeit der Nutzung von VoIP über Mobilfunknetze ist also bereits gegeben, und es wird allgemein davon ausgegangen, dass die Übertragung digitaler Daten in Form von IP-Paketen von und insbesondere zu Mobilfunkgeräten spätestens in Folge der anhaltenden Preissenkungen stark an Menge und Bedeutung zunehmen wird.

Auch Mobilfunknetze, die nicht vorrangig dem Zweck des klassischen Telefonierens dienen, wie beispielsweise digitale Bündelfunknetze entsprechend dem Standard *Terrestrial Trunked Radio* (TETRA), bieten häufig die Möglichkeit der Übertragung von Paketdaten. Erkenntnisse aus dieser Arbeit sollten zumindest teilweise auch auf solche Netze anwendbar sein.

VoIP über Leitungsvermittlung

Über leitungsvermittelte Datenübertragung (*Circuit Switched Data*, CSD) in einem Mobilfunknetz kann selbstverständlich auch ein Internet Service Provider angewählt werden, der über die Datenverbindung einen Anschluss des mobilen Geräts an das Internet herstellt. Solche Datenverbindungen bieten in Mobilfunknetzen der zweiten Generation eine Datenrate von 9,6 kBit/s pro Kanal, gelegentlich auch 14,4 kBit/s.

Da für die Übertragung codierter Sprache über IP heutzutage mindestens etwa 22 kBit/s anfallen (siehe Abschnitt 2.2.1), ist die Nutzung eines solchen leitungsvermittelten Internetzugangs für VoIP nur dann sinnvoll möglich, wenn entweder eine Kanalbündelung wie beispielsweise *High Speed Circuit Switched Data* (HSCSD) oder ein Mobilfunknetz der dritten Generation genutzt wird, das bei leitungsvermittelter Datenübertragung bis zu 64 kBit/s zur Verfügung stellen kann. Üblicherweise sind allerdings die Kosten für die Möglichkeit der Nutzung einer hohen Datenrate entsprechend höher, sofern die gewünschte Anzahl Kanäle überhaupt vom Netz zur Verfügung gestellt wird und das verwendete Endgerät die Bündelung bzw. hohe Datenrate unterstützt. Die Nutzung von VoIP über CSD im Mobilfunk scheint daher äußerst unüblich zu sein.

1.2.1 Mobilfunkanbieter und Gerätehersteller

Haltung der Netzbetreiber

Über vorhandene Geschäftskontakte erhaltene Auskünfte zu den Strategien der deutschen Mobilfunknetzbetreiber in Hinblick auf Voice over IP kamen leider nur zögerlich und schleppend und hielten detaillierten Nachfragen nicht stand. Die Auskünfte waren für eine Veröffentlichung nicht geeignet, weshalb die Betreiber über ihre jeweilige Kommunikationsstelle später auch noch per Briefpost befragt wurden. Zu den Antworten siehe Abschnitt A.

Der deutsche Mobilfunk-Serviceprovider und Netzbetreiber *Vodafone D2* hat sich in Verträgen zur Nutzung von UMTS-Dienstleistungen vorbehalten, die Nutzung von VoIP ab Juli 2007 zu verhindern. Die entsprechende Vertragsklausel lautet: „Ab 08.07.2007 wird eine Voice-over-IP-Nutzung mit den Tarifoptionen technisch unterbunden.“ [Vodafone] Es stellt sich hier die Frage, welche Änderungen Vodafone bis Juli 2007 erwartet, die dafür sorgen werden, dass die Nutzung von Voice over IP über regulären IP-Datenverkehr im eigenen Mobilfunknetz nicht mehr genehm sein wird. Vodafone antwortete ausweichend diplomatisch, dass die hier zitierte Einschränkung lediglich eine vertragliche Sicherungsmaßnahme darstelle. Der Markt werde bis Mitte 2007 „genau analysiert und recherchiert“ (siehe Abschnitt A.1).

Der Netzbetreiber und Serviceprovider *T-Mobile Deutschland* untersagt in den Bedingungen zum einzigen Datentarif mit hohem Inklusivvolumen (dem „web'n'walk XL“) die Nutzung von Voice over IP.¹ *O2 Germany* bietet keinen Datentarif mit hohem Inklusivvolumen, untersagt die Nutzung von Voice over IP aber in allen Tarifen.

Der Serviceprovider *E-Plus Service* bietet seinen Kunden seit September 2005 einen Flatrate-Tarif für mobile Datenübertragung über GPRS und UTMS. Die Nutzung von VoIP ist jedoch vertraglich untersagt – mit einer Ausnahme, die die Nutzung des mit einem proprietären Protokoll arbeitenden VoIP-Dienstes der Firma *Skype* gestattet (zu *Skype* siehe auch Abschnitt 2.5). Anfang des Jahres 2006 wurden Kunden, die eine Flatrate bei E-Plus Service gebucht haben, vom Netzbetreiber *E-Plus Mobilfunk* telefonisch dazu befragt, in welcher Weise sie VoIP-Dienste, insbesondere *Skype*, über ihre mobile Internetanbindung genutzt haben. Eine Auswertung der Umfrage ist nicht veröffentlicht worden und wurde auch auf Nachfrage nicht zur Verfügung gestellt (siehe auch Abschnitt A.2).

¹ T-Mobile untersagt nicht nur die Nutzung von VoIP, sondern auch Instant Messaging.

Offensichtlich teilen zumindest die Netzbetreiber *E-Plus Mobilfunk* und *Vodafone D2* derzeit nicht kategorisch die Sorge der anderen beiden Netzbetreiber, dass ihnen durch die nicht von ihnen selbst kontrollierte Nutzung von Voice over IP ein Schaden entstehen könnte.

Haltung der Gerätehersteller

Gerätehersteller wie beispielsweise der finnische Anbieter *Nokia* vermeiden ebenfalls klare Aussagen, zeigen sich in Hinblick auf die Technik jedoch experimentierfreudig. So hat Nokia bereits im Jahre 2004 einen SIP-Protokoll-Stack zur Nutzung unter Betriebssystemen der *Symbian Series 60* angekündigt [NokiaSIP] und diesen zusammen mit einem SDK im Juli 2005 zur Verfügung gestellt. Seit dem Frühjahr 2006 sind Mobiltelefone der „E“-Serie verfügbar, die mit vorinstallierter VoIP-Client-Software ausgeliefert werden. Es war schon bei Ankündigung der Produktlinie vorgesehen, dass diese Telefone VoIP-Verbindungen ausschließlich über WLAN, nicht jedoch über UMTS unterstützen, obwohl aus technischer Sicht eine solche Einschränkung schwer nachvollziehbar ist. Einsatzzweck der Geräte wird unter anderem die Nutzung für *Unlicensed Mobile Access* (UMA) sein, eine Technik, die es erlaubt, Gesprächs- und sonstige Daten je nach Netzverfügbarkeit entweder über WLAN (oder andere Funktechnologien, für deren Nutzung keine Lizenz erforderlich ist) oder über das mit Lizenz betriebene Mobilfunknetz – auch während einer Übertragung wechselnd – zu übertragen.

UMTS Release 5

Die Spezifikation der als *Release 5* bezeichneten Version des Mobilfunkstandards *Universal Mobile Telecommunications System* (UMTS) sieht vor, dass Sprachdaten ausschließlich in Form von Paketen über ein rein paketvermittelndes, das Internet Protocol verwendendes Netz übertragen werden. [Walke02, Abschnitt 4.10] Desweiteren wird vorgeschrieben, dass *User Equipment* (UE, beispielsweise ein Mobiltelefon) mit dem *IP Multimedia Subsystem* (IMS, eigentlich *IP Multimedia Core Network (CN) Subsystem*, die zentrale Netzkomponente zur Realisierung aller Multimediadienste, u. a. Sprachkommunikation [3GPP-23228]) über IPv6 [RFC2460] kommunizieren können muss:

The UE shall support IPv6 for the connection to the IM CN subsystem. However, UEs may in addition support IPv4 which allows for the connection to early IM CN subsystem implementations that use IPv4 only. [3GPP-23221, Abschnitt 5.1]

Es sei angemerkt, dass die Planung eine Unabhängigkeit des IMS vom restlichen Netz vorsieht. So wird eine *UMTS Integrated Circuit Card* (UICC), also die „SIM-Karte“, sowohl eine Applikation namens *User Services Identity Module* (USIM) zum Zwecke der Identifikation und Authentifikation gegenüber dem funkbasierten Zugangsnetz enthalten, als auch eine Applikation namens *IP Multimedia Services Identity Module* (ISIM) zum Zwecke der Identifikation und Authentifikation gegenüber Diensten im IMS. [Telia] Zumindest in der Theorie ergibt sich so die Möglichkeit der Nutzung eines IMS über ein anderes Zugangsnetz als Mobilfunk (zum Beispiel über WLAN oder einen Festnetz-Internetzugang) als auch die Nutzung eines alternativen IMS. Bis Mitte 2002 war eine „access independence“ des IMS auch für Release 5 vorgesehen, seitdem ist sie es nur noch für Release 6 und später. [3GPP-22228]

Mobilfunkstandards der zweiten Generation (GSM, iDEN, D-AMPS, PDC, ...) und auch der derzeit für UMTS zur Verwendung kommende Standard *Release 99* spezifizieren für die Übertragung von Sprachdaten ausschließlich eine Leitungsvermittlung.

Erhofft wird eine deutliche Kostenersparnis, insbesondere durch den Wegfall der für die Leitungsvermittlung notwendigen Infrastruktur. Die Infrastruktur zur Realisierung der Paketvermittlung wird in jedem Fall benötigt.

1.2.2 Interesse der Anwender

Zwei typische Fälle für die Nutzung von VoIP im Festnetzbereich sind:

1. Privatpersonen, die zu Hause auf ihren Telefonfestnetzanschluss verzichten, aber einen kabelgebundenen, meist breitbandigen Internetzugang haben, über den sie per VoIP telefonieren;
2. Geschäftsleute, die sich viel außerhalb der eigenen Geschäftsräume aufhalten, aber am jeweiligen Aufenthaltsort (zum Beispiel beim Kunden, im Hotel, auf einer Messe) über einen Internetzugang verfügen, den sie mit mitgebrachter Computerausrüstung verwenden können. Insbesondere im Ausland ist die Nutzung von VoIP oft deutlich günstiger als die Nutzung eines Mobiltelefons oder eines Telefons der hoteleigenen Telefonanlage.

Beide Fälle lassen sich realistisch auf die Welt des Mobilfunks übertragen: Privatpersonen, die keinen Festnetzanschluss mehr haben, nutzen dennoch oft ein Mobiltelefon. Wer zu Hause auch auf einen Breitband-Internetzugang verzichten und im Rahmen seines Mobilfunkvertrags den Internetzugang über Mobilfunk günstig nutzen kann, hätte die Möglichkeit, auch über VoIP zu telefonieren – statt ausschließlich zu den Bedingungen seines Mobilfunkanbieters –, mit den üblichen, kostensenkenden Vorteilen.

Der genannte Geschäftsreisende wäre nicht mehr gezwungen, am Aufenthaltsort einen Internetzugang zu suchen, gegebenenfalls zu bezahlen und seine Geräte für die Nutzung zu konfigurieren, sondern könnte – moderate Preise für den IP-Datenverkehr vorausgesetzt – bei vorhandener Mobilfunkversorgung unabhängig und dadurch flexibler und potentiell günstiger (und potentiell sicherer, aber siehe dazu Abschnitt 2.3) Gespräche führen.

1.2.3 Push-to-talk over Cellular

Der Begriff *Push-to-talk* (PTT), auch *Push-To-Talk* oder *Push to talk* geschrieben und (selten) *Push for talk* genannt, beschreibt ganz wörtlich die Vorgehensweise bei der Nutzung eines Sprechfunkgeräts: Ein Knopf am Gerät muss gedrückt gehalten werden, um eine Sprachnachricht übermitteln zu können. Bei der herkömmlichen, analogen Sprechfunktechnik erhalten dabei, vereinfacht dargestellt, alle eingeschalteten und auf die verwendete Frequenz eingestellten Geräte die Nachricht und geben sie zeitgleich auf einem Lautsprecher oder Kopfhörer aus.

Mit *Push-to-talk over Cellular* (PoC) wird ein Push-to-talk-Dienst bezeichnet, der über ein digitales Mobilfunknetz realisiert wird. Nutzer eines solchen Push-to-talk-Dienstes drücken an ihrem Mobiltelefon eine Taste, halten sie gedrückt, bekommen akustisch und/oder visuell eine Freigabe signalisiert und beginnen dann, ihre Nachricht zu sprechen. Die Empfänger der Nachricht wurden zuvor (einzeln oder als Gruppe) anhand ihrer Mobilfunkrufnummer ausgewählt und bekommen die Nachricht übertragen, noch während der Absender sie in sein Gerät spricht. Je nach Endgerät und Einstellung wird die Nachricht bei den Empfängern entweder ohne Rückfrage gleich während des Empfangs oder erst nach Bestätigung durch den Anwender abgespielt.

PoC gibt es derzeit in etlichen Varianten. Eine davon stammt vom bekannten Endgeräte- und Infrastruktur-Hersteller *Nokia* zur Nutzung in Mobilfunknetzen mit Paketvermittlung und kommt u. a. beim Anbieter T-Mobile Deutschland zum Einsatz, eine andere stammt vom Hersteller *Motorola* zur Nutzung in iDEN-Netzwerken (gekoppelt mit der interessanten Fähigkeit, Nachrichten auch zwischen den Endgeräten, ohne Nutzung der Netzwerkinfrastruktur, austauschen zu können [Motorola]). Eine dritte Variante ist der späte Versuch der Standardisierung durch die *Open Mobile Alliance* (OMA), die PoC als ein Feature des IMS [3GPP-23228] in Mobilfunknetzen der dritten Generation vorsieht. [OMAPoC]

Die genaue Spezifikation der beiden erstgenannten Varianten ist nicht öffentlich zugänglich. Nokia hat bereits im Jahre 2004 angekündigt, den OMA-Standard zu unterstützen:

“Nokia’s ... solution provides competitive performance, a full feature set, and a smooth network software upgrade path to the upcoming Open Mobile Alliance (OMA) standard.” [NokiaPoC], nutzt die noch ausstehende Standardisierung jedoch seitdem auch gerne, um zu verteidigen, dass Funktionen, die die PoC-Implementierungen der Mitbewerber bieten, nicht unterstützt werden:

Die Verabschiedung des PoC-Standards durch die OMA steht unmittelbar bevor und soll noch gegen Ende 2004 abgeschlossen sein. Wir sind daher überzeugt, dass es nicht sinnvoll wäre ..., ... Vorstandard-Versionen von PoC ... durch weitere Zwischenlösungen auf einen Nenner zu bringen. [NokiaPoC2]

Technisch realisiert wird PoC in den meisten Fällen unter Nutzung von IP. Die Signalisierung des unidirektionalen Gesprächswunschs erfolgt mittels SIP (siehe dazu Abschnitt 2.1.1) und die Übertragung der Sprachdaten per RTP (siehe Abschnitt 2.2.1). Da diese Protokolle üblicherweise auch bei VoIP zum Einsatz kommen, ist davon auszugehen, dass Erfahrungen, die im Betrieb eines Push-to-talk-Dienstes gewonnen wurden, nützlich bei der Realisierung eines VoIP-Angebots im Mobilfunk sein können – und andersherum, dass eine Kommunikationsstrecke, die für VoIP geeignet ist, auch für PoC geeignet sein müsste.

PoC hat gegenüber VoIP allerdings den Vorteil – zumindest was die Anforderungen an den Netzbetreiber betrifft –, in einem halb-duplex-Modus zu arbeiten und nicht für längere, stark interaktive Kommunikation gedacht zu sein. Die deutlichste sich daraus ergebende Vereinfachung ist, dass eine Nachricht verzögert ankommen darf. Eine Pufferung der Daten im empfangenden Endgerät ist also möglich, wodurch Schwankungen bei der Übertragungsgeschwindigkeit, die eine flüssige, unverzögerte Wiedergabe der Nachricht erschweren können, problemlos ausgeglichen werden können. Die Verzögerung bei der Wiedergabe beträgt nach Angaben der Anbieter „einige wenige Sekunden“ [T-Mobile] und liegt erfahrungsgemäß unter zwei Sekunden.

Zur Ermöglichung von PoC ist also lediglich eine qualitativ mittelmäßige Paketdatenübertragung zwischen den Endgeräten und einer zentralen Stelle notwendig, wie sie durch GPRS bereits gegeben ist.

1.2.4 Verhinderung?

Mobilfunkanbieter stehen dem Thema „VoIP“ derzeit sehr vorsichtig gegenüber (siehe Abschnitt 1.2.1). Ein offensichtlicher Grund ist, dass der Gesprächsaufbau ohne Mitwirkung des Netzbetreibers stattfinden kann (und dabei eine nur geringe Datenmenge

übermittelt werden muss, sich also kaum etwas daran verdienen ließe) und der Transport der Sprachdaten zumindest dann oft günstiger ist als eine über den Netzbetreiber vermittelte, herkömmlich nach Zeit abgerechnete Sprachverbindung, wenn eine ausreichend große Mindestabnahme von Datenvolumen (bis hin zur Flatrate) tariflich vereinbart ist. Insbesondere die vollkommen freie Wahl des Anbieters, der kostenpflichtige Dienste wie die Überleitung in ein anderes Telefonnetz übernimmt, pro VoIP-Gespräch² erlaubt Netzbetreibern keine Gegenfinanzierung zum Beispiel für günstige Inlandsgespräche durch höhere Einnahmen bei Gesprächen ins Ausland.

Es drängt sich also der Gedanke auf, die Mobilfunknetzbetreiber könnten Gefallen an der Idee finden, die Nutzung von VoIP unterbinden zu können ohne die Leistungsfähigkeit des Netzes in anderer Hinsicht einschränken zu müssen. Fände sich eine passende Kombination von Einstellungen, wäre die aus der VoIP-Technik erwachsende Konkurrenz ausgestochen, ohne dass der Netzbetreiber von außen erkennbar Paketdatenströme filtern oder sich durch Vertragsklauseln öffentlich unbeliebt machen müsste.

Im Rahmen der Vorbereitungen zu dieser Arbeit geführte Gespräche mit Mitarbeitern der Testabteilung eines in Nürnberg ansässigen Infrastrukturherstellers und einem Berater zum Thema „SIP“ mit universitärem Hintergrund, tätig bei einem deutschen Netzbetreiber, der die Nutzung von VoIP über GPRS und UMTS verbietet, zeigten jedoch, dass diesbezügliche Überlegungen zum jeweiligen Zeitpunkt (Ende 2005, Anfang 2006) nicht stattgefunden zu haben scheinen.

1.3 Qosmotec Software Solutions

1.3.1 Tätigkeitsfeld

Die Aachener Qosmotec Software Solutions GmbH erstellt und vertreibt Produkte zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit von Mobilfunknetzen. Dafür wird beispielsweise die Luftschnittstelle anhand programmierter 2D- oder 3D-Umgebungen oder anhand aufgezeichneter Fahrten simuliert, werden autarke, aber aus der Ferne instruierbare Messgeräte in größerer Anzahl im Feld verteilt oder Labortests automatisiert, die mehrere hundert Endgeräte einbeziehen können, umfangreich parametrisierbar sind und sich beliebig wiederholen lassen.

² Die Bedeutung „kosmetischer“ Eigenschaften für die Wahl des Anbieters, wie zum Beispiel die Übermittlung einer korrekten Anrufernummer, bleibe hier außer Acht.

Qosmotec provides complete solutions for automation of laboratory test, field test and drive test of wireless networks, including UMTS, EDGE, CDMA, GSM-R and GSM-BOS. [Qosmotec]

Eingesetzt werden die Produkte der Qosmotec hauptsächlich von Infrastrukturgeräteherstellern und Käufern solcher Geräte, von Netzplanern und von mit der Qualitätssicherung betrauten Einheiten in den Unternehmen der Mobilfunknetzbetreiber.

Das Kunstwort „Qosmotec“ im Firmennamen entstand aus „Quality of Service for Mobile-Technology“.

1.3.2 Das Lab Test System von Qosmotec

Das *Lab Test System* (LTS) der Qosmotec ist ein Produkt zum automatisierten Ende-zu-Ende-Test von Mobil-zu-Mobil-, Fest-zu-Mobil- und Mobil-zu-Fest-Übertragungen in Mobilfunknetzen. Getestet werden unter anderem leitungsvermittelte Daten- und Sprachübertragung, paketvermittelte Bulk- und Stream-Übertragung, mobilfunktypische Datenübertragung wie SMS und MMS, sowie alle notwendigen Voraussetzungen wie zum Beispiel Einbuchung und Bearer-Erlangung. Die Tests finden überwiegend im Labor, teilweise aber auch im Feld statt. Als Endgeräte werden im Handel erhältliche Produkte speziellen Testgeräten meist vorgezogen.

Bei einem Einsatz des LTS werden zeit- und ereignisgesteuert detailliert konfigurierte Tests automatisiert ausgeführt. Bei Gerätetests im Labor wird üblicherweise entweder eine konstant hohe Last erzeugt, unter der die Geräte beobachtet oder konfiguriert werden, oder es werden Geräte in gegebener Konfiguration einer steigenden Last ausgesetzt, um die Belastbarkeit in jener Konfiguration zu ermitteln.

Qosmotec beschreibt das LTS mit folgenden Worten:

The purpose of LTS is to fully automate your lab tests, controlling commercial or test mobiles as well as supplementary test equipment, such as the Qosmotec AIS, protocol analysers or signalling generators, and even the network switches, in a synchronous test campaign. Test suites are stored in a database and can be replayed at any time. By controlling hundreds of mobiles, LTS can also be used as end-to-end load generator. [QosmLTS]

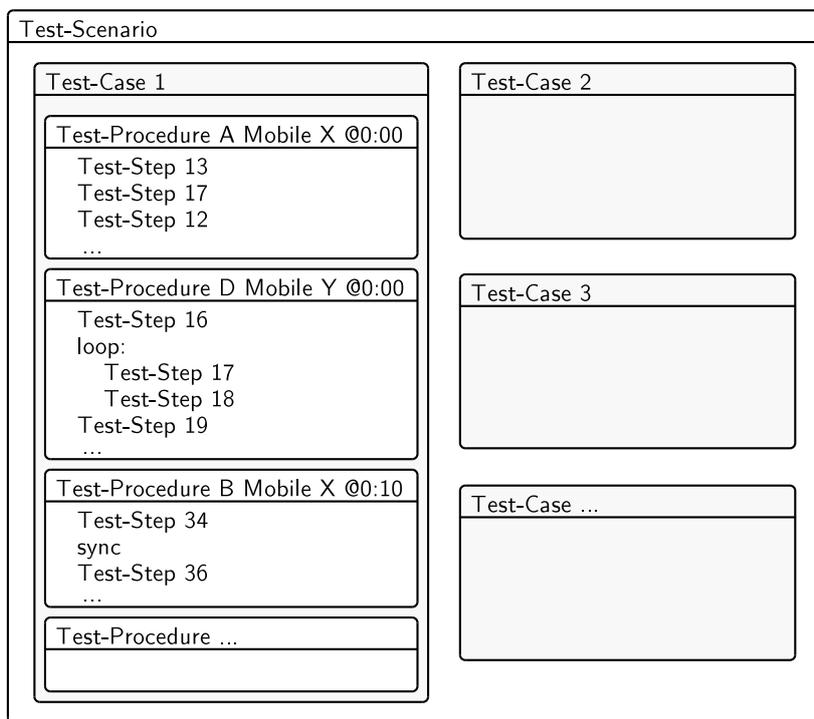


Abbildung 1.2: Testkonfiguration im *Lab Test System* von Qosmotec

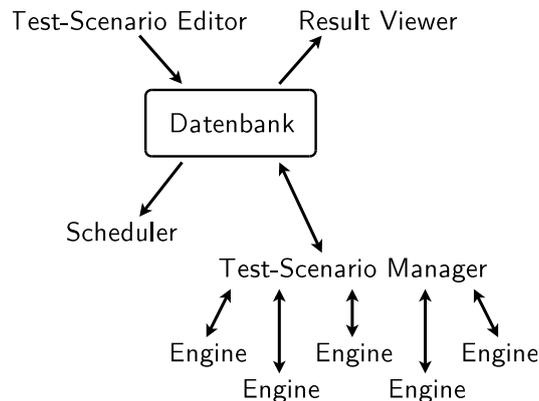


Abbildung 1.3: Schematischer Aufbau des LTS und Datenfluss

Funktionsweise des LTS

Abbildung 1.2 zeigt die Zusammenhänge in der Konfiguration der vom LTS durchführbaren Tests. Es werden „Test-Szenarien“ erstellt, die zu konfigurierbaren Zeitpunkten automatisch ausgeführt werden. Ein Test-Szenario umfasst mehrere sogenannte „Test-Cases“, die die Konfiguration mehrerer „Test-Prozeduren“ enthalten, die für jeweils eine Ressource, also üblicherweise ein Mobiltelefon oder dessen Gegenstelle, zuständig sind und alle die Test-Prozedur darstellenden „Test-Steps“ samt ihrer Parameter umfassen. Ein Step ist eine aus Sicht des LTS atomare Aktion, beispielsweise die Aufforderung an ein Mobiltelefon, seine Konfiguration zurückzusetzen, wofür im Detail auch mehrere Schritte notwendig sein können.

Abbildung 1.3 zeigt, leicht vereinfacht, die Komponenten des LTS sowie den Fluss der Daten zwischen den Komponenten. Test-Szenarien werden an zentraler Stelle mittels eines speziellen Editors unter einer graphischen Oberfläche konfiguriert; die Konfiguration wird in der zentralen Datenbank abgelegt. Auswertungen werden mittels einer anderen Komponente ebenfalls unter einer graphischen Oberfläche erstellt und können in Echtzeit und nach Ende eines Tests dargestellt werden.

Der „Test-Szenario Scheduler“ sorgt für die Ausführung eines Szenarios zum gewünschten Zeitpunkt, indem er dem „Test-Szenario Manager“ eine entsprechende Anweisung gibt. Der Test-Szenario Manager bezieht alle notwendigen Informationen aus der Datenbank, startet pro auszuführender Test-Prozedur, also beispielsweise pro Mobiltelefon, eine „Test-Engine“, übergibt jeder Engine die von ihr benötigten Parameter und gibt ihr zum konfigurierten Zeitpunkt ein Startsignal. Jede Engine führt die zur Test-Prozedur gehörenden Test-Steps aus und meldet Zwischenergebnisse, Endergebnisse und auftre-

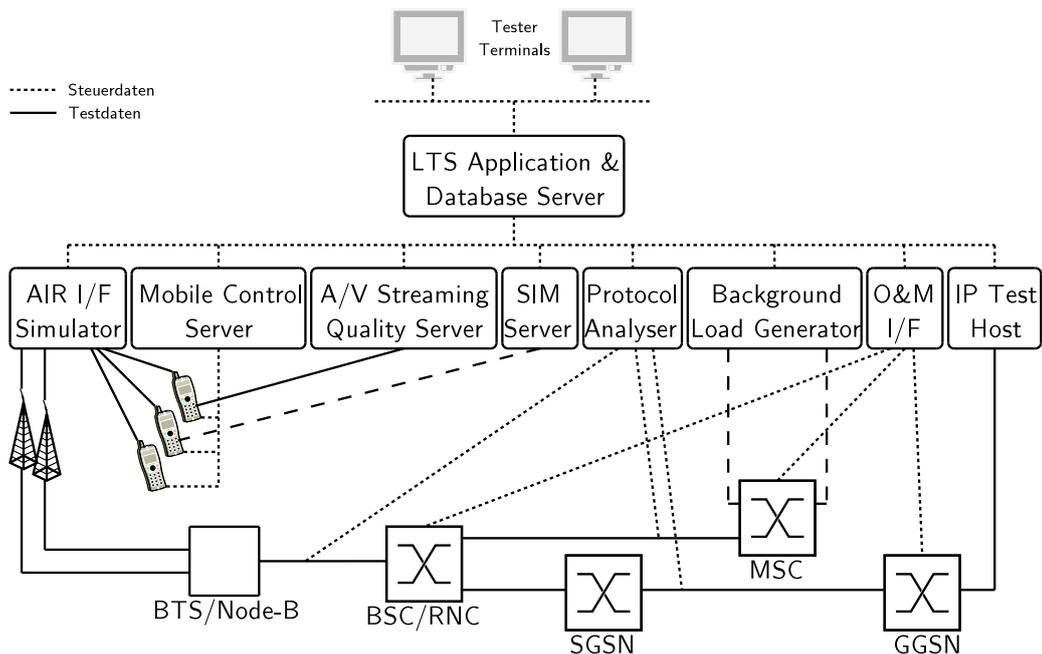


Abbildung 1.4: Qosmotecs LTS mit AIS und Mobilfunknetzkomponenten

tende Fehler an den Test-Scenario Manager zurück. Der Manager wiederum trägt die Ergebnisse, die lediglich Fakten darstellen und noch keine Auswertung beinhalten, in die zentrale Datenbank ein.

Alle für die Durchführung eines Test-Cases benötigten Ressourcen werden über diesen Mechanismus gesteuert, wobei eine Synchronisation beliebiger Komponenten immer zwischen zwei Steps erreicht werden kann.

Das von den Mobiltelefonen verwendete Mobilfunknetz, das in vielen Fällen von einer lokal angeschlossenen Basisstation (GSM *Base Transceiver Station* (BTS), UMTS *Node-B*) und weiteren Netzwerkkomponenten zur Verfügung gestellt wird, kann in seinen Eigenschaften durch Kopplung der Infrastrukturhardware mit dem LTS vor oder während eines Testlaufs automatisiert verändert werden. Abbildung 1.4 zeigt ein solches umfangreiches Setup.

Die besondere Stärke des Systems liegt in den praxisnahen, vollkommen automatisiert laufenden Tests, die die Leistungsfähigkeit der getesteten Ausrüstung im Zusammenspiel aller Komponenten über alle Schichten von Ende zu Ende ermitteln.

1.3.3 Was erreicht werden soll

Nutzer des LTS und neue Interessenten haben Qosmotec mitgeteilt, dass Interesse daran besteht, die Leistungsfähigkeit eines Mobilfunknetzes zur Nutzung für VoIP zu testen. Die Wünsche gehen im Detail weit auseinander, festhalten ließ sich aber folgendes:

- Es besteht noch kein großes Interesse daran, den VoIP-Gesprächsaufbau zu testen; die Sprachdatenübertragung scheint derzeit im Vordergrund zu stehen.
- Aussagen in der Literatur wird nur bedingt getraut, insbesondere, wenn der Autor bei der Konkurrenz arbeitet.
- Das LTS wird vorwiegend von Technikern bedient und eingesetzt; es werden detaillierte, nachvollziehbare Messergebnisse gefordert.
- Den Infrastrukturentwicklern ist es nicht möglich, Aussagen darüber zu treffen, was für Endgeräte zum Einsatz kommen könnten.

Es galt also, Qosmotecs Lab Test System um die Fähigkeit zu erweitern, Messergebnisse zu liefern, die eine Bewertung der Eignung für VoIP der getesteten Kommunikationsstrecke von Ende zu Ende ermöglichen.

Kapitel 2

VoIP-Technik

Das Funktionieren eines Telefongesprächs hängt ganz allgemein von zwei wesentlichen Faktoren ab:

1. dem Aufbau des Gesprächs; von der Mitteilung des Gesprächswunschs des Anrufers an das Telefonnetz über das Finden und Benachrichtigen des Angerufenen bis zur Annahme;
2. der Übertragung der Sprachdaten; bidirektional, halb- oder voll-duplex, unter Einhaltung angemessener Qualitätsmaßstäbe.

Diese beiden Teile sind bei Einsatz jeder Technik im Telefonnetz relevant, sei es ein analoges Telefonnetz (Plain Old Telephone System, POTS) oder ein digitales (beispielsweise ein Integrated Services Digital Network, ISDN), Festnetz oder Mobilfunk. Auch für Gespräche, die mittels VoIP-Technik über ein lokales oder weiträumiges, IP-basiertes Netz geführt werden, werden diese beiden Komponenten benötigt.

Als zum Gesprächsaufbau gehörend können auch Gesprächsabbau, Identifikation und Authentifizierung – letztendlich auch die Gebührenerfassung – gezählt werden, was aber im Rahmen dieser Untersuchung im Detail unbeachtet bleiben darf.

In der Telekommunikationsbranche üblich sind die Begriffe der *Signalisierung* und der *Vermittlung*. Unter Signalisierung (früher auch Zeichengabe genannt, englisch "signaling") wird die Steuerung der Netzfunktionen verstanden, wofür üblicherweise kurze Nachrichten zwischen den Komponenten des Telefonnetzes ausgetauscht werden. Mit Vermittlung (englisch "switching") wird die Suche, Auswahl und gegebenenfalls Reservierung eines Weges für die Übertragung der Sprachdaten bezeichnet. Oft verschwimmen die Grenzen im Sprachgebrauch, da die Signalisierung eine effiziente Vermittlung

unterstützt und vorrangig dem Aufbau von Verbindungen zwischen Teilnehmern dient, wofür wiederum die Vermittlung unabdingbar ist.

2.1 Gesprächsaufbau

In herkömmlichen, kabelgebundenen Telefonnetzen erfolgt die Vermittlung in Vermittlungsstellen, früher mittels galvanischer Kopplung und mechanischer Vermittlungstechnik, seit vielen Jahren in Deutschland ausschließlich mittels elektronischer Wegewahl und Weiterleitung der Sprache in digitaler Form. In dem Standard GSM entsprechenden Mobilfunknetzen erfolgt die Vermittlung von Gesprächen in sogenannten *Mobile Services Switching Center* (MSC), von denen es etwa eines pro größerer Stadt gibt. [Schiller03, S. 137] UMTS entsprechend dem Standard *Release 99*, wie es derzeit in Deutschland zum Einsatz kommt, vermittelt Gespräche wie GSM.¹

Zum Aufbau von VoIP-Gesprächen werden hauptsächlich zwei standardisierte Verfahren eingesetzt: H.323, standardisiert von der ITU-T [ITU-H323], und das *Session Initiation Protocol* (SIP), standardisiert als RFC [RFC3261] unter Mitarbeit einer Working Group der IETF [IETF-SIP] und übernommen vom 3GPP [3GPP-SIP]. Diverse weitere Verfahren existieren, sind aber größtenteils nicht standardisiert, wenn überhaupt öffentlich einsehbar dokumentiert. Solche anderen Verfahren kommen oft dort zum Einsatz, wo Interoperabilität nicht gewünscht ist, sich also beispielsweise eine „Telefon-Software“ nur mit dem Netz eines konkreten Diensteanbieters verwenden lassen soll. Ein Beispiel dafür ist *Skype*, siehe Abschnitt 2.5.

Größter Unterschied zur klassischen Vermittlung ist bei der Verwendung von Voice over IP die deutlich größere Flexibilität. Ähnlich der Zustellung von E-Mails im Internet (über MX-Einträge im DNS [RFC974][RFC1123, 5.2.12]) erlauben SIP und H.323 die Angabe von Proxys und die Weiterleitung von Gesprächen. Ziele sind dabei sowohl eine Erreichbarkeit unabhängig vom konkreten Aufenthaltsort als auch Flexibilität bei gleichzeitiger Unterstützung langfristig gleichbleibender Adressen.

Einen fein gegliederten, aber nicht zu detailreichen Überblick über Unterschiede und Gemeinsamkeiten von H.323 und SIP bietet [H323vsSIP].

¹ Auch für die bei Nutzung von Release 99 bereits mögliche Video-Kommunikation findet der Transport sowohl der Audio- als auch der Videodaten ausschließlich über eine leitungsvermittelte Datentransportstrecke (mit einer Datenrate von 64 kBit/s) statt.

2.1.1 SIP

Das Session Initiation Protocol bietet Unterstützung beim Aufbau einer Kommunikationsverbindung, indem es einen Rahmen beschreibt, innerhalb dessen folgendes möglich ist (nach [RFC3261, Abschnitt 2]):

- Aufenthaltsort bzw. aktuelle Kontaktadressen der gewünschten Gesprächspartner ermitteln;
- Verfügbarkeit der gewünschten Gesprächspartner überprüfen;
- feststellen, welche Formate und Protokolle die Systeme der Gesprächspartner unterstützen, und die passenden auswählen;
- einen Verbindungsaufbauwunsch signalisieren und die Verbindungsparameter aushandeln;
- bestehende Verbindungen verwalten (Verbindung beenden oder schwenken, Parameter ändern, Dienste aufrufen).

SIP schreibt nicht vor, welche Protokolle für die einzelnen Aufgaben Verwendung finden sollen. Fast ausschließlich verwendet werden jedoch das *Session Description Protocol* (SDP) [RFC2327] für die Beschreibung einer Multimedieverbindung und das *Real-time Transport Protocol* (RTP) [RFC1889] zur Übertragung der Inhalte (siehe auch Abschnitt 2.2.1).

Die Syntax von SIP-Nachrichten ist stark an die von E-Mails angelehnt, die Bedeutung etlicher Header-Zeilen ist gleich. SIP referenziert explizit RFC 2822, der den Aufbau von E-Mails beschreibt. Die Kommunikation erfolgt zustandlos wie bei HTTP ([RFC2616]), Rückgabewerte decken sich in der Bedeutung mit denen von HTTP, und auch der Authentifizierungsmechanismus basiert auf dem des Challenge-Response-Verfahrens in HTTP.

SIP kann über diverse Transportmechanismen eingesetzt werden, solange die Integrität der einzelnen Nachrichten gesichert ist. Üblich ist die Verwendung von UDP, gelegentlich auch von TCP.

2.1.2 H.323

H.323 ist ein Standard², der auf etliche andere Standards verweist, allein sechs für Signalisierung und Steuerung, mindestens fünf Audio- und zwei Video-Codecs sowie elf Er-

² Die ITU selber bezeichnet die von ihr herausgegebenen Standards als „Empfehlungen“.

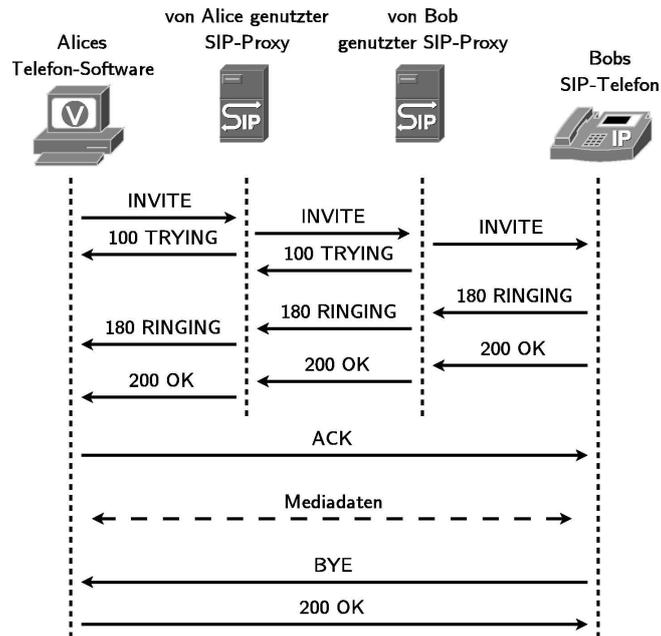


Abbildung 2.1: Ablauf einer SIP-gesteuerten Kommunikation, nach [RFC3261, Abschnitt 4]

weiterungen zu diversen Einzelgebieten wie zum Beispiel zum Thema Fax. [OpenH323] Die erste, im November 1996 veröffentlichte Version des H.323 trug noch den Titel "Visual telephone systems and equipment for local area networks which provide a non-guaranteed quality of service", der aber mit der im Februar 1998 veröffentlichten Version in "Packet-based multimedia communications systems" geändert wurde. [ITU-H323].

Auch bei Verwendung von H.323 für VoIP-Gespräche wird für die Sprachdatenübertragung fast immer RTP eingesetzt.

2.2 Sprachdatenübertragung

2.2.1 Datentransport

Für den Transport von Daten, die einen Bezug zur Echtzeit haben, gibt es für die Nutzung mit IPv4 oder IPv6 das *Real-time Transport Protocol* (RTP) mit dem dazugehörigen *RTP Control Protocol* (RTCP); sie sind in [RFC1889] beschrieben. Mit "real-time" ist dabei die Anforderung gemeint, die Daten auf Seiten des Empfängers so zu erhalten, dass eine Weiterverarbeitung (im Falle von Multimedia-Daten also meist

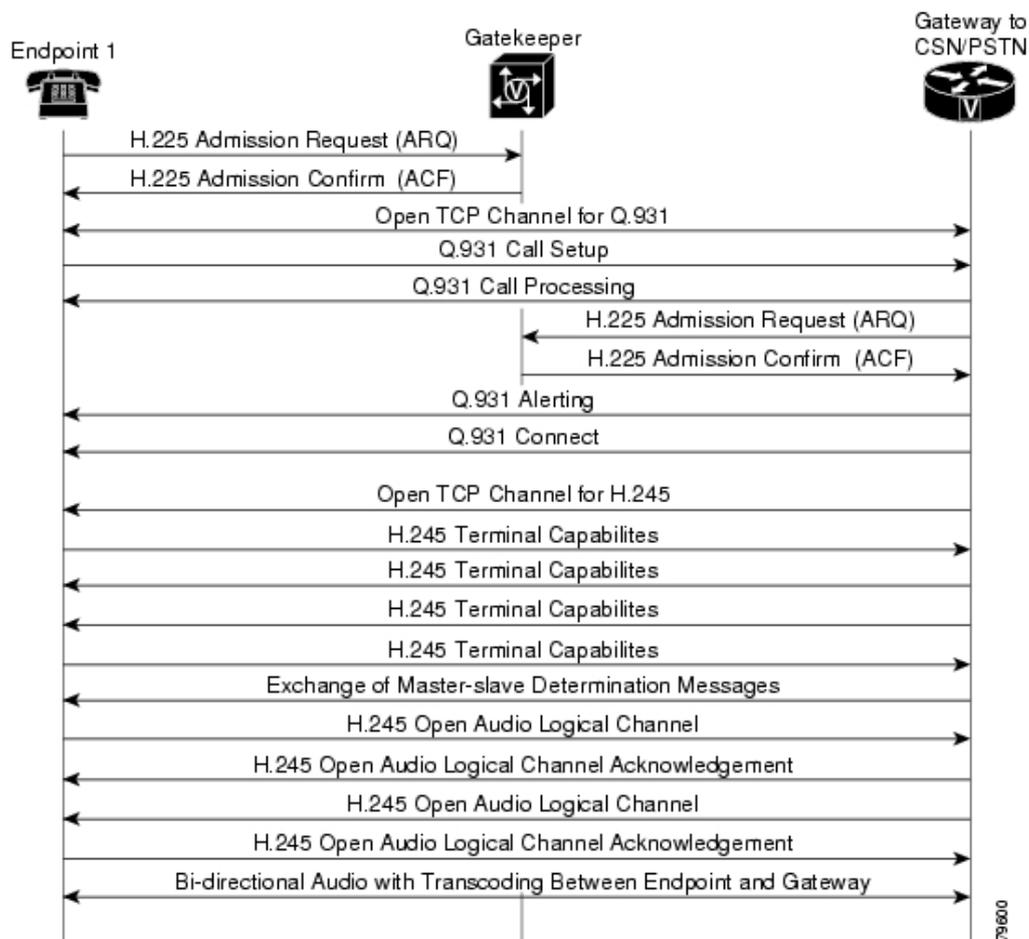


Abbildung 2.2: Ablauf eines Gesprächsaufbaus unter Verwendung von in H.323 referenzierten Standards, aus [CiscoH323]

eine Wiedergabe des Inhalts) mit möglichst exakt der gleichen Geschwindigkeit erfolgen kann wie die Daten auf Senderseite vorlagen.

RTP-Datenpaketheader sind im Aufbau relativ simpel und enthalten als wesentliche Bestandteile die Angabe des Inhalts (*payload type*), Identifikatoren der verwendeten Zeit- und Datenquellen und die Angabe des Zeitpunkts, zu dem der Anfang des in jenem Paket übermittelten Ausschnitts aus dem Datenstrom beim Absender vorgelegen hat. An den Zeitstempel werden gewisse Anforderungen gestellt; so muss er unter anderem linear zur Echtzeit erhöht werden und eine Auflösung haben, die dem Empfänger eine ausreichend genaue Synchronisation sowie die Analyse von Schwankungen (*jitter*) beim zeitlichen Abstand zwischen den Zeitpunkten des Eintreffens der Datenpakete ermöglicht. Diese Auflösung des Zeitstempels und das Format der in RTP-Paketen als Nutzlast übertragenen Daten sind von der Art des Inhalts abhängige Eigenschaften, die in eigenen Standards beschrieben werden. Als Beispiel genannt sei die Spezifikation des RTP-Paketformats für den Fall der Übertragung von AMR-codierten Audio-Daten. Sie schreibt vor, dass der Zeitstempel pro Sample um 1 erhöht wird, also um 8.000 pro Sekunde beziehungsweise um 160 pro Frame mit 20 ms Dauer. [RFC3267, Abschnitt 4]

Eine Herausforderung bei der Übertragung von Sprachdaten (und anderen Echtzeit-Formaten) ist die Reduzierung des durch Paketierung und Adressierung entstehenden Overheads. So ist ein typisches IPv4-Paket, das UDP-Daten transportiert, die RTP-konform formatiert sind und AMR12.2-codierte Sprache (siehe Abschnitt 2.2.2) als Nutzlast tragen, typischerweise 73 Byte groß, von denen 20 auf den IP-Header, 8 auf den UDP-Header, 12 auf den RTP-Header und 33 auf die AMR-Nutzlast entfallen, wobei von letzterer 30,5 Bytes tatsächlich die Sprache kodieren (siehe Abbildung 2.3). Handelt es sich um die AMR-Variante mit 4,75 kBit/s Sprachdatenrate, so entfallen auf die Sprachdaten lediglich noch 13 Bytes [3GPP-26101, Tabelle A.1b]. Handelt es sich um IPv6 statt IPv4, so ist der IP-Header um 20 Byte größer.

Eine Möglichkeit der Reduzierung des Overheads bietet eine Komprimierung der Paketheader entsprechend [RFC1144] von *Van Jacobson*. Diese Variante ist weit verbreitet, deckt jedoch nur TCP-basierten Datenverkehr ab und kommt bei UMTS derzeit nicht zum Einsatz.

Eine bessere Möglichkeit der Reduzierung des Overheads bietet die *Robust Header Compression* (ROHC), die ausführlich in [RFC3095] besprochen wird. Die Überlegungen entstanden mit konkretem Blick auf die Übertragung von Sprache mittels RTP über drahtlose Netzwerke. Eine Untersuchung hat ergeben, dass durch die Einsparung bei der Datenmenge für GSM-codierte Sprache "ROHC roughly cuts the bandwidth required for voice transmissions in half". [Rein03] ROHC erlaubt den Verzicht auf Prüfsummen

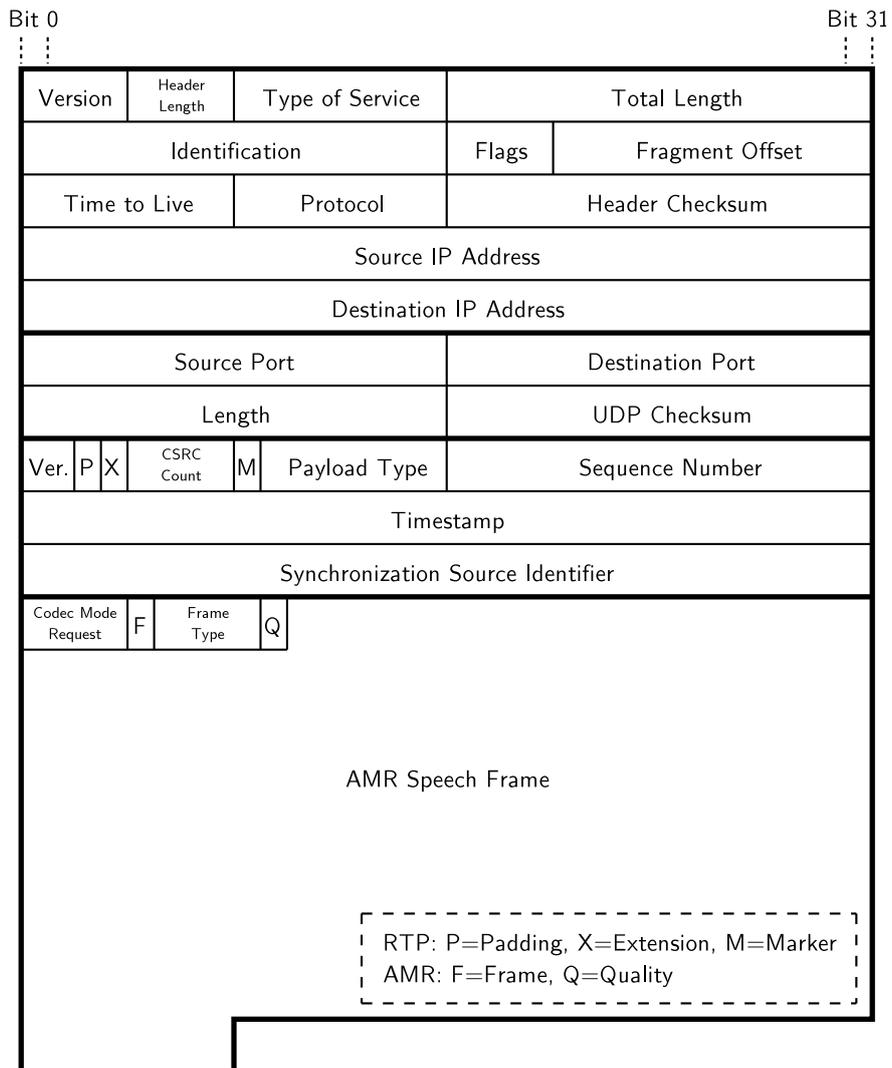


Abbildung 2.3: Typisches Paket mit IPv4-, UDP- und RTP-Header sowie AMR-RTP-Payload

beziehungsweise die flexiblere Auswahl des überprüften Bereichs, was insbesondere in Kombination mit *UDP-Lite* [RFC4019] sinnvoll sein kann. Da viele Sprachcodecs aus beschädigten Datenpaketen noch nutzbare Daten extrahieren können, kann so neben der Effizienz bei der Auslastung der Übertragungsstrecke auch die erreichte Sprachqualität erhöht werden. Eine andere Untersuchung kommt nach Auswertung mehrerer möglicher Strategien zum Schluss, dass das Fehlen eines Frames eine stärkere negative Auswirkung auf die empfundene Sprachqualität hat als die Beschädigung eines Frames, der aber dem Empfänger zugestellt wird. [Hammer03]

Im Mobilfunkbereich existiert der Nachteil, dass die Übertragung über die Luftschnittstelle sehr störanfällig ist (unter anderem aufgrund von Dämpfung, Streuung, Beugung, Reflexion, Mehrwegeausbreitung [Schiller03, Abschnitt 2.4]). Als vorteilhaft angesehen werden kann andererseits die Fähigkeit des Netzes, auf untersten Schichten eine flexible Einstellung der gewünschten Eigenschaften der Übertragungsstrecke zu ermöglichen (siehe auch Abschnitt 2.4.2). So kann durch Auswahl der je nach Anwendungszweck wichtigeren Eigenschaften eine optimale Ausnutzung in Bezug auf die erreichte Qualität erzielt werden.

2.2.2 Codecs

Als *Codec* (kurz für *Coder/Decoder*) wird ein Verfahren bezeichnet, mittels dessen der aus einem Analog/Digital-Wandler erhaltene Rohdatenstrom in eine für den jeweiligen Anwendungszweck geeignetere digitale Darstellung gebracht (bzw. wieder zurückgewandelt) wird. Gelegentlich steht der Begriff auch für ein Programm, das ein solches Verfahren umsetzt. Ein Codec ist fast immer auf eine konkrete Art von Eingabe spezialisiert – Sprache, Musik, Video, Video mit schnellen Bewegungen etc.

Relevant für die Auswahl eines Codecs sind aus technischer Sicht neben der zu erwartenden Art der Eingabe unter anderem die Datenrate nach erfolgter Codierung und die benötigte Rechenleistung. Eigenschaften der Umwandlung analoger Daten in digitale sind die Abtastrate (Sampling-Rate), die angibt, wie oft pro Zeit der aktuelle Zustand des analogen Signals erfasst wird, und die Genauigkeit der Quantisierung, also die Anzahl der Werte, die das Ergebnis jeder Messung annehmen kann. Bei naiver Vorgehensweise ergibt sich die Datenrate als Produkt aus Samplingrate und Genauigkeit der Quantisierung, beispielsweise als $8 \text{ kHz} \cdot 16 \text{ Bit} = 128 \text{ kBit/s}$. Der im ISDN übliche Codec G.711a errechnet aus den höherwertigen 13 Bit jedes gemessenen Wertes einen Datenstrom, der pro Wert nur noch 8 Bit Information trägt, mithin $8 \text{ kHz} \cdot 8 \text{ Bit} = 64 \text{ kBit/s}$ ergibt. Eine solche durch einen Codec vorgenommene Umwandlung findet meist in Hinblick auf die Fähigkeiten des menschlichen Gehörs statt; dort nicht mehr unterscheidbare

Werte können also zusammengefasst werden. Bei Einsatz höherer Rechenleistung und ausgefeilter psychoakustischer Modelle lässt sich die effektive Datenrate deutlich weiter reduzieren.

Die Ausgabe eines Codecs erfolgt üblicherweise in Form von *Frames*, die jeweils die Daten einer von Frame zu Frame meist gleichbleibenden Zeitspanne enthalten, bei Sprachcodecs in der Größenordnung von 10 bis 30 ms. Die Dauer eines Frames ist ein Maß für die Zeit, die beim Codieren gewartet werden muss, und ein Indiz für die Größe der Lücke, die entsteht, falls ein Frame – der normalerweise die kleinste sinnvoll transportierbare Einheit darstellt – beim Transport verloren geht. Einige verbreitete Sprachcodecs sind mit ihren jeweiligen Eigenschaften in Tabelle 2.1 aufgeführt.

Die Auswahl eines Codecs für VoIP wird von den beiden Endstellen der Übertragungsstrecke getroffen. Eine Umsetzung codierter Sprache von einem Codec in einen anderen ist grundsätzlich möglich, aber nicht immer verlustfrei. Kaum ein Codec bietet die Möglichkeit, während eines Gesprächs ohne Unterbrechung, also von einem Frame zum nächsten, die Datenrate zu wechseln. Diese Fähigkeit bringt die Familie der AMR-Codecs mit, weshalb sie für den Einsatz mit mobilen Endgeräten und schwankenden Übertragungsbedingungen sehr gut geeignet sind.

Ein Wechsel des AMR-Codecs auf einen anderen Typ, also eine andere Datenrate, kann ohne Ankündigung stattfinden und üblicherweise auch von der Gegenstelle erbeten werden. Eine Untersuchung der University of Plymouth kam zu dem Ergebnis, dass ein Wechsel des Codecs, der nicht durch reine Netzwerkparameter wie beispielsweise die aktuelle Paketverlustrate gesteuert wurde, sondern durch in Echtzeit ermittelte Werte der Sprachqualität, eine insgesamt höhere Qualität der Sprachübertragung lieferte. [Qiao04]

Frames von mit AMR codierter Sprache enthalten, wie auch viele durch andere Codecs erzeugte Frames, mehrere Abschnitte, die jeweils Daten mit bestimmter Wichtigkeit enthalten. Meist werden die wichtigsten Daten als "Class A"-Daten bezeichnet, weniger wichtige als Class B und C. Class A-Daten dürfen beim Transport nicht beschädigt werden, eine sinnvolle Wiedergabe der codierten Sprache wäre nicht mehr möglich. Beschädigungen an anderen Daten haben je nach Codec unterschiedlich wiegende Auswirkungen, oft ist die Beschädigung einer geringen Anzahl von Bits der Klasse B oder einer größeren Anzahl der Klasse C noch akzeptabel.

In Verbindung mit der Eigenschaft spezieller Protokolle (ROHC, UDP-Lite; siehe Abschnitt 2.2.1), Prüfsummen nur über einen Teil eines Pakets (meist von Beginn, über den Paketheader, bis zu einer maximalen Länge) zu bilden – was das Datenaufkommen verringert und geringere Rechenleistung bei Sender und Empfänger erfordert – ergibt sich die Möglichkeit, Class A-Daten an den Beginn der Nutzlast zu schreiben, wo ihre

Name	Einsatzgebiet	Datenrate	Rechenbedarf	Frame-Länge	Sampling-Rate
G.711	ISDN/VoIP	64 kbit/s	sehr gering	0,125 ms	8 kHz
GSM Full Rate (06.10 RPE-LTP)	GSM/VoIP	13 kbit/s			
GSM Half Rate	GSM	6,5 kbit/s	3-4x wie GSM FR		
GSM Enhanced FR (= AMR 12.20)	GSM/UMTS	12,2 kbit/s			
AMR	UMTS	4,75 – 12,2 kbit/s		20 ms	8 kHz
G.723.1	Video/VoIP	5,3 kbit/s (6,3)	< 16 MIPS	30 ms	
G.726 (ADPCM)	DECT/VoIP	32 kbit/s (16/24/40)	mittel	0,125 ms	
G.729a (CS-ACELP)	VoIP	8 kbit/s (6,4/11,8)	10,5 MIPS	2x 10 ms	
iLBC	VoIP	13,3 kbit/s (15,2)	wie G.729a	30 ms (20)	8 kHz

Tabelle 2.1: Auswahl verbreiteter Sprachcodes und ihre Eigenschaften

Mehr Details bei: [\[VoIPForum\]](#) [\[WikipCodecs\]](#) [\[WikipEnCodecs\]](#) [\[CiscoCodecs\]](#) [\[CiscoVoiceQual\]](#) [\[UisetStafsnes\]](#)

Integrität durch eine Prüfsumme gesichert wird, und weniger wichtige Daten hinten anzuhängen.

2.2.3 Analogdatenübertragung außer Sprache

Ein klassischer, analoger Telefonanschluss kann neben der Verwendung für Telefongespräche unter anderem auch dafür genutzt werden, Faxe zu verschicken. Dabei wird für eine effiziente Übertragung die Tatsache ausgenutzt, dass die Leitung in einem Frequenzbereich von 300 bis etwa 3.400 Hz nutzbar ist, womit die in Faxgeräten eingebauten Modems üblicherweise eine Datenübertragungsrate von 14,4 kBit/s erzielen. Eine solche Modemverbindung lässt sich normalerweise nicht, außer mit Glück oder unter Inkaufnahme eines erhöhten Risikos der Verfälschung der Daten, über eine Übertragungstrecke nutzen, für die der Codec unter der Annahme, dass es sich bei den analogen Daten um *Sprache* handelt, ausgewählt wurde.

Des Weiteren können Töne, die jeweils einer Taste auf dem Telefon zugeordnet sind und auch für das *Mehrfrequenzwahlverfahren* (MFV) (englisch *Dual-tone multi-frequency* (DTMF)) eingesetzt werden, während einer Verbindung auf Tastendruck an die Gegenstelle übermittelt werden. Ursprünglich als In-Band-Verfahren zur Übertragung von Telefonnummern in einem Telefonnetz entwickelt, werden diese Töne heute verwendet, um von analogen Telefonanschlüssen aus dem Gerät am anderen Ende der Leitung (also zumeist einer ISDN-Anlage oder der Ortsvermittlungsstelle) die Nummer des gewünschten Gesprächspartners zu übermitteln oder um nach dem Zustandekommen einer Verbindung Daten an ein automatisch arbeitendes System (zum Beispiel Menü-Steuerung, Auskunftssystem, Anrufbeantworter) auf der Gegenseite zu übermitteln.

Bei der Nutzung von VoIP für die Sprachdatenübertragung gibt es in Bezug auf DTMF ein ähnliches Problem wie bei der Fax-Übertragung; die verlustbehaftete Wandlung macht die korrekte Codierung und Decodierung zu einem Glücksspiel. Es existieren drei Varianten der Out-of-Band-Übertragung:

1. RTP bietet die Möglichkeit, DTMF-Töne (und auch besondere Fax-Steuer-Töne) in einem eigenen Datenstrom zu signalisieren [RFC2833].
2. SIP bietet die Möglichkeit, Information über die gedrückte Taste und Dauer des Drückens in einer „INFO“-Nachricht mit dem Content-Type „application/dtmf-relay“ zu übermitteln. Diese Variante erfreut sich größerer Beliebtheit, da die Benutzerschnittstelle (zum Beispiel in Form eines Fensters in einer graphischen Oberfläche) zum Aufbau und sonstiger Verwaltung eines Gesprächs auch die Schnittstelle zur Eingabe und Signalisierung von DTMF-Tönen bieten kann, sich aber wei-

terhin nur mit SIP-basierter Kommunikation befassen muss und die RTP-basierte Kommunikation einem anderen Programmmodul überlassen kann. Allerdings ist Interoperabilität mangels Standardisierung nicht zuverlässig gegeben, was für alle „INFO“-Nachrichten gilt und einer der Gründe ist, weshalb deren Nutzung generell in Frage gestellt wird. [DraftInfo]

3. SIP bietet außerdem die Möglichkeit, Informationen mittels SIP-„Events“ mit einem Subscribe/Notify-Verfahren zu übertragen. Vorgeschlagen ist die Standardisierung eines Event Packages, das die Daten, ausgezeichnet unter Verwendung der *Key Press Markup Language* (KPML), auch *Keypad Markup Language*, überträgt. [DraftKPML]

Mobilfunknetze mit leitungsvermittelten Sprachverbindungen bieten üblicherweise eine explizite Möglichkeit der Out-of-Band-Signalisierung von Tastendrücken. Der Ablauf bei GSM ist beschrieben in [GMS-0314].

2.3 Sicherheit

Unter „Sicherheit“ versteht man in der Kommunikationstechnik Verfügbarkeit (availability), Integrität (integrity) und Vertraulichkeit (confidentiality), gelegentlich auch Nichtabstreitbarkeit (non-repudiability). Eine besondere Herausforderung bei VoIP ist dabei die Vertraulichkeit der Daten, die heutzutage in üblicherweise unverschlüsselten IP-Paketen übertragen werden. Auch eine Möglichkeit der (staatlichen) Überwachung von VoIP-Gesprächen wird bereits gefordert und gestaltet sich nicht aufwändiger als die Überwachung leitungsvermittelter Gespräche, sofern ein Zugriff auf die übermittelten Datenpakete gegeben ist. [HeiseUeberw]

Der Einsatz einer Verschlüsselung der Sprachdaten erscheint also wünschenswert. In Kombination mit einer verschlüsselt erfolgenden Signalisierung und der Vermittlung von Gesprächen über vertrauenswürdige Server ergäbe sich eine abhörsichere Möglichkeit der Sprachkommunikation. Offen bleibt, ob Gespräche in absehbarer Zeit häufiger pauschal abgerechnet werden, so dass auch eine Erfassung von Informationen über Ziel und Dauer eines Gesprächs zum Zwecke der Abrechnung vermeidbar wird.

Gesprächsaufbau

SIP-Daten lassen sich relativ einfach durch SSL oder TLS geschützt übertragen; Ende-zu-Ende-Verschlüsselung, Identifikation und Authentifikation sind bei Verwendung geeigneter Zertifikate dadurch gegeben. Nachteil ist, dass bei Verwendung von TLS nach

[RFC2246] (oder dessen Nachfolger [RFC4346]) TCP als Transportprotokoll verwendet werden muss, was für SIP zwar möglich, in vielen Fällen aber besonders wegen der im Vergleich zur kurzen Gesamtdauer der Kommunikation hohen Verzögerung durch den Aufbau der Verbindung nicht gewünscht ist. Auch werden die meisten Vorteile, die TCP gegenüber UDP bietet, im Falle von SIP nicht benötigt. Als Alternative existiert seit kurzem TLS über UDP nach [RFC4347], was aber Anwendungsentwicklern noch nicht in verbreiteten Bibliotheken zur Verfügung steht und bisher nur sehr selten unterstützt wird.

TLS-gesichert mit einem Endgerät kommunizierende SIP-Proxys sollen auch zur Kommunikation mit weiteren SIP-Servern einen verschlüsselten Transport verwenden.

Für H.323 existieren die Erweiterungen H.235.x [ITU-H235.0], früher H.235, maßgeblich vorangetrieben von Siemens, die sich mit der Verschlüsselung jeglicher Kommunikation der H.323-Familie beschäftigen.

Sprachdaten

Um per RTP übermittelte Daten verschlüsselt übertragen zu können, gibt es eine Erweiterung von RTP (und RTCP) namens *Secure Real-time Transport Protocol* (SRTP) [RFC3711], unterstützt von unter anderem Cisco. Das zur Initialisierung der Verschlüsselung notwendige, auf beiden Seiten gleiche Geheimnis ("shared key") wird zum Beispiel im Rahmen der SIP-Aushandlung übermittelt. Phil Zimmermann, Entwickler der Kryptographie-Software PGP, behauptet, die in seiner Software *Zfone* verwendete Lösung zur Verschlüsselung des Sprachdatenstroms sei derzeit „die einzige, bei der die Verschlüsselung durch den Sprachdatenstrom geleitet wird“, und noch dazu die einzige, die ein asymmetrisches Verschlüsselungsverfahren verwendet. [Zimmerm]

Authentifikation

Mit allen Methoden stellt sich die Frage der Realisierbarkeit einer Authentifikation des Gegenübers; der Aufbau und Einsatz einer Public-Key-Infrastruktur, die beispielsweise X.509-Zertifikate enthalten kann, die von SSL/TLS genutzt werden, scheint notwendig. Eine Kombination mit ENUM bietet sich an, ist aber bisher nicht in der Planung. Zu bedenken ist weiterhin, dass Verschlüsselung eine zusätzliche Belastung in Bezug auf Rechenleistung und Datenrate darstellt, was insbesondere bei mobilen Endgeräten unerwünscht sein könnte.

Sicherheit für VoIP im Mobilfunk

Im Mobilfunkbereich ist bei Nutzung von VoIP eine Vermittlung von Gesprächen über den Mobilfunknetzbetreiber selbst oder (zumindest theoretisch) über alternative Anbieter möglich. Für den Fall der Vermittlung durch den Netzbetreiber kann es keinen umfassenden Schutz geben, wenn der Betreiber nicht vertrauenswürdig ist oder zur Unterstützung eines Abhörwilligen gezwungen ist, was in immer mehr Ländern zur Pflicht wird.

Für Release 6 ist vorgesehen, dass die Kommunikation zwischen Endgerät (UE) und SIP-Proxy im IMS (P-CSCF) mittels IPsec ESP [RFC2406] in Bezug auf Vertraulichkeit und Integrität geschützt werden kann. Es ist Netzbetreibern jedoch freigestellt, zusätzlich oder ausschließlich TLS zu verwenden:

TLS is mandatorily supported by SIP proxies ..., and operators may use it to provide confidentiality and integrity inside their networks instead of or on top of IPsec ..., and TLS may also be used between IMS networks on top of IPsec. It should be pointed out, that the 3GPP specifications do not provide support for TLS certificate management ... [3GPP-33203, Version 6.9.0, Abschnitt 5]

Ursprünglich vorgesehen, wurde die Option der Herstellung von Vertraulichkeit mittels ESP für Release 5 wieder aus den Standards entfernt [3GPP-33203, Version 5.1.0/5.2.0, Abschnitt B.1]. Die Übertragung der Daten über das Mobilfunk-Zugangsnetz und zwischen den Komponenten des IMS erfolgt allerdings auch bei Release 5 üblicherweise verschlüsselt. [3GPP-33102, Abschnitt 6.3.1][3GPP-33210, Annex C]

2.4 QoS-Klassen/Priorisierung

Mit *Quality of Service* (QoS), deutsch *Dienstgüte*, wird im Bereich von Datennetzwerken, insbesondere bei der Paketdatenübertragung, das Vorhandensein einer Möglichkeit der Einflussnahme auf Eigenschaften einer Übertragungsstrecke bezeichnet. Gelegentlich wird die Dienstgüte auch aufgefasst als Wahrscheinlichkeit, mit der eine Übertragungsstrecke die vereinbarte Leistung (in Bezug auf Eigenschaften wie zum Beispiel Verlustrate und Verzögerung) erfüllt.

Allgemein bezieht sich der Begriff der Dienstgüte auf die Zufriedenheit des Benutzers, er beschreibt „die vollständige Wirkung der Leistungsfähigkeit eines Dienstes, die den Grad der Zufriedenstellung eines Benutzers desselben Dienstes bestimmt“. [Schiller03, S. 534]

2.4.1 QoS für IP

Der Wunsch nach einer Möglichkeit der Klassifizierung und darauf aufsetzender Priorisierung bei der Weiterleitung von Paketdaten dürfte so alt sein wie die Idee der Paketdatenübertragung selbst. Es gibt zwei übliche Herangehensweisen für solche Verfahren: einmal das Auszeichnen von Daten mit einer Markierung, die entweder eine Wichtigkeit, eine erwünschte Eigenschaft der Übertragung oder die Art des transportierten Datenstroms angibt; sowie das Reservieren von Ressourcen entlang der Transportstrecke.

Für das heute weit verbreitete Internet Protocol in der Version 4 und der bisher nur deutlich seltener eingesetzten Version 6 existieren sowohl ein Mechanismus, der die Pakete auszeichnet, als auch ein Mechanismus zur Reservierung von Ressourcen. Die Auszeichnung der Pakete war von Anfang an im Standard ([RFC791, S. 12]) vorgesehen; das Feld trägt dort den Namen *Type of service* (TOS) und erlaubt die Angabe einer Wichtigkeit (in acht Stufen) und des Wunsches nach geringer Verzögerung, hoher Datenrate und hoher Zuverlässigkeit. Es wird in Worten zusammengefasst, "The major choice is a three way tradeoff between low-delay, high-reliability, and high-throughput." [dto.]

Die Bedeutung des TOS-Feldes hat sich inzwischen jedoch geändert, das TOS-Prinzip wurde ersetzt durch ein ähnliches Verfahren namens *Differentiated Services* (DiffServ) [RFC2474]. Das TOS-Feld wird nun als *Differentiated Services Field* (DS Field) verwendet, der dort eingetragene Wert heißt *Differentiated Services Code Point* (DSCP). Bei IPv6 wird das *Traffic Class*-Feld zur Angabe des DSCP verwendet. IPv6 sieht außerdem ein Feld im Paketheader vor, das ein *Flow Label* aufnehmen kann. Der dort gesetzte Wert wird vom Absender gewählt, darf bis zum Ziel nicht verändert werden und wird bei allen zum selben Datenstrom gehörenden Paketen eingetragen [RFC3697]. Ein Flow Label trägt keine weitere Information, es kann also im Rahmen einer QoS-Architektur nur dazu dienen, die zum selben Datenstrom gehörenden Pakete schnell und effizient zu identifizieren.

Unverändert geblieben ist das Problem, dass den Angaben zur Wichtigkeit oder Art des Inhalts nur dann getraut werden kann, wenn sichergestellt ist, dass sie von einer vertrauenswürdigen Instanz auf dem bisherigen Versandweg eingetragen wurden. Üblich ist daher die Nichtbeachtung der Angaben, falls ein Paket nicht aus dem eigenen Netz stammt – oder bei allen Paketen. Das Erreichen einer spezifischen Dienstgüte über die gesamte Strecke kann also nicht garantiert werden. Eine andere oft gehörte Argumentation gegen DiffServ lautet wie folgt: DiffServ kann nur helfen, zu entscheiden, *welche* Pakete verworfen werden; das aber heißt, dass die Leitung ohnehin eine zu geringe Kapazität hat; also lösen wir das Problem lieber gleich mit einer dickeren Leitung. Insbesondere im Hinblick auf VoIP hinkt diese Argumentation, da dabei gar

nicht große Datenmengen pro Zeit, sondern Zuverlässigkeit und zügige Weiterleitung im Vordergrund stehen (siehe Kapitel 5).

Älter als DiffServ ist die Idee der *Integrated Services* (IntServ), bei denen das Netz die Funktion der Ressourcenreservierung zur Verfügung stellt („integriert“ hat), auf deren Namen auch das jüngere “differentiated” Bezug nimmt. Die grundsätzliche Idee von IntServ ist die Anmeldung und Reservierung benötigter Ressourcen vor und während der Nutzung und wird beschrieben in [RFC1633].³ Das mit IntServ zur Reservierung verwendete *Resource Reservation Protocol* (RSVP) arbeitet so, dass es in regelmäßigen zeitlichen Abständen eine Reservierungsanfrage in Richtung des Ziels schickt, die eine Beschreibung der benötigten Ressourcen enthält. Jeder Router auf dem Weg kann der Anfrage zustimmen, sie ablehnen oder sie ignorieren. Auf Wunsch kann eine Bestätigung der Reservierung auf demselben Weg zurückgeschickt werden. War das Ziel nicht ein einzelner Host, sondern beispielsweise eine Multicast-Adresse, werden Reservierungsbestätigungen auf dem Rückweg miteinander verschmolzen. [RFC2205]

Ein nicht unbeträchtliches Problem bei der Nutzung von IntServ ist die Tatsache, dass jeder beteiligte Router pro Datenstrom ein Stück Information speichern muss. Es gibt Ansätze wie die in [RFC3175] beschriebene Zusammenfassung von Reservierungen, die Router im Inneren eines Netzes entlasten – allerdings ist der Einsatz von IntServ, wie auch der von DiffServ, derzeit nicht weit verbreitet und scheint nicht intensiv gefordert zu werden.

2.4.2 QoS von Daten im Mobilfunk

Folgende Schritte könnten von einem mobilen Endgerät durchgeführt werden, um ein Telefongespräch gemäß Release 5 vom Endgerät aus aufzubauen (in Klammern die AT-Befehle nach [3GPP-27007]):

1. Define PDP Context (+CGDCONT)
(alternativ: Define Secondary PDP Context (+CGDSCONT))
2. (optional) 3G Quality of Service Profile (Requested) (+CGEQREQ)
3. (optional) 3G Quality of Service Profile (Minimum acceptable) (+CGEQMIN)
4. Traffic Flow Template (+CGTFT)
5. PS attach (+CGATT)

³ Es sei angemerkt, dass sich eine nicht uninteressante Situation ergibt, wenn IP-Pakete über eine QoS umfassend unterstützende Architektur wie ATM übermittelt werden und inner- bzw. oberhalb IP erneut eine der Leitungsvermittlung ähnliche Reservierung stattfindet.

6. PDP context activate (+CGACT)

7. SIP

Alternativ zum Aufbau eines neuen (primären oder sekundären) PDP Context mit dem gewünschten QoS-Profil und/oder Traffic Flow Template kann ein bereits definierter Context mittels eines PDP Context Modify (+CGCMOD) angepasst werden.

Einstellbare QoS-Werte für einen 3G PDP Context sind unter anderem ([3GPP-23107, 6.4] [3GPP-27007, 10.1.6]):

- Art der Kommunikation: *traffic class* ("conversational", "streaming", "interactive", "background")
- von der Anwendung unterstützte oder dem Nutzer gewünschte maximale Datenrate (getrennt für Up- und Downlink): *maximum bitrate*
- zugesicherte Datenrate (getrennt für Up- und Downlink): *guaranteed bitrate*
- reihenfolgetreue Auslieferung der SDUs: *delivery order*
- Anteil verlorener oder als fehlerhaft verworfener SDUs: *SDU error ratio*
- Bitfehlerrate nach Fehlererkennung: *residual bit error ratio*
- Auslieferung defekter SDUs gewünscht: *delivery of erroneous SDUs*
- maximal erlaubte Verzögerung (für 95 % aller SDUs über den gesamten Zeitraum): *transfer delay*
- relative Wichtigkeit der Kommunikation, als Alternative zu absoluten Angaben: *traffic handling priority*

Bei der Übertragung der Sprachdaten ist die Luftschnittstelle zwischen Endgerät und Basisstation aus zwei Gründen ein Nadelöhr: Die dort zur Verfügung stehende Datenrate ist im Vergleich zu anderen Teilen der Übertragungsstrecke sehr gering; und die Signale sind externen Störeinflüssen stark ausgesetzt, was eine hohe Fehlerrate zur Folge hat. An beiden Enden dieser Strecke muss daher die Behandlung der zu übertragenden Pakete bis in tiefe Schichten beeinflussbar sein. Ein Endgerät hat die Möglichkeit, anhand der verwendeten Applikation oder mittels Nutzerinteraktion die für eine Wichtung benötigten Informationen zu erlangen. Dem Mobilfunknetz (konkret dem *Gateway GPRS Support Node (GGSN)*) stehen diese Möglichkeiten nicht zur Verfügung; es kann jedoch die zum Endgerät zu sendenden Daten auf bestimmte Merkmale untersuchen (siehe [3GPP-23060, 15.3.2]):

- Absenderadresse/-netz

- Transportprotokoll (IPv4: protocol number; IPv6: next header)
- Zielportnummer (Bereichsangabe)
- Quellportnummer (Bereichsangabe)
- IPsec Security Parameter Index
- IPv4: type of service; IPv6: traffic class
- IPv6 flow label

Kombinationen dieser Merkmale mit Angabe der zulässigen Werte werden als "filter" bezeichnet. Bis zu acht solcher Filter können in einem *Traffic Flow Template* (TFT) zusammengefasst werden. Jedem PDP Context ist maximal ein TFT zugeordnet. Das Endgerät erstellt die Filter, fasst sie in TFTs zusammen und übermittelt sie dem GGSN.

Alle Filter der TFTs von Contexten, die dieselbe *PDP Address* (in den meisten Fällen also eine IP-Adresse) verwenden, sind eindeutig nummeriert und werden vom GGSN in der Reihenfolge ihrer Nummerierung daraufhin untersucht, ob sie die zum Endgerät zu sendenden Daten beschreiben. Falls ja, werden diese Daten über den Context, auf den sich der zutreffende Filter bezieht, übermittelt. [3GPP-23060, 15.3]

Es kann also Einfluss auf die Qualität der Paketweiterleitung genommen werden, indem mindestens ein PDP Context mit ausreichend hoher Qualität aufgebaut wird und dem GGSN mitgeteilt wird, welche Daten über jenen Context zu übertragen sind, falls die Zuordnung nicht eindeutig ist.

QoS bei VoIP im Mobilfunk

Der Aufbau eines Telefongesprächs in einem Mobilfunknetz entsprechend Release 5 geht nach [Räisänen03, S. 12] wie folgt vonstatten:

1. Terminal contacts P-CSCF with the SIP identifier of the remote end (B subscriber).
2. Terminals and SIP proxies negotiate codec parameters (SDP).
3. P-CSCF sends SDP information to PCF and gets back authorization token.
4. P-CSCF sends authorization token to UE.
5. UE sends authorization token to GGSN when activating PDP context.
6. GGSN checks PDP contexts from PCF using authorization token.
7. PCF authorizes QoS parameters.

(P-CSCF: Proxy Call Session Control Function, Ansprechpartner für das UE im IMS beim Aufbau von Sprachverbindungen. PCF (in diesem Zusammenhang): Policy Control Function, in Release 5 noch Teil des P-CSCF.)

Bemerkenswert ist, dass zwar formuliert wird "PCF authorizes QoS parameters", aber wohl davon auszugehen ist, dass die vom Endgerät übermittelten QoS-Parameter vollständig durch vom Netz vorgegebene Einstellungen überschrieben werden. Die Vorgehensweise in Bezug auf TFTs ist wie folgt beschrieben:

When binding information is received, the GGSN shall ignore any UE supplied TFT, and the filters in that TFT shall not be installed in the packet processing table. When sending the binding information to the network, the Ue shall populate the TFT filters with wildcard values. [3GPP-23207, 5.2.1]

2.5 Skype

Seit Herbst 2003 existieren unter dem Namen *Skype* Software-Produkte und Dienstleistungen einer Gruppe von Firmen, die anfangs ausschließlich VoIP, später auch Instant Messaging und Dateiübertragung ermöglichten. Erfinder und die Nutzung der Marke kontrollierende Eigentümer waren die beiden Begründer der Tauschbörse KaZaA, Niklas Zennström und Janus Friis. Im September 2005 kaufte eBay Inc. das Unternehmen für 2,1 Milliarden Euro und die Verpflichtung zur Zahlung von Erfolgsprämien [eBaySkype]. Seit September 2005 kooperiert auch der Mobilfunkanbieter E-Plus Service mit Skype und lässt Skype als einzige VoIP-Technologie zur Nutzung über seine UMTS/GPRS-Flatrate zu (siehe auch Abschnitt 1.2.1).

Die bei Skype zum Einsatz kommenden Programme sind Closed-Source-Software, so dass Aussagen zu technischen Details nur vom Anbieter selbst gemacht werden können oder aufwendig mittels Reverse Engineering in Erfahrung gebracht werden müssen. Eine frühe Beschreibung netzwerktechnischer Eigenschaften der verwendeten Protokolle findet sich in [BasetSchu04]. Durch sehr aufwändiges Reverse Engineering in Erfahrung gebrachte Eigenschaften der Software, mit besonderem Blick auf Aspekte der Sicherheit, sind in [BiondiDescl06] beschrieben.

Skype legte von Anfang an Wert auf eine hohe Sprachqualität und unkomplizierte Bedienbarkeit auch für unerfahrene Anwender. Die zur Verwendung kommende VoIP-Technologie zeichnet sich durch einige besondere Merkmale aus:

- Die Art der Vermittlung scheint keinem bekannten Standard zu entsprechen.

- Die Netzwerkkommunikation wurde so ausgelegt, dass auch bei beiderseitigem Einsatz von Firewalls und Proxys ein Gespräch geführt werden kann.
- Bereits bei mittels Analogmodem erreichbaren Datenraten von bis zu 33,6 kBit/s erreichte Skype von Beginn an eine sehr hohe Sprachqualität. Skype gibt einen Bedarf von 3 bis 16 Kilobyte/Sekunde an. [SkypeFAQ]

Der zum Einsatz kommende Codec kann nicht vom Anwender gewählt werden und ist nicht mit Sicherheit identifiziert. Baset und Schulzrinne vermuten, dass als Codecs iLBC und iSAC zum Einsatz kommen.[BasetSchu04, Abschnitt 2.3]

Das Interesse der Mobilfunknetzbetreiber an einer Nutzbarkeit ihres jeweiligen Netzes für Skype scheint – nicht überraschend – sehr gering zu sein. Da eine diesbezügliche Erweiterung des LTS derzeit nicht erforderlich ist, werden wir auf technische Details nicht weiter eingehen. Skype sollte aber schon wegen seiner großen Verbreitung hier nicht unerwähnt bleiben.

Kapitel 3

Zwischenschritt: Eigenschaften der Übertragungsstrecke

Bereits zu Beginn der Untersuchungen stellte sich heraus, dass eine in das LTS von Qosmotec eingebettete Untersuchung der Eigenschaften einer Übertragungsstrecke benötigt werden würde. Kunden, die Netzwerkkomponenten auf die Nutzbarkeit für VoIP getestet haben wollten, machten deutlich, dass sie einer Aussage nur trauen würden, wenn die vom Testsystem gelieferten Ergebnisse anhand technischer, idealerweise messbarer Parameter nachvollziehbar wären. Auch haben schon erste Recherchen zum Thema der Beurteilung der Einsetzbarkeit von Codecs (siehe Abschnitt 2.2.2) gezeigt, dass eine Überprüfung veröffentlichter Angaben, gegebenenfalls auch eine zumindest rudimentäre eigenständige Untersuchung stattfinden muss.

Da das LTS auf den Test von Ende-zu-Ende-Übertragungen unter Nutzung aller Schichten unterhalb einer Anwendung auf beiden Seiten einer Kommunikationsstrecke ausgerichtet ist, existierten bisher kaum Tests, die sich mit den Eigenschaften tieferer Schichten befassen. Wünschenswert für die Integration in Qosmotecs LTS war eine Lösung, die ohne Beeinflussung der Teststrecke arbeiten kann, insbesondere also keinen zusätzlichen Datenverkehr auf der zu testenden Übertragungsstrecke verursacht, sofern dies nicht explizit gewünscht ist.

3.1 Messbare Eigenschaften

Aussagen zur Qualität einer Paketdatenübertragungsstrecke beziehen sich notwendigerweise auf einen konkreten Einsatzzweck. Unabhängig von diesem lassen sich jedoch

messbare Eigenschaften erfassen, die in vielen Situationen aussagekräftig sind. Solche offensichtlichen Eigenschaften einer Übertragungsstrecke sind:

- Datenrate (data rate) ¹
- Verzögerung/Laufzeit (delay/latency)
- Verlustrate (loss rate)

Diese Eigenschaften sind jedoch von einem Anbieter nicht fest einstellbar, sondern unterliegen immer einer gewissen Schwankung. Eine maximale Datenrate wird jedoch fast immer einstellbar oder durch physikalische Umstände gegeben sein, eine minimale Verzögerung ebenso. (Diese Aussagen gelten fast immer auch für leitungsvermittelte Datenübertragung.)

Eine wichtige, wenngleich lästige Eigenschaft der Paketdatenübertragung ist die Gefahr des Verlusts von Datenpaketen. Zumindest in der Theorie wird ein solcher Verlust bei digitaler leitungsvermittelter Übertragung ausgeschlossen, was aber nur dadurch erreicht werden kann, dass eine erneute Übertragung der verloren gegangenen Daten stattfindet, was die Auslieferung beim Empfänger verzögert und sowohl beim Sender als auch beim Empfänger einen Zwischenspeicher notwendig macht. Ein Paketverlust hat nicht immer offensichtliche, vermeidbare Ursachen, so dass eine Schwankung auch in größerem Rahmen oft unvermeidbar ist. Als Beispiel der konkrete Fall der Mobilfunkstrecke: Der Netzbetreiber kann sich Mühe geben, alle Streckenabschnitte nicht zu überlasten, er kann aber die Qualität einer gegebenen Funkstrecke zwischen mobilem Gerät und Basisstation nicht beeinflussen.

Immer dann, wenn übertragene Inhalte einen temporalen Bezug haben – als Beispiele seien Protokolle zur Zeitsynchronisation und die Echtzeitwiedergabe von Ton oder Bewegtbild genannt –, ist die *Schwankung* der Laufzeit (latency jitter) besonders interessant. Voraussetzung ist dafür nicht, dass Daten mit unveränderter Menge pro Zeit oder in Stücken mit gleichbleibendem Abstand (isochron) übertragen werden, sondern lediglich, dass Informationen beim Empfänger in Bezug zur Echtzeit gesetzt werden können müssen. Verlässt sich eine Anwendung zu sehr auf eine gleichbleibende Verzögerung auf der Übertragungsstrecke, so kann sowohl der Fall eintreten, dass benötigte Daten nicht rechtzeitig zur Verfügung stehen, als auch der, dass ungewöhnlich früh empfangene Daten verworfen werden, weil die Applikation sie nicht rechtzeitig abgenommen hat.

¹ Und seit mich Prof. Reimers auf der IBC 2002 ganz doll geschimpft hat, weil ich von *Bandbreite* statt *Datenrate* sprach, sage ich nur noch „Bandbreite“, wenn es auch um welche geht...

Zu beachten ist auch, dass Schwankungen in der Laufzeit eine Schwankung der Datenrate zur Folge haben: Während einer Erhöhung der Laufzeit kommen beim Empfänger weniger Daten pro Zeit an als vorher (weil mehr Daten „unterwegs sind“ als vorher); während einer Verringerung der Laufzeit kommen mehr Daten pro Zeit an als vorher.

Ebenfalls zu beachten ist, dass alle genannten und zu erfassenden Eigenschaften bei bidirektional nutzbaren Übertragungsstrecken für beide Richtungen unterschiedlich sein können und im Mobilfunk auch sind. Ein besonderer Fall sind dabei Strecken, die im Halbduplex-Verfahren genutzt werden, ohne dass eine maximale Wartezeit garantiert wird oder bei denen die Wartezeit weit höher liegen kann als die übliche Verzögerung. In einem solchen Fall müssten besondere Vorkehrungen zur Beachtung der Halbduplex-Eigenschaft und der daraus resultierenden Wartezeiten getroffen werden.

3.1.1 Datenrate

Eine objektive Beurteilung der effektiv verfügbaren Datenrate ist nur durch den Versuch der Auslastung der Übertragungsstrecke möglich. Das LTS bietet bereits solche Tests, basierend auf der Aussendung von ICMP- oder UDP-Paketen. Praktische Bedeutung haben jedoch eher das Nutzerverhalten simulierende Ende-zu-Ende-Tests unter Verwendung verbreiteter Server- und Client-Software und üblicher transportsichernder Protokolle wie zum Beispiel TCP, da bei erfolgreichem Testverlauf diverse Eigenschaften der getesteten Strecke als ausreichend gut gelten können, also neben der maximal möglichen Datenrate beispielsweise auch die Verlustrate. Wäre das getestete System in Hinblick auf eine der Eigenschaften fehlerhaft oder nicht optimal konfiguriert, so wäre insgesamt keine ausreichende Leistung zu erwarten.

Für das Ziel der Beurteilung der Einsetzbarkeit einer Übertragungsstrecke für VoIP war davon auszugehen, dass die Datenrate von untergeordneter Bedeutung ist, sofern sie nicht unter ein vom eingesetzten Codec abhängiges Minimum fällt, was aber im Falle von UMTS nach erfolgreicher Aushandlung zwischen Netz und Endgerät nicht der Fall sein sollte (siehe Abschnitt 2.4.2). Falls die einem Anwender zur Verfügung gestellte Datenrate unter jenes Minimum fallen sollte, kann eine ausreichende Qualität der Sprachdatenübertragung nicht mehr gewährleistet werden. Ein temporärer, nicht steuerbarer Abfall der Datenrate (beispielsweise aufgrund äußerer Störeinflüsse) unter das vom Codec abhängige Minimum wird sich in Paketverlusten äußern, die wiederum erfasst werden können.

3.1.2 Laufzeit, Laufzeitschwankungen, Verlustrate

Die Erfassung der Paketlaufzeit für lediglich eine Übertragungsrichtung setzt voraus, dass von einem Paket der Sende- und der Empfangszeitpunkt bekannt sind. Die Bildung einer Differenz der Zeitpunkte ist trivial; auch die Verarbeitung dieser Differenzwerte zwecks Ermittlung eines einzelnen Wertes als Maß für Laufzeitschwankungen schien einfach zu realisieren.

Die Ermittlung einer Verlustrate setzt lediglich voraus, dass erkannt wird, ob ein verschicktes Paket am Ziel angekommen ist.

3.2 Zusammenspiel mit LTS

Es durfte davon ausgegangen werden, dass folgende Bedingungen vorliegen:

1. Bei den Testdaten handelt es sich ausschließlich um Daten im Format des Internet Protocol Version 4.
2. Die Uhren des Sender- und Empfängersystems laufen gleich schnell.
3. Die Uhrzeit bei Sender und Empfänger hat eine bekannt geringe Differenz.

Die Aussagen zu den Eigenschaften der Systemuhren auf Sender- und Empfängerseite konnten getroffen werden, da das LTS eine Synchronisation im Rahmen der Genauigkeit von NTP [RFC1305] sicherstellt. Aus langjähriger Erfahrung ist bekannt, dass mittels NTP im Laborumfeld dauerhaft eine maximale Abweichung der Systemuhr von einer Referenzzeitquelle von unter einer Millisekunde erreicht werden kann.

Die erste dieser Gegebenheiten ermöglichte es, Datenpakete eindeutig zu identifizieren, wenn sie beim Sender losgeschickt werden oder beim Empfänger ankommen: Der Kopf von IPv4-Paketen enthält in einem Feld eine 16 Bit lange Identifikationsnummer, deren Sinn es ist, einem Host aufzuzeigen, welche Paket-Fragmente zum selben ursprünglichen Paket gehören (siehe Abbildung 2.3 auf Seite 27 und [RFC791, Abschnitt 3.1]). Es sei angemerkt, dass Version 6 des Internet Protocol diese Identifikationsnummer nicht mehr für jedes Paket vorsieht, sondern sie nur noch dann anführt, wenn Pakete tatsächlich in Fragmenten verschickt werden, also ein *Fragment Header* eingefügt wird.²

² Es gibt noch einen weiteren Fall, in dem ein IPv6 Fragment Header eingefügt wird, außer jenem, in dem ein Paket ein Fragment darstellt: Wenn ein IPv6-Paket an einen IPv4-Host geschickt wird und die MTU auf einem Hop nicht ausreichend groß ist, soll dem von IPv6 nach IPv4 übersetzenden Router mithilfe des Fragment Header eine Identifikationsnummer mitgeteilt werden. [RFC2460, Abschnitt 5]

Die zweite Annahme ermöglicht es, Laufzeitschwankungen zu ermitteln, ohne die Laufzeit zu kennen. Sie erlaubt es auch, vor Beginn oder nach Ende einer Messung bzw. Beobachtung einmalig die Differenz der Uhren zu bestimmen und errechnete Werte um diese Differenz zu korrigieren, sofern eine zuverlässige Übertragungsstrecke für diesen Zweck zur Verfügung steht.

Die dritte Annahme erlaubt einen recht sorglosen Umgang mit Zeitstempeln, solange bedacht wird und dem Anwender bewusst ist, dass eine Differenz zwischen den Uhrzeiten bei Sender und Empfänger vorliegt. Es darf davon ausgegangen werden, dass diese Differenz in Laborumgebungen im Bereich unter einer Millisekunde und im Feld bei wenigen Millisekunden liegt. Da bei der mobilen Paketdatenübertragung mit heutigen Standards Laufzeiten von nicht unter 50 ms erwartet wurden, waren zumindest extrem starke Verfälschungen der Messergebnisse ausgeschlossen.

3.3 Praktische Umsetzung

3.3.1 Erfassung der Paketinformationen

Die Realisierung eines Mechanismus zur Ermittlung der Eigenschaften einer Übertragungsstrecke durch Beobachtung des IPv4-Traffics ließ sich schnell bewerkstelligen: Das bekannte Tool *tcpdump* [tcpdump] beobachtet den vom LTS verschickten Datenverkehr und gibt zu jedem IP-Paket unter anderem die Identifikationsnummer und den Zeitpunkt des Verschickens (Senderseite) bzw. Empfangens (Empfängerseite) aus.

Pro IP-Paket fallen zwei Byte für die Identifikationsnummer und drei Byte für den Zeitstempel an. Letzterer wird standardmäßig auf Mikrosekunden genau ausgegeben und sollte als Vielfaches von 8 Bit gespeichert werden, weshalb die Wahl auf 24 Bit fiel, so dass sich 2^{24} Mikrosekunden, also etwa 16,8 Sekunden erfassen lassen. Bei Verwendung eines Zeitstempels mit 16 Bit Länge hätte die erfassbare Zeitspanne bei 65,5 Millisekunden gelegen, was uns etwas knapp vorkam, um für sehr ungewöhnliche Messergebnisse eine Fehlfunktion des Zeitsynchronisationsmechanismus ausschließen zu können.

In dem im Rahmen dieser Arbeit zu untersuchenden Fall der Übertragung von Sprachdaten über IP liegen besonders kleine Pakete vor, die aber in Abständen von jeweils einer Framelänge gesendet werden. Gehen wir von einer Framelänge von mindestens 5 ms aus (üblich sind 10 bis 20 ms, siehe Abschnitt 2.2.2), so werden pro Sekunde höchstens

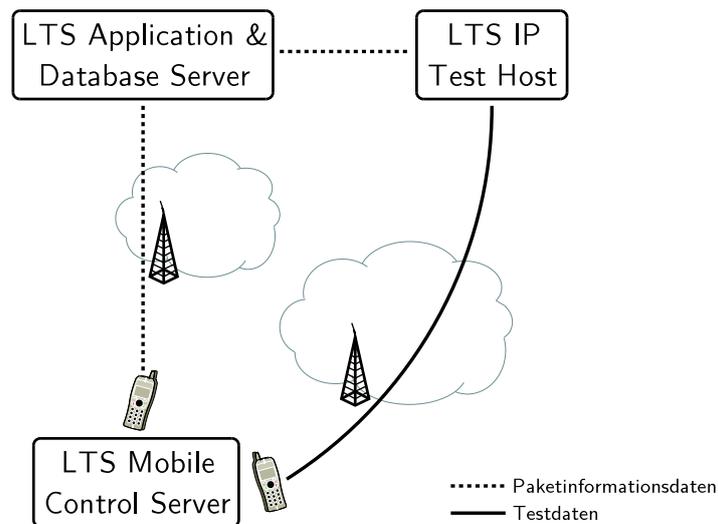


Abbildung 3.1: Feldtest-Setup mit ortsunabhängigem Mobile Control Server

200 Pakete verschickt.³ Für jedes Paket müssen fünf Byte an Informationen transportiert werden, also bis zu 1.000 Byte pro Sekunde. Werden diese Informationen per TCP übermittelt, fallen pro etwa 1.400 Byte weitere 40 Byte für den IP- und den TCP-Header an. Selbst wenn diese Header alle 1.000 Byte anfielen, wäre die Datenmenge von dann 1.040 Byte pro Sekunde, also 8.320 Bit pro Sekunde, noch über eine separate, leitungsvermittelte GSM-Datenverbindung (mit einer Datenrate von meist 9,6 kBit/s) übertragbar. Dieses Prinzip könnte also auch mit bereits vorhandener Ausrüstung bei einem Feldtest (siehe Abbildung 3.1) eingesetzt werden und lässt noch etwas Spielraum bei der Übertragungskapazität für kurzzeitige Ausfälle und Übertragungswiederholungen.

Ausgehend davon, dass Informationen über 200 beobachtete Pakete pro Sekunde übertragen werden können, ist offensichtlich, dass auch eine Datenübertragung über einen ausgelasteten HSDPA-Downlink mit 1,8 MBit/s, wie er derzeit in Deutschland betrieben wird, beobachtet werden kann, sofern die Pakete eine Größe von

$$\frac{1.800 \text{ kBit/s}}{200 \text{ Pakete/s}} = 9 \text{ kBit/Paket} = 1.125 \text{ Byte/Paket}$$

nicht unterschreiten. Wären die Pakete kleiner, so könnten mehr Pakete pro Zeit verschickt werden, was zur Folge hätte, dass mehr Information über die Pakete von den beobachtenden Stellen zur auswertenden Stelle transportiert werden müsste.

³ Wir erlauben uns hierbei die Annahme, dass ein Frame nicht auf mehrere Pakete aufgeteilt wird.

Sollte die Notwendigkeit entstehen, die Menge der zu übertragenden Paketinformationen zu reduzieren, so existiert die relativ einfach umsetzbare Möglichkeit der Reduzierung der Genauigkeit des erfassten Zeitstempels. Eine Reduzierung um 8 Bit am niederwertigen Ende, also Rundung auf vernachlässigbare 2^8 Mikrosekunden = 0,256 Millisekunden, brächte eine Reduzierung der Größe des Zeitstempels von 3 auf 2 Byte, also eine Reduzierung der Messdaten von 5 auf 4 Byte.

3.3.2 Auswertung der Paketinformationen

Eine Auswertung der gespeicherten Daten kann in Echtzeit oder nachträglich erfolgen; im Laborumfeld würden die Daten noch während des Tests über ein von der zu testenden Übertragungstrecke unabhängiges Kommunikationsnetz an eine zentrale Stelle übermittelt werden. Liegen die Informationen von Sender- und Empfängerseite an einer Stelle vor, kann für jedes verschickte Paket beurteilt werden, ob es angekommen ist und wie lange es unterwegs war.

Der tatsächlich zur Auswertung eingesetzte Algorithmus ermittelt für jedes *empfangene* Paket, wie lange es unterwegs war. Informiert die Empfängerseite die zentrale Auswertestelle über den Zeitpunkt des Eintreffens eines IP-Pakets, so wurde die Auswertestelle entweder bereits über den Zeitpunkt des Absendens jenes Pakets informiert oder nicht. Ist der Sendezeitpunkt bereits bekannt, so ist die Berechnung der Laufzeit trivial und das nächste Paket, über dessen Empfangszeitpunkt die zentrale Stelle informiert wird, kann betrachtet werden. Ist der Sendezeitpunkt noch nicht bekannt, wartet die zentrale Stelle auf von der Senderseite zu übermittelnde Informationen über den Sendezeitpunkt.

Informationen über Sendezeitpunkte von Paketen treffen (bei Verwendung von TCP zur Sicherung der Übertragung) in der Reihenfolge ein, in der die Pakete gesendet wurden.⁴ Werden der zentralen Stelle beim Warten auf Informationen über den Sendezeitpunkt des aktuell betrachteten Pakets zunächst Informationen zu anderen Paketen übermittelt, so sind jene anderen Pakete vor dem aktuell betrachteten verschickt worden, also entweder überholt worden oder verloren gegangen. Bei Echtzeitanzeige der ermittelten Werte während eines laufenden Tests können solche Pakete also zunächst weder zur Laufzeitanalyse beitragen noch als verloren gegangen gewertet werden.

Alle verschickten, aber nach einer gewissen Wartezeit nicht empfangenen Pakete gelten vorerst als verloren. Die Wartezeit soll sich vom Anwender durch Vorgabe von Minimum

⁴ Falls eine laufzeitbeschränkte, aber nicht unbedingt reihenfolgetreue Art der Übermittlung verwendet wird, können die Informationen auch anhand der Zeitstempel in die korrekte Reihenfolge gebracht werden.

und Maximum beeinflussen lassen und sich basierend auf der beobachteten Laufzeit zwischen diesen beiden Werten bewegen.

Nach Beendigung des Tests kann eine Korrektur in Bezug auf die Status „verloren“ bzw. „verspätet“ vorgenommen werden, wobei zumindest im Laborumfeld tatsächlich sichergestellt werden kann, dass keine Pakete mehr unterwegs sind.

Werden Pakete empfangen, die scheinbar gar nicht verschickt worden sind, ist das ein erwünschter Hinweis auf eine fehlerhafte Konfiguration oder einen Defekt des Pakets. Auch die mehrfache Zustellung eines Pakets, die meist auf Probleme mit der Übertragung auf Schicht 2 hindeutet, kann so recht einfach erfasst werden.

Es dürfte davon ausgegangen werden, dass defekte IP-Pakete verworfen werden, üblicherweise aufgrund eines Kontrollmechanismus unterliegender Schichten. Sollte ein defektes IP-Paket den Zielrechner erreichen, wird die Statistik um ein empfangenes, aber eigentlich unbrauchbares oder ein empfangenes, aber scheinbar nicht verschicktes Paket verfälscht, je nachdem, ob die Identifikationsnummer vom Defekt betroffen ist.

Die Ermittlung einer Zahl als Angabe des Ausmaßes der Schwankung der Laufzeit fiel insofern komplizierter aus als erwartet, als dass offensichtlich keine einheitliche Meinung darüber existiert, auf welchem Weg ein solcher Wert zu ermitteln wäre. Das beliebte Tool `ping` zur Messung der Round-trip Time mittels ICMP Echo Requests gibt die mittlere Abweichung aus. In [RFC2212] wird erklärt, Jitter sei “the difference between the minimal and maximal datagram delays”; schon früher wurde definiert:

The interarrival jitter ... is defined to be the mean deviation (smoothed absolute value) of the difference ... in packet spacing at the receiver compared to the sender for a pair of packets. ... [T]his is equivalent to the difference in the “relative transit time” for the two packets; the relative transit time is the difference between a packet’s RTP timestamp and the receiver’s clock at the time of arrival, measured in the same units. [RFC1889, Abschnitt 6.3.1]

Wir haben uns dazu entschlossen, dem Kunden die Wahl der Art der Berechnung passend zu seinen bereits eingesetzten Methoden zu überlassen.

Kapitel 4

Ermittlung messbarer Kenngrößen

Um messen zu können, wie gut sich Komponenten eines Mobilfunknetzes in gegebener Konfiguration eignen, um Voice over IP darüber zu nutzen, wollten wir zunächst ermitteln, welche messbaren Größen (insbesondere in einem Mobilfunknetz) Einfluss auf die Qualität einer Sprachübertragung mittels Voice over IP haben.

4.1 Gesprächsaufbau

Zu Beginn eines Telefongesprächs erfolgt der Gesprächsaufbau, siehe auch Kapitel 2. Der Gesprächsaufbau kann zur Zufriedenheit des Nutzers erfolgen oder in den Augen des Nutzers Mängel aufweisen. Mögliche Mängel sind beispielsweise eine zu große Dauer bis zur erfolgreichen Vermittlung, eine Ablehnung angeforderter QoS-Eigenschaften der Verbindung oder ein Nichtzustandekommen der Verbindung zum gewünschten Gesprächspartner, obwohl jener erreichbar gewesen wäre.

Basierend auf den Vorgaben aus Abschnitt 1.3.3 soll eine Untersuchung der Qualität des Gesprächsaufbaus derzeit nicht vorgenommen werden. Unter der Annahme, dass SIP zum Einsatz kommt, kann auch darauf verwiesen werden, dass es bereits viele Werkzeuge gibt, die Standardkonformität und Performanz von SIP-Proxys testen können. Die bekanntesten dürften *sipsak* [sipsak] von Nils Ohlmeier und *SIPp* [SIPp] von Richard Gayraud, Olivier Jacques und anderen sein, die beide unter der GNU GPL lizenziert werden.

4.2 Sprachdaten

4.2.1 Sprachdatenübertragung

Wie bereits zu Beginn von Kapitel 3 erwähnt, lassen sich Eigenschaften der Paketdatenübertragungstrecke erfassen und berechnen: Datenrate, Verzögerung, Verlustrate, Schwankung der Verzögerung.

Datenrate

In Bezug auf die Datenrate gehen wir – wie schon in Abschnitt 3.1.1 beschrieben – davon aus, dass dem Netzbetreiber eine entsprechende Anforderung übermittelt wurde und Folgen der Nichterfüllung dieser Anforderungen sich in Form einer höheren Laufzeit und/oder einer höheren Verlustrate bemerkbar machen.

Verzögerung

Die Verzögerung zwischen Spracheingabe (über ein Mikrofon) und Sprachwiedergabe (über einen Lautsprecher) bei einem VoIP-Gespräch setzt sich aus mehr Komponenten zusammen als nur der Laufzeit auf der Datenübertragungstrecke. Die Bestandteile sind:

1. Warten des Coders auf ausreichend große Eingabemenge: üblicherweise Dauer eines Frames
2. Dauer des Codierens: abhängig von Komplexität des Codecs und Leistung der Hardware
3. Wartezeit vor Übertragung des IP-Pakets: vom versendenden Gerät beeinflussbar; im Idealfall nur so lange, bis das aktuell im Versandvorgang befindliche Paket vollständig übertragen wurde
4. Übertragungsdauer mit Wartezeiten in Queues: durch QoS-Einstellungen beeinflussbar, beobachtbar
5. Puffer vor oder im Decoder: einstellbar, Strategie des Herstellers abhängig vom Codec
6. Dauer des Decodierens: abhängig von Komplexität des Codecs und Leistung der Hardware

Eine sich in der Summe ergebende, nicht schwankende Gesamtverzögerung hat in Bezug auf die Qualität der von einem Gesprächsteilnehmer an den anderen geschickten Sprache keinen Einfluss. Durchaus relevant ist die Verzögerung allerdings bei einem Telefongespräch, bei dem – wie üblich – zwei (oder mehr) Teilnehmer abwechselnd sprechen. [3GPP-22105, Abschnitt B.2.1] erklärt dazu:

ITU-T Recommendation G.114 recommends the following general limits for one-way transmission time (assuming echo control already taken care of):

- 0 to 150 ms: preferred range (<30ms, user does not notice any delay at all; <100ms, user does not notice delay if echo cancellation is provided and there are no distortions on the link)
- 150 to 400 ms: acceptable range (but with increasing degradation)
- above 400 ms: unacceptable range

Betrachtet man strikt den IP-Abschnitt einer VoIP-Datenübertragung, so sollte darin keine Echo-Quelle zu finden sein, sofern nicht ein übereifriger Mechanismus zur Echo-Reduzierung erst Echo verursacht. Das Problem des Echos existiert aber unabhängig davon, ob die Übertragung der Sprache mittels VoIP realisiert wird. Wir gehen davon aus, dass Endgerätehersteller und Netzbetreiber ihre dahingehend bewährten Strategien weiterführen. Die Effektivität einer Echo-Unterdrückung kann unabhängig von der zum Transport der Sprachdaten eingesetzten Technologie überprüft werden.

Es sei angemerkt, dass sich die Frage der Echo-Behandlung beim Einsatz von VoIP-Mechanismen für Push-to-talk (siehe Abschnitt 1.2.3) wegen der simplex-Eigenschaft nicht stellt. Es sei weiterhin angemerkt, dass ein Netzbetreiber nur dann Echos unterdrücken kann, wenn er den Sprachdatenstrom lesen und verändern kann, also insbesondere der verwendete Codec bekannt ist und die Übertragung der Daten ohne Sicherstellung der Vertraulichkeit und Integrität von Ende zu Ende stattfindet.

Verlustrate

Der Anteil dem Empfänger nicht zugestellter Pakete, in den meisten Fällen also identisch mit dem Anteil nicht zugestellter Frames, lässt sich durch Beobachten der Übertragungstrecke ermitteln. Nicht beobachtbar bleibt, ob ein Decoder den Inhalt eines spät ausgelieferten Pakets noch verwerten kann und will. Es kann aber wohl davon ausge-

gangen werden, dass alle innerhalb der Puffergröße zugestellten Informationen verwertet werden.

Komplizierter ist die Erfassung defekter Pakete und die Überprüfung, ob solche, wenn angefordert, zugestellt werden. Da wir davon ausgehen, dass es wünschenswert ist, auch defekte Frames dem Decoder zuzuführen ([Hammer03], siehe auch Abschnitt 2.2.1), sollte eine entsprechende Überprüfung stattfinden. Eine IPv4-Infrastruktur wird jedoch als defekt erkannte Pakete bei der ersten Gelegenheit, also meist dem nächsten Router, nicht mehr weiterleiten:

If the header checksum fails, the internet datagram is discarded at once by the entity which detects the error. [RFC791, S. 3]

IPv6 sieht außer für ICMP-Pakete keine Prüfsumme auf der Ebene des Internet Protocols vor [RFC2460, Abschnitt 8.1] ¹, so dass davon auszugehen ist, dass beschädigte, aber zustellbare Datenpakete auch zugestellt werden.

Schwankung der Verzögerung

Die Schwankung der Verzögerung ergibt sich aus einer statistischen Betrachtung der beobachteten Verzögerungen; zur Schwierigkeit der Berechnung einer Maßzahl siehe auch Abschnitt 3.3.2.

4.2.2 Sprachcodierung

Faktoren, die Einfluss auf die Qualität der Codierung einer analogen Spracheingabe haben, sind die nie ideale Digitalisierung und die gewollte Reduktion der Informationsmenge bei der Codierung. Die Digitalisierung findet vollständig außerhalb des Einflussbereichs eines Mobilfunknetzbetreibers statt, ist aber in Bezug auf die Auswirkungen auf die Qualität der Sprachübertragung vernachlässigbar. Auf die Wahl eines Codecs bei der Nutzung von VoIP hat ein Mobilfunknetzbetreiber strenggenommen auch keinen Einfluss; die Unterstützung eines Codecs durch beide Endgeräte ist ausreichend. Lediglich im Falle eines Netzübergangs könnte der (Mobilfunk-)Zugangsbetreiber auch als Betreiber eines IMS auftreten (siehe auch Abschnitt 1.2.1).

Sobald Endgeräte auf dem Markt erhältlich sind, die VoIP über GPRS/UMTS sprechen, wird es sicherlich notwendig werden, die Digitalisierung und den Codec in eine Unter-

¹ IPv6 schreibt allerdings die in IPv4 optionale Nutzung einer Prüfsumme für UDP zwingend vor.

suchung mit einzubeziehen, um vor allem ihren jeweiligen Anteil am Gesamteindruck einschätzen zu können.

4.3 Spezialfall Mobilfunk

Zu den bei jeder Nutzung von VoIP zu beachtenden Faktoren kommen im Falle der Nutzung über ein Mobilfunknetz einige Besonderheiten, begründet in der Funkübertragung der Daten.

4.3.1 Datenrate

Ein Schwanken der erreichbaren Datenrate kann aus diversen Gründen auftreten, beispielsweise wegen einer verstärkten oder vorrangig behandelten Nutzung der Ressourcen durch andere Anwender oder aufgrund einer suboptimalen Konfiguration innerhalb der Funkinfrastruktur des Mobilfunknetzes. Wenn das Ändern der Übertragungsrate aufgrund einer vom Netz erkannten Notwendigkeit stattfindet, so wird das Endgerät über die Änderung informiert (im Falle eines bestehenden PDP Context mittels einer Nachricht vom Typ MODIFY PDP CONTEXT REQUEST [3GPP-24008]) und kann sich darauf einstellen. Ein Verlust von zu übertragenden Paketen ist dann unwahrscheinlich.

4.3.2 Paketverlust

Paketverluste treten vor allem dann auf, wenn ein externer Störeinfluss vorliegt, der sich oft auch in einer ganzen Folge ("burst") verlorener Pakete äußert. Für die Nutzung des AMR-Codex mit der niedrigsten Datenrate von 4,75 kBit/s ergibt sich bei Verwendung von RTP in UDP über IPv4 eine Größe des alle 20 Millisekunden zu übertragenden IP-Pakets von 53 Byte (siehe Abschnitt 2.2.1). Selbst bei sehr guten Verhältnissen und einer nutzbaren Datenrate von 128 kBit/s im Uplink ist ein solches Paket gut 3,3 Millisekunden unterwegs, was genügend Angriffsfläche für einen Störimpuls bietet.

4.3.3 Leerlaufzeiten

Bei Tests mit dem in Kapitel 3 beschriebenen Messsystem schien es, als ob die Dauer der Übermittlung des ersten Pakets einer längeren Übertragung unvorhersehbar sei. Ein Test ergab die in Abbildung 4.1 dargestellte *Round-Trip Time* (RTT), in Abhängigkeit von der Länge einer Phase der Nichtnutzung der Übertragungsstrecke vor Versand der

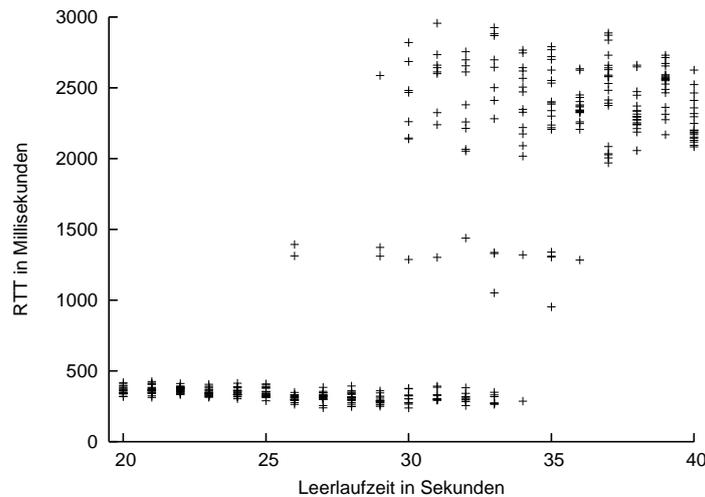


Abbildung 4.1: Round-Trip Time des ersten Pakets nach einer Leerlaufzeit

Daten, ermittelt mittels eines ICMP Echo Requests in der Größe eines für VoIP im Mobilfunk typischen Datenpakets (siehe Abschnitt 2.2.1 mit Abbildung 2.3).

Der Test wurde *ein* Mal durchgeführt, über das Netz *eines* Anbieters (E-Plus), unter Nutzung *eines* Handy-Modells (Nokia 6630) und der Standardeinstellungen des Handys und des Netzanbieters. Es wurden zwanzig Messungen pro Pausenlänge durchgeführt. Die Daten sind also keinesfalls allgemein gültig, konnten aber bereits frühzeitig als Hinweis auf die zu erwartende Größenordnung dienen.

Es konnten folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

1. Unmittelbar nach einer gewissen Zeit des Leerlaufs (in unserem Testfall um 30 Sekunden) verschickte Daten werden mit einer deutlich größeren Verzögerung (in unserem Testfall im Bereich mehrerer Sekunden) zugestellt.
2. Die Aufteilung der Ergebnisse in drei Gruppen, wobei die Werte der einen Gruppe (um 2.500 ms) grob doppelt so hoch sind wie die einer anderen (um 1.300 ms) deutet auf eine getrennte Behandlung von Up- und Downlink hin.
3. Für den Einsatz von VoIP scheint das hier beobachtete Verhalten insofern bedenklich zu sein, als dass eine Gesprächspause von 25 Sekunden in einer Richtung nicht ungewöhnlich sein dürfte. Es bleibt im konkreten Fall zu testen, ob die gewählte Leerlaufzeitspanne ausreichend groß bemessen ist und die vom Endgerät angeforderten Eigenschaften der Übertragungsstrecke auch unmittelbar nach einem Leerlauf eingehalten werden.

Die zwei frühen Werte im Bereich von 26 s / 1.300 ms können durch Paketverluste erklärt werden: Falls ein Echo Request nicht am Ziel ankam oder die Echo Response nicht bis zur Luftschnittstelle, so war die Leerlaufzeit auf dem Downlink vor dem nachfolgenden Paket doppelt so hoch wie zu dem Zeitpunkt im Verlauf des Tests eigentlich vorgesehen.

Es steht zu vermuten, dass die Aktivierung und Deaktivierung des Packet Data Traffic Channels bzw. ein Wechsel des Endgeräts zwischen den Zuständen CELL_FACH und CELL_DCH zur Verzögerung führt; diese Vermutung haben wir jedoch noch nicht verifiziert. Qosmotec bereitet derzeit die Unterstützung spezieller Test-Endgeräte durch das LTS vor, deren Ausgabe unter anderem dafür benutzt werden wird, die Aktivität des Netzwerks detailliert nachzuvollziehen, um Erklärungen für ein solches Verhalten in die Dokumentation aufnehmen zu können.

4.3.4 Bewegung

Eine besondere Eigenschaft mobiler Nutzer ist, dass sie sich während der Nutzung von einem Ort zu einem anderen bewegen können. Ein von den Auswirkungen einer Standortänderung besonders betroffener Abschnitt der Datenübertragungsstrecke ist die Luftschnittstelle. Eine Standortänderung soll kontinuierlich möglich sein; eine bewegungsbedingte Pause, während derer keine Daten übertragen werden können, ist nicht vorgesehen.

Findet ein VoIP-Gespräch über ein Mobilfunknetz statt, während der Nutzer sich bewegt, so sind die Auswirkungen der Standortveränderung über die bereits genannten Eigenschaften, insbesondere Verzögerung und Verlustrate, messbar. Bedingt ein neuer Standort die Reduzierung der Datenrate (oder erlaubt er die Vereinbarung einer höheren Datenrate), so wird dies aktiv zwischen Mobilfunknetz und Endgerät kommuniziert; eine Nichteinhaltung führt dann – wie im Falle der stationären Nutzung – zu einer höheren Verzögerung oder höheren Verlustrate.

Handover

Eine Veränderung des Standorts kann bewirken, dass die Gegenstelle des Endgeräts auf der Funkschnittstelle wechselt; üblicherweise deshalb, weil eine andere Gegenstelle vom Endgerät besser empfangen werden kann. Die notwendige Übergabe, *Handover* genannt, findet im Idealfall vom Nutzer unbemerkt statt.

Moderne, das Zugriffsverfahren *Code Division Multiple Access* (CDMA) verwendende Mobilfunknetze unterstützen die Kommunikation eines Endgeräts mit mehreren Ba-

sisstationen gleichzeitig. Dies ermöglicht einen sogenannten *Soft Handover*, also eine besonders weiche Übergabe. Handover sind grundsätzlich auch zwischen Netzen unterschiedlicher Technologie möglich; es gibt derzeit allerdings keine solche Übergabe, bei der ein *Soft Handover* stattfinden kann.

Während durch einen Handover bedingte Paketverluste eher nicht zu erwarten sind, scheint eine stärkere Verzögerung einer Folge von Paketen insbesondere bei einem harten Handover durchaus wahrscheinlich. Die beim Empfänger entstehende Lücke im Datenstrom kann sich bei einem VoIP-Gespräch bemerkbar machen, weshalb sie durch eine Messung erfasst werden sollte.

4.4 Liste der Kenngrößen

Wir gehen also davon aus, dass folgende in einem Mobilfunknetz vorhandenen Größen Einfluss auf die Qualität der Sprachdatenübertragung bei VoIP haben und daher vom LTS erfasst werden können sollten:

- Laufzeit der IP-Pakete
- Verlustrate
- Zustellung defekter Pakete
- Schwankung der Laufzeit
- Leerlaufzeit vor Abbau von Ressourcen
- größte Lücke zwischen Paketen in korrekter Reihenfolge („Funkstille“)

Kapitel 5

Wichtung der Kenngrößen

Qosmotecs LTS bietet ein mehrschichtiges Test- und Kontrollsystem. Ergibt ein Testlauf eine zufriedenstellende Leistung bei einer Ende-zu-Ende-Übertragung, impliziert das die Funktionstüchtigkeit aller beteiligten Komponenten für den getesteten Zweck in der gewählten Konfiguration. Wird allerdings eine unzureichende Leistung festgestellt, soll dem Nutzer des LTS geholfen werden, die Schwachstellen zu finden.

Um automatisiert auf potentielle Schwachstellen bei einer Nutzung von VoIP hinweisen zu können, ist es notwendig, eine zumindest grobe Kenntnis über den Zusammenhang zwischen den messbaren Kenngrößen (siehe Kapitel 4) und der erreichten Qualität zu haben.

5.1 Sprachqualität

Für die Beurteilung der Qualität einer Sprachausgabe gibt es den *Mean Opinion Score* (MOS), spezifiziert von der ITU in ITU-T P.800 [ITU-MOS]. Er ermöglicht die Einstufung der Qualität einer Sprachwiedergabe auf einer Skala von 1 bis 5 ("bad", "poor", "fair", "good", "excellent") durch Beurteilung im Vergleich zum üblichen Klang menschlicher Stimme. Verfeinerungen der Testverfahren führten unter anderem über *Perceptual Audio Quality Measure* (PAQM) zu *Perceptual Speech Quality Measure* (PSQM) (ITU-T P.861) und PSQM+, sogenannten "intrusive" Verfahren, die einen Vergleich zwischen Eingabe und Ausgabe durchführen. [PSQM]

Durch weitere Verbesserung des P.800 und ähnlicher Verfahren entstand als ITU-T P.862 die Methode der *Perceptual Evaluation of Speech Quality* (PESQ). [ITU-PESQ] PESQ, im Unterschied zu PSQM, erlaubt eine zeitliche Verschiebung von Teilen der

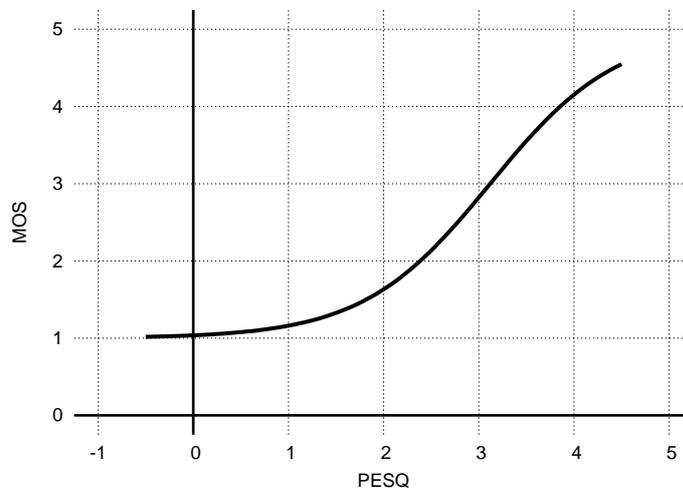


Abbildung 5.1: Umrechnung von PESQ (P.862) nach MOS (P.800)

übertragenen Sprache, in der Praxis also eine Veränderung der Laufzeit [PESQ]. PESQ liefert als Resultat einen Wert zwischen -0,5 und 4,5, der auch in einen MOS-Wert konvertiert werden kann; Tabelle 5.1 zeigt die MOS und PESQ-Werte einiger Sprachcodecs. Die graphische Darstellung der Relation zeigt Abbildung 5.1, die zugrunde liegende Umrechnung entstammt [ITU-P862.1] und lautet als Formel:

$$f(x) = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,4945x + 4,6607}} \quad [\text{Opticom}]$$

Qosmotecs LTS enthält bereits eine Sprachqualitätsermittlung mittels PESQ und wäre auch in der Lage, Kopien der Eingabe oder Ausgabe zwecks Vergleich an eine zentrale Stelle zu schaffen. Gewöhnlich wird jedoch ein vom Hersteller der Auswertungsroutine bereitgestelltes Sprachbeispiel verwendet, das beim Sender und der auswertenden Stelle in digitaler Form vorliegt und nach Angaben des Herstellers den Empfehlungen zur Erstellung solcher Testsequenzen nach [ITU-P862.3] entspricht.

Nicht unerwähnt bleiben soll die ITU-Empfehlung G.107, die einen Algorithmus beschreibt, mithilfe dessen es möglich sein soll, die voraussichtlich erreichte Qualität einer Sprachübertragung bereits zum Zeitpunkt der Planung eines Netzwerks zu errechnen. Dieser unter der Bezeichnung *E-Model* bekannte Algorithmus erwartet als Eingabe unter anderem Angaben über das erwartete Signal/Rausch-Verhältnis und die Art der Nutzung (Festnetztelefon, Mobiltelefon, ...) und liefert eine auf die Zufriedenheit des Nutzers abgestimmte Ausgabe, die wiederum in einen MOS-Wert überführt werden kann. [G107ETSI]

<i>Codec</i>		<i>MOS</i>	<i>PESQ-Score</i>
AMR	(UMTS)	3,4 bis 4,0	3,4 bis 3,9
GSM 06.10	(GSM)	3,5	3,5
G.711	(ISDN)	4,1	3,9
G.723.1	(Video/VoIP)	3,62 (5,6 kBit/s)	3,55
G.726	(DECT/VoIP)	4,2	4,0
G.729a	(VoIP)	3,7	3,6

Tabelle 5.1: MOS und PESQ-Werte ausgewählter Sprachcodecs ([Hoene05, S. 43], [DixitPrasad03, S. 184], weitere Quellen siehe Tabelle 2.1 auf Seite 30). Es lassen sich problemlos um bis zu 10 % abweichende Werte in diversen Quellen finden, wobei in allen Fällen unklar bleibt, woher genau die Werte stammen und wie sie ermittelt wurden.

5.2 Verknüpfung von Kenngrößen und Qualität

5.2.1 Sprachdatenübertragung

Zuerst galt es, einen Weg zu finden, realistische Datenpakete automatisch übertragen zu können. Da ein Ziel war, dem LTS zu ermöglichen, den Einfluss der Datenübertragung auf die Qualität der Sprache zu ermitteln, haben wir nach einer Möglichkeit gesucht, gegebene Audiodaten mittels AMR codieren und per RTP übertragen zu lassen. Idealerweise sollte die Lösung es erlauben, den Codec einfach auszutauschen.

Gefunden haben wir das Framework *GStreamer* [GStreamer], das für diverse „Plugins“, die sich mit der Verarbeitung von Daten mit Abhängigkeit von der Echtzeit befassen, eine Ausführungsumgebung bietet. Primäres Ziel der Entwickler ist die Erstellung einer Bibliothek, die das Aufbauen und Steuern einer „Pipeline“ ermöglicht, die Daten von ihrer jeweiligen Quelle über Plugins zu einer Datensenke führt. Das Angebot an Plugins umfasste alle von uns benötigten Komponenten, konkret folgende:

1. *filesrc*: lesen aus Datei
2. *wavparse*: WAV-Datenstrom lesen
3. *audioresample*, *audioconvert*: Datenstrom mit den gewünschten Eigenschaften auswählen¹

¹ Die Bezeichnungen „resample“ und „convert“ sind hier verwirrend. In unserem Fall wurde durch Einsatz dieser Filter dafür gesorgt, dass das AMR-codierende Modul nicht mit einem Audiodatenstrom versorgt wurde, der theoretisch eine höhere Qualität hätte haben sollen als die Quelldatei überhaupt hergibt.

4. *amrnb*: AMR-Codierung und Decodierung
5. *rtp*: AMR-Frames in RTP-Pakete ein- und auspacken
6. *jrtp*: RTP-Pakete über das Netzwerk übermitteln
7. *wavenc*: Audiodatenstrom in WAV-Audio wandeln
8. *filesink*: binären Datenstrom in Datei schreiben

Überraschend, wenn auch verständlich, war für uns zunächst die Tatsache, dass bei Verzicht auf eine Audiowiedergabe auf Senderseite der Vorgang des Lesens, Codierens und Versendens nicht in Echtzeit, sondern schnellstmöglich erfolgte. Folgende Überlegung entstand: Kann man, um Zeit zu sparen, die Übertragung über das Netzwerk mit einem bekannten Vielfachen der ursprünglichen Geschwindigkeit erfolgen lassen und aus den gemessenen Daten trotzdem Schlüsse auf die Qualität ziehen, die so zuverlässig sind wie bei einer Übertragung der Daten mit normaler Geschwindigkeit? Würden die Daten doppelt so schnell verschickt, sollte auf der Übertragungsstrecke die erlaubte Datenrate doppelt so hoch und beim RTP-Empfänger der Puffer halb so groß sein. Ob diese beiden Änderungen bereits ausreichen, konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr festgestellt werden; eine entsprechende Untersuchung soll folgen, denn schließlich besteht die Wahrscheinlichkeit, dass entsprechende Tests zukünftig deutlich schneller durchgeführt werden können.

Da GStreamer es erlaubt, Datenströme zu duplizieren (mittels des Elements „tee“), bot sich an, beim Sender neben der Netzwerkübertragung eine lokale Echtzeit-Datenquelle einzusetzen, um den Datenstrom der gesamten Pipeline auf normale Geschwindigkeit zu bremsen. GStreamer bietet für solche Zwecke die Datensenke „testsink“. Alternativ ließe sich natürlich auch einfach die Ausgabe über eine lokale Soundkarte bewerkstelligen – falls ein Kunde eine entsprechende Beschallung wünscht, kann er sie gerne bekommen. ;-)

Der für den Einsatz mit GStreamer verfügbare AMR-Codec nutzt die Bibliothek *amrnb*, die wiederum auf der Fließkomma-Referenzimplementierung des 3GPP [3GPP-26104] basiert. Uns stand also mit der 12,2 kBit/s-Variante des AMR ein bereits weit verbreiteter und (auch als GSM EFR) bewährter Codec zur Verfügung, der mit großer Wahrscheinlichkeit in den nächsten Jahren vorzugsweise zum Einsatz kommen wird. Die im folgenden beschriebenen Testläufe fanden alle unter Verwendung dieses Codecs statt, so dass eine Aussagekraft in Bezug auf andere Codecs nicht oder nur sehr eingeschränkt gegeben ist.

Einziger Wermutstropfen in Bezug auf den Einsatz von GStreamer war ein Problem mit dem RTP-Empfangspuffer, das sich im Laufe der Messungen zeigte: Ist der Puffer auf

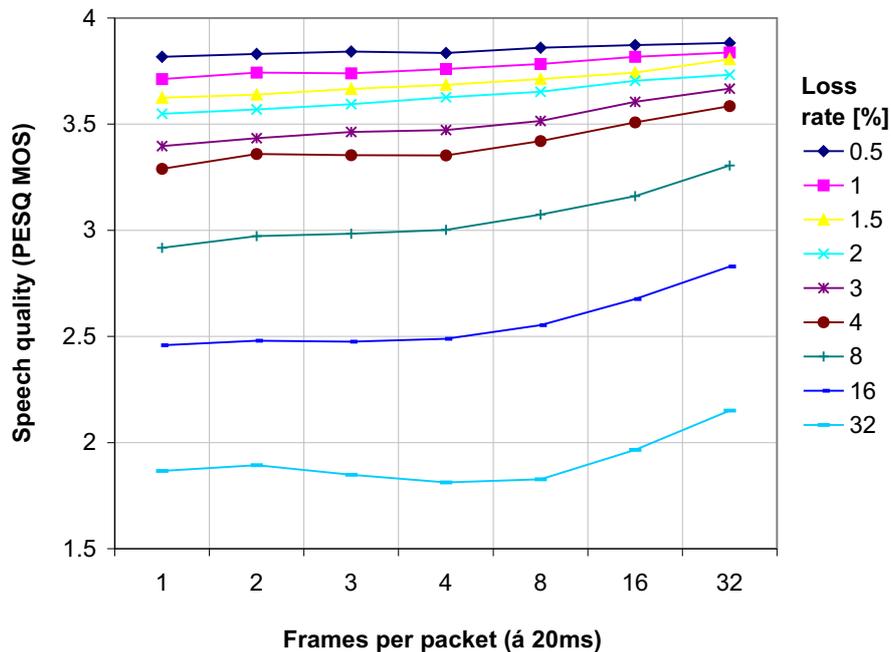


Abbildung 5.2: Qualität der Sprachübertragung bei unterschiedlicher Anzahl Frames pro Paket; AMR 12,2 kBit/s. (Abbildung aus [Hoene05], mit Genehmigung des Autors)

eine Größe zwischen 1 und 13 Millisekunden eingestellt, so werden vom RTP-Empfänger manchmal keine Frames an den AMR-Decoder übergeben. Der genaue Grund für dieses Verhalten ist uns unbekannt; aber da eine solche Puffergröße beim Einsatz von VoIP, insbesondere im Mobilfunk, als ungewöhnlich klein anzusehen ist, war eine weitere Nutzung trotzdem möglich.

Frame-Aggregation

Leider nicht beeinflussbar war die Verteilung der AMR-Frames auf IP-Pakete, sie war mit 1:1 fest vorgegeben. Hoene zeigt jedoch, dass die Anzahl der Frames pro Paket unabhängig von der Paketverlustrate nur einen minimalen Einfluss auf die Sprachqualität hat, zumindest bis zu einer Anzahl von etwa acht Frames pro Paket [Hoene05, S. 153], siehe auch Abbildung 5.2. Eine entsprechende Aggregation läge also im Ermessen eines Geräteherstellers und unterläge mitsamt der durch sie verursachten höheren Verzögerung einer Ende-zu-Ende-Untersuchung durch das LTS.

5.2.2 Fax und DTMF-Töne

Sollte jemals der Wunsch danach aufkommen, analoge Faxübertragung über VoIP über ein Mobilfunknetz durchzuführen (analog zur Nutzung von G3-Faxgeräten über VoIP, wenn kein Festnetzanschluss zur Verfügung steht; siehe auch Abschnitt 2.2.3), werden wir uns Mühe geben, einen entsprechenden Test zu entwickeln. Sofern ein analoges Endgerät (also beispielsweise ein Fax-Modem) anschließbar ist, sind Versand und Empfang inklusive Auswertung der Qualität (zum Beispiel in Form fehlender Zeilen) sicher un schwer zu realisieren. Wir erwarten einen solchen Wunsch jedoch nicht; obwohl derzeit nicht vorhersehbar ist, welcher Fax-Dienst den Nutzern eines Release 5-Mobilfunknetzes zur Verfügung stehen wird. Diskutiert wurde unter anderem eine E-Mail-to-Fax-Lösung; eleganter erscheint eine Lösung basierend auf ITU-T T.38; aber auch Fax über RTP wird diskutiert. [3GPP-22945]

In Bezug auf DTMF-Töne ist davon auszugehen, dass die Information pro Tastendruck in je einem UDP-Paket übermittelt werden wird (siehe auch Abschnitt 2.2.3), so dass sich Verzögerung und Paketverlustrate auf die Übertragung auswirken. Die Qualität der Übertragung ist schwieriger in einen Wert zu fassen, da der Zweck der Übertragung eines DTMF-Tons deutlich vielseitiger sein kann als der Zweck der Übertragung menschlicher Sprache. Wird ein Spiel über DTMF-Töne gesteuert, ist die Laufzeit der Pakete sicherlich relevant; werden DTMF-Töne jedoch zur Steuerung eines Menüsystems eingesetzt, ist eine etwas größere Verzögerung wohl eher zu verschmerzen als der Verlust der Information.²

5.3 Eigenschaften der Übertragungsstrecke

Um einen Eindruck von der zu erwartenden Paketlaufzeit und deren Schwankung zu bekommen, haben wir den Testsound 15 Mal hintereinander von einem Endgerät über eine ansonsten unbelastete UMTS-Strecke zu einem gut angebundenen Rechner im Internet übertragen und die Eigenschaften der Übertragungsstrecke mittels des in Kapitel 3 beschriebenen Verfahrens ermittelt. Ein erster Lauf fand unter Nutzung der Standardeinstellungen von Mobilfunknetz und Endgerät statt. Unmittelbar vor Beginn der beobachteten Übertragung wurden Pakete verschickt und empfangen, so dass das oben beschriebene Verhalten der Verzögerung der ersten Pakete nach einer längeren Sendepause nicht zu befürchten war. Die Systemzeit der Sende- und Empfangsrech-

² Interessanterweise deutet sich hier an, dass Sprachdatentransport und der Transport von DTMF-Ton-Information gegenteilige Ansprüche an die Eigenschaften der Übertragungsstrecke stellen.

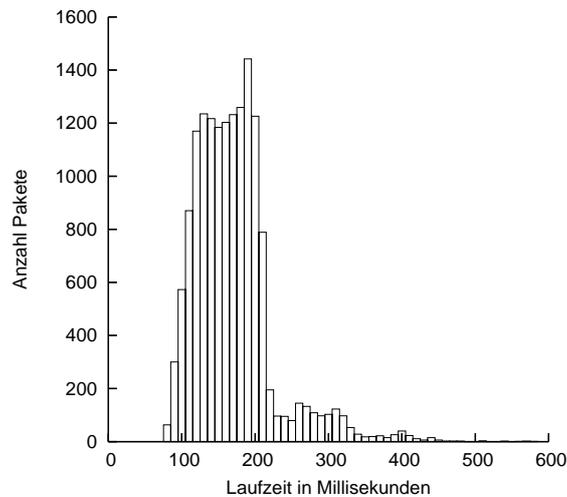


Abbildung 5.3: Verteilung der Laufzeit bei Standardeinstellungen

ner war mittels NTP auf denselben Zeitserver synchronisiert und hatte laut NTP eine Abweichung voneinander von weniger als 3 Millisekunden.

Das Ergebnis (siehe Abbildung 5.3) war dahingehend überraschend, dass kein einziges Paket verloren ging. Die gemessenen Zeiten: maximale Verzögerung 577 ms, minimale Verzögerung 79 ms, durchschnittliche Verzögerung 170 ms, Standardabweichung 54,4 ms.

Gerne hätten wir den Test mit QoS-Parametern wiederholt, die denen entsprechen, die vermutlich von einem VoIP nutzenden Endgerät in einem Release 5-Netzwerk gefordert werden würden. Leider war das nicht möglich, da die drei Netzbetreiber, deren Netze zum Testen genutzt werden konnten (Vodafone, E-Plus, O₂) ihren Kunden eine solche Wahl nicht gestatten.³ Unser Wunsch wäre es gewesen, folgende Leistungen zwingend anzufordern (siehe dazu auch Abschnitt 2.4.2):

- *traffic class*: conversational (0)
- *maximum bitrate uplink*: 32 kBit/s
- *maximum bitrate downlink*: 32 kBit/s

³ Die drei Netzbetreiber schienen alle die gleiche Ausrüstung zu verwenden; uns ist im Laufe der Tests kein Unterschied aufgefallen. Insbesondere benutzen alle drei nicht nur eine sich identisch verhaltende Gegenstelle im GGSN, sondern auch die gleichen IP-Adressen, ein unsinniges TCP-ACK-Spoofing und einen Daten auf die gleiche Art verändernden Content-Filter. Laut Auskunft eines Insiders stammt die Ausrüstung jedoch von mindestens zwei unterschiedlichen Herstellern und ist lediglich exakt gleich konfiguriert.

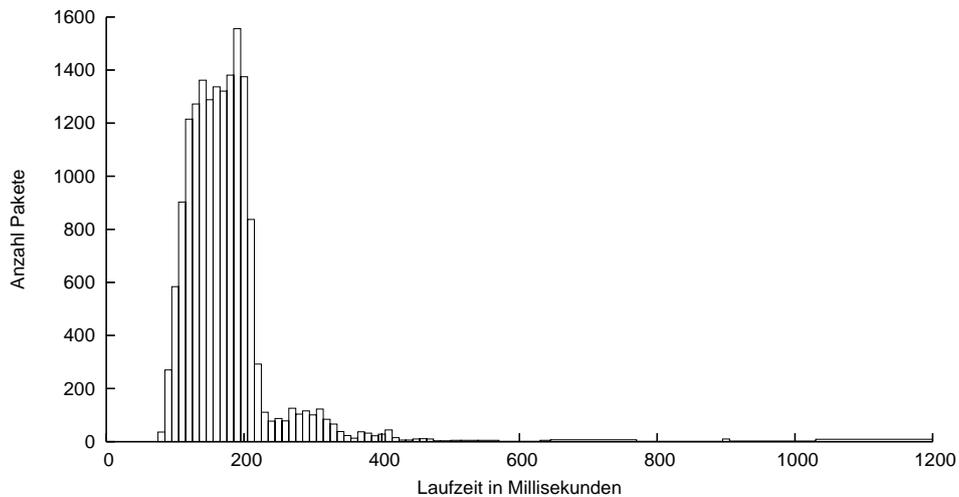


Abbildung 5.4: Verteilung der Laufzeit bei Datenrate bis 32 kB/s

- *guaranteed bitrate uplink*: 22 kBit/s
- *guaranteed bitrate downlink*: 22 kBit/s
- *delivery order*: aus (0)
- *delivery of erroneous SDUs*: nicht prüfen (2)
- *traffic handling priority*: höchste (1)

Die Datenraten ergeben sich aus der zu erwartenden Datenmenge bei Nutzung des AMR-Codex (50 Frames pro Sekunde) in RTP in UDP über IPv4 in der besten Variante (12,2 kBit/s, 33 Byte Sprachdaten pro Frame) und der schlechtesten (4,75 kBit/s, 13 Byte Sprachdaten pro Frame), 1 Frame pro Paket, ohne Headerkomprimierung; siehe auch Abschnitt 2.2.1.

Bei Anforderung einer anderen *traffic class* als „background“ (3) kam keine Datenverbindung zustande.⁴ Wir mussten uns also mit dieser Klasse begnügen, haben die anderen hier aufgeführten Parameter als Minimum angefordert und einen weiteren Testlauf durchgeführt. Auch dieses Mal kamen alle Pakete ans Ziel, weitere Werte: maximale Verzögerung 1.155 ms, minimale Verzögerung 81 ms, durchschnittliche Verzögerung 172 ms, Standardabweichung 64,6 ms (siehe auch Abbildung 5.4).

⁴ Der Aufbau der PPP-Kommunikation zwischen steuerndem PC und Mobiltelefon wurde eingeleitet, aber vom Mobiltelefon wieder abgebrochen. Allem Anschein nach war das Telefon nicht in der Lage, den PDP-Context wie gewünscht aufzubauen.

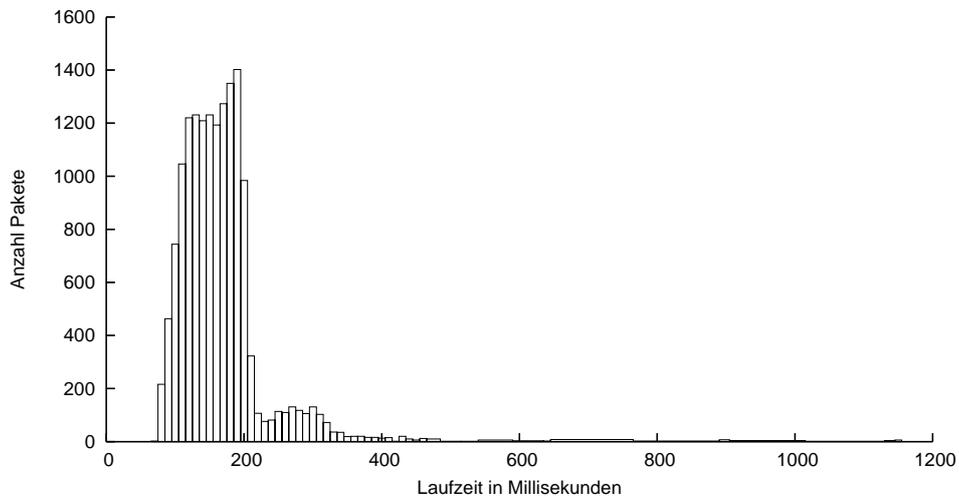


Abbildung 5.5: Verteilung der Laufzeit bei Datenrate bis 32 kB/s mit *target delay* von 1ms

Dem Ziel einer zügigen Übertragung waren wir mit einer freiwilligen Beschränkung der Datenrate also nicht näher gekommen. Blieb noch der Versuch, unseren Wunsch dem Netz nicht implizit über die *traffic class*, sondern explizit über das *target delay* mitzuteilen. Der kleinstmögliche Wert ist 1 (für 1 Millisekunde). Erneut gab es keinen Paketverlust und – etwas enttäuschend – keinen Unterschied zu den QoS-Einstellungen ohne Angabe des *target delay*: maximale Verzögerung 1.151 ms, minimale Verzögerung 74 ms, durchschnittliche Verzögerung 165 ms, Standardabweichung 65,7 ms (siehe Abbildung 5.5).

Wir konnten direkt schlussfolgern: Die Netzbetreiber akzeptieren jene angeforderten QoS-Einstellungen, die sie auch einhalten wollen und können. Eine geringere Verzögerung als bei den Standardeinstellungen ist jedoch derzeit über standardisierte Mittel nicht einstellbar.

5.3.1 Netzwerk-Emulation

Nach den enttäuschenden einführenden Untersuchungen zur Einstellbarkeit der gewünschten Parameter in den öffentlichen Mobilfunknetzen und Verifizierung der Tatsache, dass nicht dauerhaft 3G-Netzwerkausrüstung im Labor zur Verfügung stehen würde, war es notwendig, eine Funkübertragungstrecke zu simulieren. Relativ bekannt und erprobt sind zwei Lösungen:

1. *NIST Net* [NISTNet]: eine Erweiterung für den Linux-Kernel mit der Fähigkeit, in Abhängigkeit von Quell- und Zieladressen die Verzögerung, Schwankung der Verzögerung, Verlustrate, Paketduplizierungsrate und maximale Datenrate vorzugeben. Gegen den Einsatz von *NIST Net* sprachen eine gewisse Ungepflegtheit des Codes (“Note: NIST Net is basically beta level code, except when it is alpha!” [NISTNet]) und Unklarheiten in Bezug auf die erforderliche Umgebung, unter anderem passende Kernel-Versionen.
2. *dummynet* [dummynet]: ein Tool und Kernel-Erweiterung, das unter FreeBSD unter Nutzung des Firewall-Mechanismus *ipfw* pro „Pipe“ der Firewall die Einstellung von Datenrate, Größe der Queue, Verzögerung und Verlustrate ermöglicht. Gegen die Verwendung von *dummynet* sprach die Notwendigkeit des Einsatzes eines FreeBSD-Systems, was nicht aus Prinzip, sondern aus Gründen der späteren Wartbarkeit durch das vorhandene Personal vermieden werden sollte.

Eine weitere Alternative, auf die letztendlich die Entscheidung fiel, zeigte sich im Linux-Kernelmodul *netem* [netem], Teil des Pakets *iproute2*. Es ist enthalten in den offiziellen Kernel-Sourcen und wird zu den Linux-Kernels der 2.6er Serie in vielen großen Distributionen standardmäßig als Modul mit ausgeliefert. *netem* kann eine sogenannte *queueing discipline* (qdisc) von *iproute2* dahingehend einstellen, dass sich Verzögerung, Schwankung der Verzögerung, Verlustrate, Defektrate, Reihenfolge, Datenrate und weitere Details wie gewünscht ergeben.

5.4 Funktionstests und erste Messungen

5.4.1 Paketlaufzeit

Bei gleichbleibender Paketlaufzeit war keine Beeinträchtigung der Qualität der Sprachwiedergabe zu erwarten. Der Vollständigkeit halber – und um unseren Aufbau zu testen – haben wir trotzdem Testläufe durchgeführt, bei denen die Qualität der Sprachübertragung, ausgegeben in Form eines PESQ-Wertes, in Abhängigkeit von der Laufzeit der IP-Pakete auf der Übertragungstrecke ermittelt wurden.

Da uns keine typischen Werte für die Verlustrate bei Nutzung der UMTS-QoS-Klasse “conversational” vorlagen, fand dieser Test nicht nur ohne Schwankung der Laufzeit, sondern auch bei 0% Paketverlustrate statt. Der Puffer auf Empfängerseite war auf 15 ms eingestellt (siehe auch Hinweis in Abschnitt 5.2.1), um unvermeidbare Schwankungen in der Laufzeit auf jeden Fall abfangen zu können, die Messung ansonsten aber nicht zu beeinflussen.

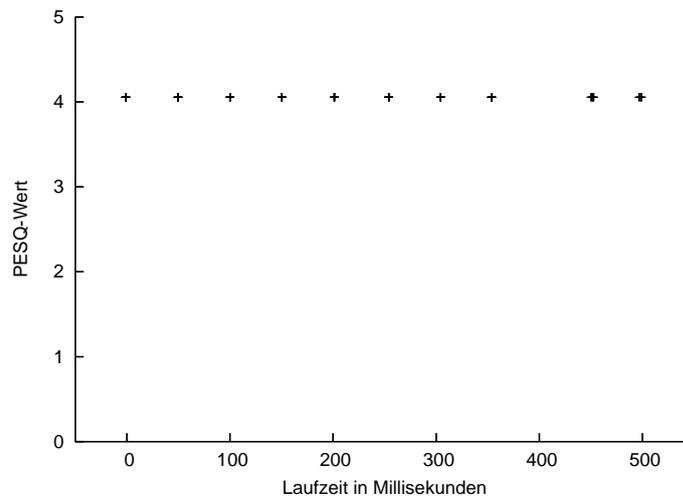


Abbildung 5.6: Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Laufzeit

Das Ergebnis entspricht den Erwartungen und ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Der durchgängig ermittelte PESQ-Wert ist 4,055, also minimal größer als die bestmögliche Leistung des AMR 12.2 laut Literatur (siehe Tabelle 5.1). Die dargestellte Laufzeit ist nicht die Vorgabe an *netem*, sondern wurde mittels des in Kapitel 3 beschriebenen Verfahrens als durchschnittliche Laufzeit aus Mitschnitten der IP-Pakete von Sender- und Empfängerseite ermittelt.

5.4.2 Verlustrate

Ein weiterer Test bezog sich auf die Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Paketverlustrate. Wir haben keine zusätzliche Verzögerung eingesetzt und den Puffer auf Empfängerseite erneut auf 15 ms eingestellt, um potentielle Schwankungen bei der Übertragungsrate ausgleichen zu können. Das Ergebnis ist dargestellt in Abbildung 5.7; die Verlustrate ist auch hier nicht die Vorgabe an *netem*, sondern die nachträglich ermittelte Rate.

Der schnelle Fall der Qualität mit Anstieg der Paketverlustrate deckt sich nicht mit Angaben wie beispielsweise Abbildung 5.2 und Aussagen in [Sunlfeachor], die AMR eine hohe Qualität auch bei relativ hoher Paketverlustrate bescheinigen. Ein Grund dafür ist uns bisher nicht bekannt.

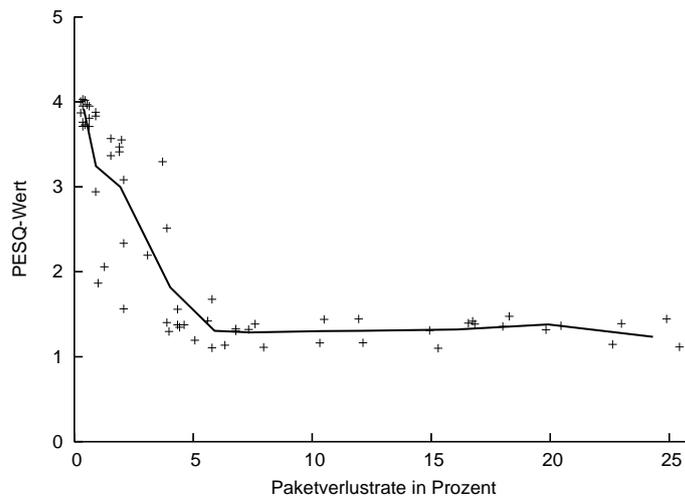


Abbildung 5.7: Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Paketverlustrate. Der Verlauf der eingezeichneten Linie ergibt sich aus der Mittelung der PESQ-Werte und der Verlustrate, gruppiert nach der Vorgabe der Verlustrate an *netem*.

5.4.3 Schwankung der Laufzeit

Um aus einer gegebenen (Multi-)Menge von Laufzeiten einen einzelnen, aussagekräftigen Wert zu erstellen, der die Schwankung der Laufzeiten beziffert, gibt es ja schon diverse Möglichkeiten (siehe Abschnitt 3.3.2); aber aus einem solchen einzelnen Wert die Schwankung der Laufzeit realitätsnah zu emulieren ist wohl schlicht nicht möglich.

netem erlaubt jedoch die Angabe nicht nur einer durchschnittlichen Verzögerung und des Bereichs, in dem die Verzögerung schwankt, sondern auch einer Verteilung der Verzögerungswerte. Mithilfe des Tools *maketable*, das ursprünglich aus dem NIST Net-Projekt stammt und in *iproute2* enthalten ist, lässt sich aus einer gegebenen Liste von Verzögerungswerten eine Darstellung der Verteilung erzeugen, die als Eingabe für *netem* verwendet werden kann. Da uns keine bessere Datenquelle zur Verfügung stand, haben wir die bereits gemessenen Werte (siehe Abschnitt 5.3) in eine solche Konfigurationsdatei umgerechnet und verwendet.

Derzeit unbekannt ist uns, ob auch andere Verteilungen zum selben Ergebnis führen, sofern sie gewisse Eigenschaften einhalten, also beispielsweise eine gleiche Standardabweichung zeigen. Da die Antwort auf diese Frage nur für die Emulation der Funkstrecke relevant ist, haben wir uns bisher nicht näher damit beschäftigt.

Für den Test haben wir eine durchschnittliche Laufzeit von 200 ms gewählt und den erlaubten Umfang der Schwankung variiert. Der Größe des Puffers auf Empfängerseite kam in diesem Fall eine besondere Bedeutung zu, da sie offensichtlich Einfluss auf die Qualität der Sprachübertragung haben würde. Wir haben daher den Test mehrfach, mit jeweils anderer Puffergröße durchgeführt.

Während des Tests fiel auf, dass viele Pakete nicht in der Reihenfolge eintrafen, in der sie verschickt wurden. Diese Tatsache ist vermutlich darin begründet, dass wir bei der Konfiguration der Funkstreckenemulation vorerst keinen Wert darauf gelegt hatten, auch eine realitätsnahe Korrelation der Verzögerungen der einzelnen Pakete einzustellen, in der Realität aber aufeinander folgende Pakete häufig eine ähnlich große Verzögerung aufweisen dürften.

Das Ergebnis entsprach grob unseren Erwartungen, also schlechtere Qualität bei größerer Schwankung (in Abbildung 5.8 nach rechts) und bei geringerer Puffergröße (nach vorn). Erneut war jedoch ein recht abrupter Anstieg der PESQ-Werte zu erkennen, hier zwischen Puffergröße 40 und 50 Millisekunden. Zu beachten ist, dass die angegebene Standardabweichung der Laufzeit bei der verwendeten Laufzeitverteilung (siehe Abschnitt 5.3) eine durchaus deutlich größere Laufzeit einzelner Pakete zulässt.

Es steht zu vermuten, dass eine geschickte Wahl oder gleitende Anpassung der Puffergröße – entsprechend der aktuellen Empfangssituation (Schwankung der Laufzeit, fehlende Frames, ...), nach oben beschränkt und unter Berücksichtigung der Verarbeitungsdauer bis zur Ausgabe über einen Lautsprecher – einen wesentlichen Beitrag zu qualitativ hochwertiger Sprachwiedergabe darstellt.

5.4.4 Größte Lücke zwischen Paketen in korrekter Reihenfolge

Zur Ermittlung der größten zeitlichen Lücke zwischen zwei Paketen in korrekter Reihenfolge, also einer „Funkpause“, die nicht zwangsweise mit Paketverlust einhergehen muss (siehe Abschnitt 4.3.4), haben wir die in Kapitel 3 beschriebene Paketdatenerfassung entsprechend erweitert und die bereits vorhandenen Mitschnitte analysiert. Die Häufigkeit des Auftretens der größten Funkpause war für alle Positionen im Datenstrom gleich groß.

Wie aus den Abbildungen 5.9 und 5.10 unschwer zu erkennen, scheint kein Zusammenhang zwischen der Größe der größten Lücke und der Qualität der Sprachübertragung zu bestehen.

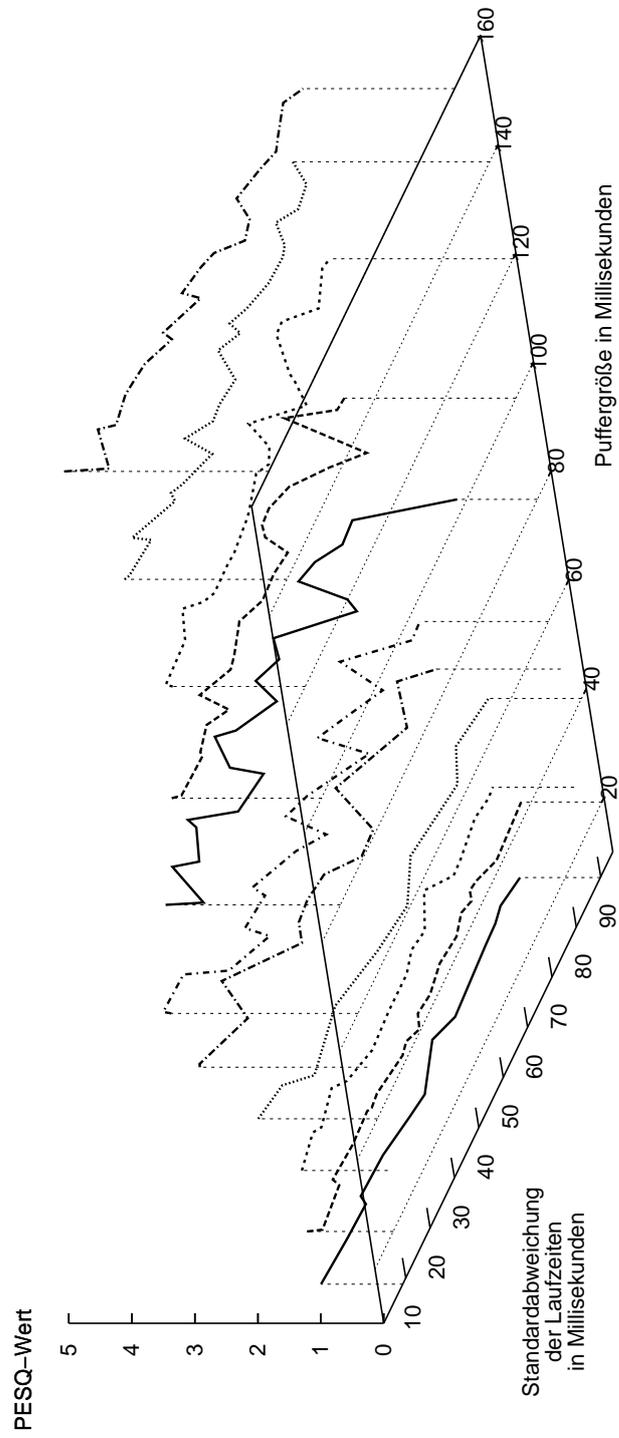


Abbildung 5.8: Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Puffergröße und der Schwankung der Paketlaufzeit, geglättet durch Mittelung über jeweils drei Messwerte

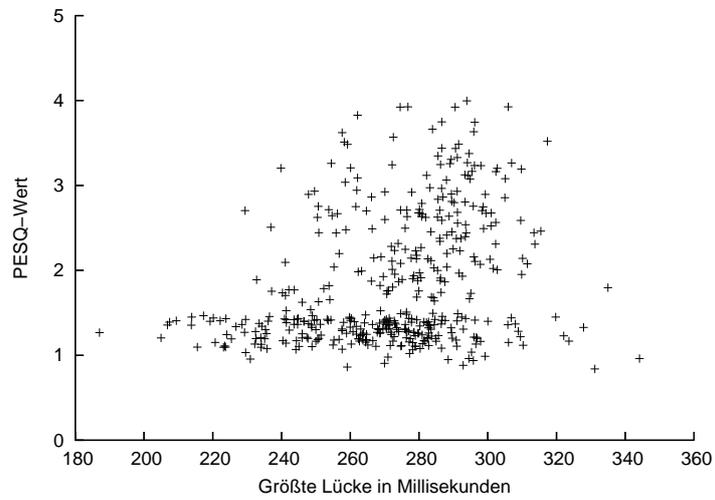


Abbildung 5.9: Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der größten Lücke (1/2). Datenquelle: Tests zu Auswirkungen der Schwankung der Laufzeit mit Puffergröße ≤ 70 ms.

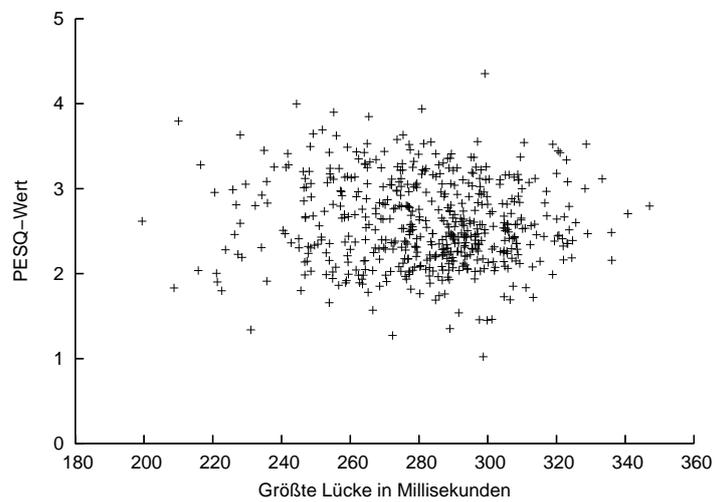


Abbildung 5.10: Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der größten Lücke (2/2). Datenquelle: Tests zu Auswirkungen der Schwankung der Laufzeit mit Puffergröße > 70 ms.

5.4.5 Zwischenstand

An dieser Stelle müssen wir eingestehen, dass die Zeit fehlte, um dem erkennbaren Verhalten detailliert auf den Grund zu gehen. Wir haben bisher nicht herausfinden können, warum die Qualitätsmessung bei steigender Paketverlustrate so schnell sinkende Ergebniswerte liefert – obwohl mehrere Anzeichen auf ein Fehlverhalten des RTP-Empfangspuffers hindeuten. Dieses Verhalten lässt sich aber auch bei der Betrachtung der Qualität in Abhängigkeit von der Laufzeitschwankung (Abbildung 5.8) und der größten Lücke (Abbildung 5.9) wiedererkennen, so dass uns stures Weitertesten sinnlos erschien.

Wir haben uns also entschlossen, erst ein funktionierendes Werkzeug in Form der Erweiterung des LTS fertigzustellen, bevor wir jenes Werkzeug benutzen, um Kenntnis darüber zu erlangen, welche Bedeutung den gemessenen Werten im Vergleich miteinander beizumessen ist.

5.4.6 Weitere Ideen

Es existieren etliche weitere Ideen, die zu untersuchen jedoch mehr und mehr Zeit und statistischen Sachverstand erfordern wird. So können wir uns beispielsweise vorstellen, dass eine Messung dahingehend, ob ein noch zu bestimmender Anteil von Paketen innerhalb einer gewissen Zeit sein Ziel erreicht hat, ein aufschlussreiches Maß liefert.

Es könnte interessant sein, festzustellen, welcher Anteil von Paketen beim Empfänger mit einem Abstand von etwa einer Framelänge auf das vorhergehende Paket eintreffen muss, um eine gewünschte Qualität der (Simplex-)Sprachübertragung gewährleisten zu können. Fände sich ein solcher Zusammenhang, könnte die Untersuchung des Paketstroms sogar auf die Seite des Empfängers beschränkt werden.

5.5 Weitere Literatur

Es fand sich relativ wenig Literatur, die sich damit beschäftigt, die Bedeutung der Kenngrößen im Vergleich miteinander herauszustellen. Viele Werke zählen lediglich auf, welche Faktoren es gibt, oder zitieren Teilergebnisse von Studien, wie beispielsweise Sanneck et al. ("Factors influencing the speech quality in a wireless VoIP system") und Prasad ("UMTS speech quality") in [DixitPrasad03, 10.2/27.5]. Andere stürzen sich auf ein Detail, wie zum Beispiel zehn Mitarbeiter von Ericsson und Japan Telecom, die in ihrem Artikel "Experimental Field Trial Results of Voice-over-IP over WCDMA

Links" [Liu00] belegen, dass ein maßgeblich von Ericsson entwickelter Header-Komprimierungsalgorithmus namens *ROCCO* [DraftRocco] auf Strecken mit hohen Bittfehlerraten besser funktioniert als *Compressed RTP* (CRTP) [RFC2508].⁵

Ebenfalls auf ein Detail konzentriert, beschreiben Marks und Gonzalez in "Analysis of codecs for audio streaming over the mobile internet" vor allem die Belastbarkeit eines Codecs in Bezug auf (Bit-)Fehler im Datenstrom, schlagen zwischendurch einen Bogen zur Qualität der Audiowiedergabe und kommen zu folgendem Schluss:

[W]hile most [codecs] showed excellent error resilience, the codecs with the lower bitrates had poor error resilience One notable exception to this was AMR which exhibited excellent error resilience. [MarksGonz03]

Sehr detailliert beschreibt Juliet Bates von Alcatel in "Optimizing Voice in ATM/IP Mobile Networks", wie ein ATM-Netz, über das Sprache in Paketen transportiert werden soll, optimal zu konfigurieren ist. Bates geht nicht davon aus, dass die Sprache bereits in IP-Paketen vorliegt, betrachtet für uns interessante Aspekte der Digitalisierung der Sprache allerdings leider auch nur dahingehend, dass sie Codec-Eigenschaften angibt und die Effizienz der Frame-Aggregation in Bezug auf die anfallende Datenmenge pro Zeit berechnet. [Bates02, S. 55f]

⁵ ROCCO ist in ROHC [RFC3095] aufgegangen.

Kapitel 6

Ermittlung der Werte durch das LTS

Ein Ziel dieser Arbeit war es, Qosmotecs Lab Test System um die Fähigkeit zu erweitern, die Tauglichkeit eines Mobilfunknetzes für die Nutzung mit Voice over IP zu ermitteln, wobei die Qualität der Sprachübertragung im Vordergrund stand. Außerdem sollten Hinweise auf Problemquellen gegeben werden können, die anhand der Beobachtung des IP-Datenstroms ermittelt werden sollten. Dazu musste das LTS in die Lage versetzt werden, VoIP-Übertragungen durchzuführen, die Qualität der Sprachwiedergabe auch für VoIP zu bestimmen und Kenngrößen der Datenübertragungsstrecke zu erfassen. (Siehe auch Abschnitt 1.3.3.)

Die Erfassung der Kenngrößen sollte ohne Veränderung des zu übertragenden Datenstroms stattfinden können, insbesondere also ohne Übertragung zusätzlicher Daten über die Teststrecke. Eine Lösung für diese Anforderung wurde in Kapitel 3 beschrieben. Details in Bezug auf das Zusammenspiel mit LTS beschreibt Abschnitt 3.2.

6.1 Paketübertragung

Um die zur Beurteilung der Datenübertragungsstrecke notwendige Erfassung der Pakete durch den *Mobile Control Server* des LTS zu ermöglichen, wurden folgende neue Test-Steps entwickelt:

- Paketmonitor starten
- Paketmonitor stoppen

Die Informationen, die der Paketmonitor benötigt, um den zu beobachtenden Datenstrom identifizieren zu können (also beispielsweise Transportprotokoll, Ziel-IP-Adresse und Ziel-Port), werden bei der Konfiguration eines Test-Cases, in dem einer der neuen Test-Steps enthalten ist, vorgegeben und können von mehreren Test-Steps verwendet werden. Die verwendete Netzwerkschnittstelle ist innerhalb des Testsystems bereits bekannt und wird bei Aufruf des Monitors übergeben.

6.2 VoIP-Sprachübertragung

6.2.1 Sprachdaten

Um die Ermittlung der VoIP-Sprachübertragungsqualität zu ermöglichen, wurden folgende neue Test-Steps entwickelt:

- Aktivierung des Traffic Channels erzwingen (siehe Abschnitt 4.3.3)
- VoIP-Datenempfang starten
- VoIP-Sprachdaten senden
- VoIP-Datenempfang abbrechen

Diese neuen Test-Steps wurden in neuen Test-Prozeduren eingesetzt:

- Test-Prozedur: VoIP-Daten senden, bestehend aus folgenden Test-Steps:
 1. ggf. IP-Zugang herstellen
 2. Monitor starten (optional)
 3. warte auf Empfänger „bereit“
 4. Aktivierung des Traffic Channels erzwingen (optional)
 5. VoIP-Sprachdaten senden
 6. schicke an Empfänger „beendet“
 7. Monitor stoppen (falls vorher gestartet)
- Test-Prozedur: VoIP-Daten empfangen, bestehend aus folgenden Test-Steps:
 1. ggf. IP-Zugang herstellen
 2. Monitor starten (optional)
 3. VoIP-Datenempfang starten

4. schicke an Sender „bereit“
5. warte auf Sender „beendet“
6. VoIP-Datenempfang abbrechen
7. Monitor stoppen (falls vorher gestartet)
8. Sprachqualität ermitteln: PESQ-Evaluation durchführen

Wiederverwendet werden konnten Teile diverser bereits vorhandener Test-Cases für Daten- und Sprachübertragung. Herausforderung in Hinblick auf das bestehende System waren insbesondere folgende Eigenschaften:

- Abbruchbedingung auf Empfängerseite: Sowohl zum Beenden des VoIP-Datenempfangs als auch des Paketmonitors ist eine entsprechende Steuerung durch den Sender der Daten und eine zentrale Stelle notwendig, da keine andere Informationsquelle existiert, die das Ende der Datenübertragung eindeutig signalisieren könnte. Die Überwachung einer Zeitüberschreitung ist grundsätzlich möglich und wird auch praktiziert, sollte aber möglichst dem Fehlerfall vorbehalten bleiben. Auch führt die Verwendung einer Zeitüberwachung zu unnötig großen Verzögerungen, die insbesondere bei Last-Tests mit mehreren hundert oder tausend Durchläufen die Ausführungsdauer deutlich erhöhen können.
- Dreiteilung des Paketmonitors: Da viele der gewünschten Informationen über die Eigenschaften der Übertragungsstrecke erst ermittelt werden können, wenn die auf Sender- und Empfängerseite erfassten Daten verglichen werden, muss diese Auswertung an zentraler Stelle geschehen. Alle bisher vorhandenen Tests waren jedoch so entwickelt, dass sie die gewünschten Daten ohne die Notwendigkeit einer weiteren Verarbeitung über den Test Scenario Manager zurückreichen (siehe Abschnitt 1.3.2).

Auch die zentrale, die Auswertung der Paketinformationen durchführende Stelle musste dabei konfigurierbar ausgelegt werden, da einstellbar sein sollte, in welchem Intervall eine Ausgabe von Zwischenergebnissen stattfinden soll, und eine Wahl der Art der Berechnung der Laufzeitschwankung ermöglicht werden sollte (siehe Abschnitt 3.3.2). Auf Wunsch werden alle von den Paketmonitoren ermittelten Daten (also Identifikationsnummer und Zeitstempel jedes IP-Pakets) zentral gespeichert, so dass sie nachträglich für weitere Auswertungen zur Verfügung stehen.

Die neuen Test-Prozeduren ließen sich sodann in einem neuen Test-Case einsetzen, der als „VoIP Test Case“ sowohl die Sende- als auch die Empfangs-Prozedur enthält. Der

neue Test-Case kann in einem vom Kunden erstellten Test-Szenario verwendet werden – auch mehrfach, sofern entsprechende Ressourcen zur Verfügung stehen.

Für den Test einer halb-duplex-Kommunikation werden die beiden oben beschriebenen Test-Prozeduren abwechselnd ausgeführt. Für den Test einer voll-duplex-Kommunikation musste eine weitere Test-Prozedur entworfen werden, die die Datenübertragung sowohl in Empfangs- als auch in Senderichtung steuert. Eine gleichzeitige Verwendung der beiden Test-Prozeduren zum Versand und Empfang von VoIP-Daten war nicht möglich, da im LTS zwischen Test-Prozeduren und Mobiltelefonen eine 1:1-Beziehung besteht (siehe auch Abschnitt 1.3.2), eine zweite Test-Prozedur die von der ersten Test-Prozedur unter Nutzung eines Mobiltelefons aufgebaute Übertragungsstrecke also nicht mitnutzen kann.

- Test-Prozedur: VoIP-Daten senden und empfangen:
 1. ggf. IP-Zugang herstellen
 2. Empfangsmonitor starten (optional)
 3. Sendemonitor starten (optional)
 4. VoIP-Datenempfang starten
 5. schicke an Gegenstelle „bereit“
 6. warte auf Gegenstelle „bereit“
 7. Aktivierung des Traffic Channels erzwingen (optional)
 8. VoIP-Sprachdaten senden
 9. schicke an Gegenstelle „beendet“
 10. Sendemonitor stoppen (falls vorher gestartet)
 11. warte auf Gegenstelle „beendet“
 12. VoIP-Datenempfang abbrechen
 13. Empfangsmonitor stoppen (falls vorher gestartet)
 14. Sprachqualität ermitteln: PESQ-Evaluation durchführen

6.2.2 Leerlaufzeit

Eine weitere neue Test-Prozedur ist die Ermittlung der erlaubten Leerlaufzeit (siehe Abschnitt 4.3.3). Die Erkennung des Grenzwertes ist derzeit noch dem Anwender über-

lassen; das LTS übernimmt jedoch die Durchführung der Messungen. Dabei werden in einer inneren Schleife ICMP Echo Requests einstellbarer Größe gesendet und die Zeit bis zum ICMP Echo Reply gemessen. Sobald die Round Trip Time einen einstellbaren Wert unterschreitet, die Übertragungsstrecke also die erwartete Leistung erbringt, gilt die Schleifenbedingung als nicht mehr erfüllt. Es wird sodann eine mit jedem Durchlauf einer äußeren Schleife leicht verlängerte Zeit gewartet, bevor erneut die Zeit bis zur Antwort auf einen ICMP Echo Request gemessen wird. Die Dauer der Leerlaufphase und die zuletzt gemessene Round Trip Time werden als Ergebnis des jeweiligen Durchlaufs der äußeren Schleife geliefert:

- Test-Prozedur: RTT nach Leerlaufzeit erfassen:
 1. ggf. IP-Zugang herstellen
 2. äußere Schleife, n laufe von a bis b mit Schrittgröße c :
 - (a) innere Schleife:
 - i. bestimme RTT
 - ii. weiterer Schleifendurchlauf, falls $RTT > x$
 - (b) warte n Sekunden
 - (c) bestimme RTT
 - (d) Zwischenergebnis: (n, RTT)

6.3 Technische Optimierungsmöglichkeiten

6.3.1 Eigenschaften der Übertragungsstrecke

Ein Problem beim praktischen Einsatz im Feld könnte die Verwendung von *Network Address Translation* (NAT) – genauer: *Port Address Translation* – beim Übergang zwischen Mobilfunknetz und Internet sein, falls ein Netzbetreiber nicht in der Lage ist, öffentliche IP-Adressen zu vergeben. Die Identifikationsnummer im IPv4-Header (siehe Abschnitt 3.2) könnte von den Veränderungen im IP-Header betroffen sein, was die eindeutige Zuordnung der auf Sender- und Empfängerseite beobachteten Pakete erschwert. Sollte IPv6 zum Einsatz kommen, steht zu hoffen, dass kein NAT eingesetzt wird; eine Identifikationsnummer steht jedoch nicht grundsätzlich zur Verfügung (siehe auch hierzu Abschnitt 3.2).

Falls die Fähigkeit der Beobachtung eines Paketstroms durch das LTS auf RTP-Daten beschränkt werden dürfte, ließe sich eine Identifikation der Pakete ohne Nutzung der Identifikationsnummer durch Betrachtung der RTP-Daten, beispielsweise des im RTP-Header enthaltenen Zeitstempels, erreichen. Sofern eine solche Einschränkung nicht erwünscht ist, kann eventuell eine Identifikation anhand unverändert bleibender Eigenschaften des Paketheaders erreicht werden. Vielleicht muss jedoch auf eine Lösung zurückgegriffen werden, bei der Wissen über den Aufbau der beobachteten Daten auf höherer Schicht vorausgesetzt wird.

6.3.2 Verbesserung der Übertragungstechnik

Einige Möglichkeiten der technischen Optimierung sind uns im Laufe der Tests bekannt geworden und müssen noch erprobt werden, könnten sodann aber in einer Untersuchung der Qualität durch das LTS zum Einsatz kommen:

- AMR in FFmpeg: Im Rahmen des „Google Summer of Code 2006“ [GoogleSoC] wird derzeit eine freie AMR-Implementierung erstellt, die in FFmpeg [FFmpeg] zum Einsatz kommen soll. Da die in FFmpeg zur Verfügung stehenden Codecs auch zur Nutzung mit GStreamer verfügbar gemacht werden [GstFFmpeg], könnte eine einfach einsetzbare Alternative zum vorhandenen AMR-Codec entstehen.
- Consolen-VoIP-Softphone: Es existiert eine Variante des Software-VoIP-Phones *linphone* [linphone], die ohne graphische Oberfläche verwendet werden kann. Eine Steuerung des Programms durch LTS sollte – mit oder ohne Änderung des Programmcodes – realisierbar sein, wodurch auch der Gesprächsaufbau leicht automatisierbar wäre, wenngleich die Gesprächsdaten mit *linphone* derzeit nicht AMR-codiert übertragen werden können.
- SIP/RTP auf Mobiltelefon: Im UMTS Release 5 Testbed des *Fraunhofer Institut für Offene Kommunikationssysteme* (FOKUS) [OpenIMS] existiert eine automatisiert steuerbare PoC-Clientsoftware in Versionen für Symbian Series 60 (basierend auf dem von Nokia zur Verfügung gestellten JDK, siehe auch Abschnitt 1.2.1) und J2ME. Eine Zusammenarbeit ist angedacht und sollte dazu führen, dass ein weiterer Schritt auf dem Weg zu echten Ende-zu-Ende-Tests genommen wird.

6.3.3 Mögliche Erweiterungen

Funktions- und Belastungstests für SIP sollten sich relativ leicht in das LTS einbauen lassen; offen wäre jedoch die Frage der Beurteilung der Qualität. (Siehe auch Abschnitt 4.1.)

Eine Erweiterung der Paketdatenstromanalyse (siehe Abschnitt 3) um die Erkennung der aktuellen Datenrate sollte möglich sein. Eine Ausgabe getrennt nach Menge der Nutzdaten auf verschiedenen Schichten könnte für ein besseres Verständnis der anfallenden Datenmengen sorgen.

Die Erkennung der Leerlaufzeit (siehe Abschnitte 4.3.3 und 6.2.2) könnte vollständig automatisiert und eventuell um eine Abfrage der Netzwerk-Timer ergänzt werden.

Sofern beim Kunden der Wunsch danach besteht, Ergebnisse der Qualitätsuntersuchung nicht nur in Form von Zahlen dargestellt zu bekommen, die vom Kunden selbst in Zusammenhang mit den gewählten Einstellungen gesetzt werden müssen, könnte eine umfassende Untersuchung der Abhängigkeiten – wie wir sie hauptsächlich anhand der emulierten Übertragungsstrecke durchgeführt haben – automatisiert unter Nutzung des Kundennetzes durchgeführt werden. Das Ergebnis einer solchen Untersuchung wären Maßzahlen, die besagen, wie groß die Abhängigkeit der Qualität der Sprachübertragung von beispielsweise der Paketverlustrate ist, wenn die Übertragung im zu testenden Netz des Kunden stattfindet. Für eine direkte Kommunikation zwischen zwei Endgeräten sollte ein solches Maß immer gleich sein, aber im Falle der Nutzung einer zwischengeschalteten Instanz, wie zum Beispiel eines IMS, wäre eine Aussage über die Ansprüche des IMS an die Übertragungsstrecken möglich, ohne Zugriff auf das IMS haben zu müssen.

Kapitel 7

Schluss

Zum Testen stand uns neben der zur Entwicklung genutzten Installation in den Räumen von Qosmotec kurzzeitig ein im Nürnberger *Bell Lab* des Netzwerkausrüsters *Lucent Technologies* installiertes Lab Test System samt Labor-Netzwerkinfrastruktur zur Verfügung. Leider waren die zu dem Zeitpunkt angeschlossenen Geräte ebenfalls nicht in der Lage, unseren Wünschen bezüglich der QoS-Einstellungen (siehe Abschnitt 5.3) zu entsprechen. Auch durfte das installierte LTS nicht stark verändert werden, was den Einsatz einer Auswertung der Paketlaufzeiten in Echtzeit verhinderte – immerhin konnten wir auch dort testweise VoIP-Sprachdaten übertragen und die Qualität der Sprachwiedergabe bestimmen.

7.1 Aufgeworfene Überlegungen

Im Laufe der Recherche, des Testens und des Einbaus in LTS ergaben sich einige Überlegungen, die zu weiteren Untersuchungen führen können, deren Ergebnisse wiederum Einfluss auf die Art der Bewertung einer Mobilfunkstrecke haben könnten.

7.1.1 Messbare Kenngrößen

Bisher wurden Kriterien, die das Qualitätsempfinden eines angerufenen Gesprächspartners beeinflussen, außer Acht gelassen. Neben der Qualität der Sprachübertragung könnten Geschwindigkeit, Zuverlässigkeit und Informationsübermittlung beim Rufaufbau eine Rolle spielen. Der vom Mobilfunknetz initiierte Aufbau eines PDP Contexts könnte ebenfalls einen Einfluss haben.

7.1.2 Durchführung der Tests

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 angeführt, kam die Frage auf, ob es möglich ist, die Übertragung der Sprachdaten um einen einstellbaren Faktor zu beschleunigen und trotzdem zuverlässige Aussagen über die Qualität treffen zu können. Eine Verkürzung der Wartezeit bis zu einem aussagekräftigen Testergebnis erscheint in jedem Fall wünschenswert, eine Verringerung der Belegungsdauer von Laborausrüstung ebenso.

7.1.3 Emulation der Übertragungsstrecke

Um eine detailliertere Untersuchung des Einflusses spezieller Eigenschaften einer Übertragungsstrecke auf die Qualität durchführen zu können, ist eine umfassendere Emulation der Übertragungsstrecke notwendig. So könnten Untersuchungen stattfinden, bei denen das Ergebnis von einer Korrelation bei der Verteilung der Laufzeit abhängen (siehe auch Abschnitt 5.3.1 und 5.4.3). Die Ermöglichung einer Kontrolle über die Korrelation bei Paketverlusten wäre ebenfalls realisierbar; eventuell ließe sich ein Vergleich zwischen dem Effekt des Verlusts mehrerer Pakete in Folge und dem Effekt einer großen Verzögerung mehrerer Pakete in Folge (unter Berücksichtigung der Puffergröße) herstellen. Untersuchungen in Bezug auf die Auswirkungen einer „Funkstille“ (siehe Abschnitte 4.3.4 und 5.4.4) könnten bei steuerbarer Verteilung der Verzögerung unter Umständen eine Regelmäßigkeit erkennen lassen.

Die Emulation der Beschädigung eines IP-Pakets lässt sich mit *netem* realisieren, sofern ein modernerer Linux-Kernel (2.6.16) eingesetzt wird. Andere Ergebnisse als in [Hammer03] (siehe auch Abschnitt 4.2.1) sind jedoch nicht zu erwarten. Offen ist derzeit, ob die bisher eingesetzte Lösung zum Transport der Sprachdaten (*GStreamer*, siehe Abschnitt 5.2.1) defekte Pakete verarbeitet oder dazu gebracht werden kann.

Eine Erweiterung der Sprachqualitätstests auf den Transport der Sprachdaten über IPv6 statt IPv4 sollte bei der Emulation keine großen Probleme aufwerfen, eine korrekte UDP-Prüfsumme wird dann allerdings auch bei absichtlich beschädigten Paketen erzeugt werden müssen (siehe auch Abschnitt 4.2.1).

7.1.4 Sprachdatenübertragung

Interessant zu untersuchen wäre, ob der Einsatz von ROHC (siehe Abschnitt 2.2.1) neben einer Verringerung der Datenrate zu Änderungen bei der Auswirkung einzelner Eigenschaften der Übertragungsstrecke auf die Qualität der Sprachwiedergabe führt.

Besonders interessant für das Mobilfunkumfeld dürfte die Frage sein, ob die (über QoS-Einstellungen des PDP Context dem Mobilfunknetz gegenüber angemeldete) Reduktion der Datenrate zu einer höheren Qualität führt. Unterstellt man den Funknetzbetreibern den Plan, Dienstleistungen in Abhängigkeit von QoS-Einstellungen zu tarifieren, sollte überprüfbar und idealerweise auch vorhersagbar sein, ob eine teurere Variante auch eine höhere Qualität ermöglicht.

7.1.5 Wichtung und Qualitätsbestimmung

Der mit Abstand interessanteste Teil der Arbeit, die Bestimmung der Wichtigkeit der messbaren Größen, hat auch die meisten Fragen aufgeworfen; einige der Ideen sind in Abschnitt 5.4.6 bereits genannt. Da es bisher keine derartigen umfassenden Untersuchungen gibt, ist auf dem Gebiet der Wichtung der Kenngrößen noch viel zu tun. Auch in Bezug auf die Vorhersagbarkeit der Qualität gilt es, die wenigen einzelnen Untersuchungen in ein Gesamtbild einzufügen.

7.1.6 Aufgaben der Netzbetreiber

Keiner der derzeit aktiven Mobilfunknetzbetreiber sichert die Tauglichkeit des eigenen Netzes für die Nutzung mit Voice over IP zu. Bevor eine solche Zusicherung abgegeben werden kann, muss in jedem Fall eine Möglichkeit geschaffen werden, VoIP-Sprachdaten mit geringerer Verzögerung – dafür vermutlich unter Inkaufnahme einer höheren Wahrscheinlichkeit des Paketverlusts – zu übermitteln. Es bleibt zu hoffen, dass die hierfür notwendige Unterteilung der Paketdaten in mehrere Klassen nicht anhand weicher Merkmale wie beispielsweise Portnummern stattfindet, sondern eine verschlüsselte Übertragung der Daten und eine standardkonforme Unterstützung von QoS-Einstellungen ermöglicht wird. Die im Umlauf befindlichen Endgeräte scheinen zu großen Teilen bestens dafür vorbereitet zu sein.

7.2 Was wir gelernt haben

Es war für alle Beteiligten überraschend, zu erfahren, wie detailliert und bis in wie ferne Zukunft die Entwicklung der mobilen Telefonie durchdacht ist. Es war außerordentlich erfreulich, zu sehen, dass ein offen agierendes und halbwegs offen kommunizierendes Konsortium (das 3GPP) Entscheidungen über die Technik der Zukunft aus technischen

Gesichtspunkten trifft (IPv6, IPsec, SIP, RTP) und sich nicht vorrangig Gedanken über die Gestaltung kommerzieller Angebote macht ("access independence" des IMS).

Vor der hohen Komplexität der Materie waren wir gewarnt worden, aber manchmal muss man sich halt doch erst selbst an einer Aufgabe versuchen, um sie vollständig begreifen zu können. Es erscheint im Nachhinein nicht erstaunlich, dass sich nur wenige zuverlässige Daten über die Wichtigkeit der messbaren Eigenschaften finden ließen; die hohe Anzahl von Einflussgrößen und potentielle Abhängigkeiten zwischen den Größen erschweren das Ermitteln allgemein gültiger Ergebnisse.

Es scheint eine kleine Gruppe von Forschern zu geben, deren Arbeit weiter beobachtet werden sollte: Christian Hoene (Universität Tübingen, vormals TU Berlin) und sein ehemaliger Kollege Henning Sanneck (Siemens, vormals TU Berlin), die unter anderem die Wichtigkeit einzelner Pakete beurteilen; Lingfen Sun und ihr Doktorvater Emmanuel Ifeakor (beide University of Plymouth), die sich vor allem mit der Vorhersagbarkeit der Qualität beschäftigen; und Ramjee Prasad (Aalborg University), insbesondere als qualitativ sehr hochwertige Beiträge auswählender Herausgeber.

Anhang A

Auskünfte der Mobilfunknetzbetreiber

Alle vier deutschen Mobilfunknetzbetreiber wurden bezüglich Ihrer jeweiligen Einstellung zu Voice over IP befragt. Die Schreiben bestanden aus einer in allen vier Fällen identischen Einleitung mit Angabe des Hintergrunds der Anfrage, einem kurzen Teil, der die der Presse, Vertragsbedingungen und ähnlichen Unterlagen entnehmbare Position des Unternehmens darstellte (siehe Abschnitt 1.2.1) und der konkreten Frage nach der zukünftig zu erwartenden Position.

T-Mobile Deutschland und *O₂ Germany* – die beiden Anbieter, die hätten erklären können, warum sie die Nutzung von Voice over IP kategorisch verbieten – haben die Anfrage leider nicht beantwortet.

A.1 Vodafone D2 GmbH

GESAMT SEITEN 10



Vodafone D2 GmbH · D-40543 Düsseldorf

Herrn
Marcus C. Gottwald
Chausseestrasse 56

10115 Berlin

Fax: 030 84 41 19 74

Ihr Zeichen
Ihre Nachricht vom
Unser Zeichen
Tel.: +49 (0) 2 11/5 33-
Fax: +49 (0) 2 11/5 33-
Mobil: +49 (0)
E-Mail
Datum

Nutzung von Voice-over-IP im Mobilfunknetz

Sehr geehrter Herr Gottwald,

vielen Dank für Ihr Interesse an der Vodafone D2 GmbH im Rahmen Ihrer Diplomarbeit an der Freien Universität Berlin.

Gerne möchten wir Ihnen mögliche Informationen zusenden:

Bei UMTS und bei VoIP handelt es sich um neue Technologien und Märkte. Die Einschränkung in den Tarifoptionen ist keine grundsätzliche Entscheidung gegen VoIP-Technologie, sondern nur ein rechtlicher Vorbehalt. Vielmehr beobachten wir mit sehr grossem Interesse die Entwicklung der Technologie und des Marktes.

Allein aus rechtlichen Gründen gibt es deswegen einen Vorbehalt für 2007, mit der Möglichkeit etwas ändern zu können. Das ist ein ganz normaler rechtlicher Vorbehalt auf Änderungsmöglichkeiten, wie es ihn in vielen Tarifen gibt.

Bis Mitte des Jahres 2007 wird dieser neue Markt genau analysiert und recherchiert. Erst dann können nähere Aussagen z.B. über Kooperationen getroffen werden.

Sehr geehrter Herr Gottwald, wir hoffen Ihnen mit unserem Schreiben eine kleine Hilfe für Ihre Diplomarbeit stellen zu können und wünschen Ihnen hierfür viel Erfolg.

Für weitere Fragen stehen wir Ihnen gerne zur Verfügung.

Mit freundlichen Grüßen


i.A. Anne vom Hof
Externe Kommunikation

00001191289

Vodafone D2 GmbH · Am Seestern 1 · D-40547 Düsseldorf · D-40543 Düsseldorf · Tel.: +49 (0) 2 11/5 33-0 · Fax: +49 (0) 2 11/5 33-22 00
Geschäftsführung: Friedrich Joussem (Vorsitzender) · Karl-Ludwig Diller · Hartmut Kremling · Thomas Neumann · Frank Rosenberger · Albert Wolkmüller · Achim Weusthoff
Vorsitzender des Aufsichtsrats: Julian Horn-Smith · Sitz der Gesellschaft: Düsseldorf · Bankverbindung: Deutsche Bank AG · Düsseldorf IRI 7 500 700 100 0000
Am 14.01.2007 um 14:25:00 Uhr wurde das Dokument mit dem Titel "Vodafone D2" erstellt.
+49 211 533 2154 S.10/10

A.2 E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG

Subject: Ihr Schreiben vom 17.05.2006
To: gottwald@inf.fu-berlin.de
From: Gabriele Caricato <Gabriele.Caricato@eplus.de>
Message-ID: <OF2F11072B.AE45CD2A-ONC1257176.002D8F7B-C1257176.002DD0B7@eplus.de>
Date: Mon, 22 May 2006 10:20:25 +0200

Sehr geehrter Herr Gottwald,

vielen Dank für Ihr Schreiben vom 17.05.2006 und das damit verbundene
Interesse an der
E-Plus Mobilfunk GmbH & Co. KG.

Leider müssen wir Ihnen mitteilen, dass wir Ihrer Bitte nicht nachkommen
können. Die Beantwortung
Ihrer Fragen würde zu viele Ressourcen in unserem Hause einbinden. Wir
hoffen auf Ihr Verständnis.

Mit freundlichen Grüßen

i. A. Gabriele Caricato
Pressestelle

Literatur

- [3GPP-22105] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Services and Service Capabilities*. TS 22.105, V5.2.0, Juni 2002. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/22105.htm> S. 51
- [3GPP-22228] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Service requirements for the IP Multimedia Core Network Subsystem*. TS 23.228. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/22228.htm> S. 12
- [3GPP-22945] 3GPP TSG Terminals: *Study on provisioning of fax in GSM and UMTS*. TS 22.945, V3.0.0, Oktober 1999. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/22945.htm> S. 62
- [3GPP-23060] 3GPP TSG Services and System Aspects: *General Packet Radio Service (GPRS); Service Description*. TS 23.060, V5.12.0, Dezember 2005. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23060.htm> S. 37, 38
- [3GPP-23107] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Quality of Service (QoS) concept and architecture*. TS 23.107, V5.13.0, Dezember 2004. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23107.htm> S. 37
- [3GPP-23207] 3GPP TSG Services and System Aspects: *End-to-end Quality of Service (QoS) concept and architecture*. TS 23.207, V5.10.0, September 2005. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23207.htm> S. 39
- [3GPP-23221] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Architectural requirements (Release 5)*. TS 23.221, Version 5.11.0, 27. September 2004. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23221.htm> S. 11
- [3GPP-23228] 3GPP TSG Services and System Aspects: *IP Multimedia Subsystem (IMS)*. TS 23.228. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/23228.htm> S. 11, 13

- [3GPP-24008] 3GPP TSG Core Network: *Mobile radio interface layer 3 specification*. TS 24.008. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/24008.htm> S. 53
- [3GPP-26101] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Adaptive Multi-Rate (AMR) speech codec frame structure*. TS 26.101, V5.0.0, Juni 2002. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/26101.htm> S. 26
- [3GPP-26104] 3GPP TSG Services and System Aspects: *ANSI-C code for the floating-point Adaptive Multi-Rate (AMR) speech codec*. TS 26.104, V5.4.0, März 2004. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/26104.htm> S. 60
- [3GPP-27007] 3GPP TSG Terminals: *AT command set for User Equipment (UE)*. TS 27.007, V5.6.0, März 2005. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/27007.htm> S. 36, 37
- [3GPP-33102] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Security Architecture*. TS 33.102, V5.7.0, Dezember 2005. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33102.htm> S. 34
- [3GPP-33203] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Access security for IP-based services*. TS 33.203. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33203.htm> S. 34
- [3GPP-33210] 3GPP TSG Services and System Aspects: *Network Domain Security (NDS); IP network layer security* TS 33.210, V5.5.0, September 2003. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/33210.htm> S. 34
- [3GPP-SIP] 3GPP TSG Core Network and Terminals: *Internet Protocol (IP) multimedia call control protocol based on Session Initiation Protocol (SIP) and Session Description Protocol (SDP)*. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/24229.htm> S. 22
- [BasetSchu04] Salman A. Baset, Henning Schulzrinne: *An Analysis of the Skype Peer-to-Peer Internet Telephony Protocol*. 15. September 2004. <http://www.cs.columbia.edu/~library/TR-repository/reports/reports-2004/cucs-039-04.pdf> S. 39, 40
- [Bates02] Juliet Bates: *Optimizing Voice in ATM/IP Mobile Networks*. McGraw-Hill, 2002; ISBN 0-07-139594-6 S. 73
- [BiondiDescl06] Philippe Biondi, Fabrice Desclaux, EADS Corporate Research Center: *Silver Needle in the Skype*. Handout zum Vortrag auf der *BlackHat*

	<i>Europe 2006</i> . http://www.secdev.org/conf/skype_BHEU06.handout.pdf	S. 39
[CiscoCodecs]	Cisco Systems, Inc.: <i>Understanding Codecs: Complexity, Hardware Support, MOS, and Negotiation</i> . http://www.cisco.com/warp/public/788/voip/codec_complexity.html	S. 30
[CiscoH323]	Cisco Systems, Inc.: <i>H.323 Call Setup from H.323 Network to Circuit Switched Network</i> . Document ID: 79600, 2005. http://www.cisco.com/univercd/illus/7/00/79600.jpg in http://www.cisco.com/en/US/products/hw/gatecont/ps514/products_administration_guide_chapter09186a00801e0e6e.html	S. 25
[CiscoVoiceQual]	Cisco Systems, Inc.: <i>Voice Over IP - Per Call Bandwidth Consumption [Voice Quality]</i> . Document ID: 7934, 2. Februar 2006. http://www.cisco.com/en/US/tech/tk652/tk698/technologies_tech_note09186a0080094ae2.shtml	S. 30
[DixitPrasad03]	Sudhir Dixit, Ramjee Prasad (ed.): <i>Wireless IP and Building the Mobile Internet</i> . Artech House, Boston, 2003; ISBN 1-58053-354-X	S. 59, 72
[DraftInfo]	J. Rosenberg: <i>The Session Initiation Protocol (SIP) INFO Method Considered Harmful</i> . Internet Draft <i>draft-rosenberg-sip-info-harmful-00</i> (expired), Dezember 2002.	S. 32
[DraftKPML]	E. Burger, M. Dolly: <i>A Session Initiation Protocol (SIP) Event Package for Key Press Stimulus (KPML)</i> . Internet Draft <i>draft-ietf-sipping-kpml-07</i> (active), Dezember 2004.	S. 32
[DraftRocco]	L.E. Jonsson et al.: <i>Robust Checksum-based header compression</i> . Internet Draft <i>draft-ietf-rohc-rtp-rocco-0[12]</i> (replaced), 2000/2001.	S. 73
[dummynet]	http://www.dummynet.com	S. 66
[eBaySkype]	eBay Inc.: <i>eBay to Acquire Skype</i> . Pressemitteilung, 12. September 2005. http://investor.ebay.com/downloads/eBay_PressRelease.pdf in http://www.heise.de/newsticker/meldung/63807	S. 39
[FFmpeg]	http://ffmpeg.org	S. 80

- [G107ETSI] European Telecommunications Standards Institute – ETSI: *The E-model*. <http://portal.etsi.org/stq/presentations/emodel.asp> ... S. 58
- [GMS-0314] 3GPP TSG Core Network and Terminals: *Support of Dual Tone Multi-Frequency Signalling (DTMF) via the GSM System*. TS 03.14. <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/html-info/0314.htm> S. 32
- [GoogleSoC] <http://code.google.com/soc/> S. 80
- [GStreamer] <http://gstreamer.freedesktop.org> S. 59
- [GstFFmpeg] <http://gstreamer.freedesktop.org/modules/gst-ffmpeg.html>
..... S. 80
- [H323vsSIP] VoIP Foro: *SIP vs H.323*. <http://www.en.voipforo.com/H323vsSIP.php> S. 22
- [Hammer03] Florian Hammer, Peter Reichl, Tomas Nordström, Gernot Kubin: *Corrupted Speech Data Considered Useful*. <http://userver.ftw.at/~reichl/publications/AQS03.pdf> April 2003. S. 28, 52, 84
- [HeiseForr] heise online: *Studie: VoIP wird Telekommunikationsmarkt nicht revolutionieren*. Meldung, 13. Oktober 2005. <http://www.heise.de/newsticker/meldung/64899> S. 7
- [HeiseUeberw] Tim Gorgass, Urs Mansmann: *Lauscher an der Wand*. Artikel in Zeitschrift *c't* Heft 9, April 2006; ISSN 0724-8679 S. 32
- [Hoene05] Christian Hoene: *Internet Telephony over Wireless Links*. Dissertation, Technische Universität Berlin, Dezember 2005. http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2006/1201/pdf/hoene_christian.pdf .. S. 59, 61
- [IETF-SIP] The Internet Engineering Task Force: *Working group "sip"*. <http://www.ietf.org/html.charters/sip-charter.html> S. 22
- [ITU-H235.0] ITU Telecommunication Standardization Sector: *H.323 security: Framework for security in H series (H.323 and other H.245-based) multimedia systems*. <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.235.0> S. 33
- [ITU-H323] ITU Telecommunication Standardization Sector: *Packet-based multimedia communications systems*. <http://www.itu.int/rec/T-REC-H.323> S. 22, 24
- [ITU-MOS] ITU Telecommunication Standardization Sector: *Methods for subjective determination of transmission quality*. August 1996. S. 57

[ITU-PESQ]	ITU Telecommunication Standardization Sector: <i>Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs</i> . Februar 2001. S. 57
[ITU-P862.1]	ITU Telecommunication Standardization Sector: <i>Mapping function for transforming P.862 raw result scores to MOS-LQO</i> . November 2003. S. 58
[ITU-P862.3]	ITU Telecommunication Standardization Sector: <i>Application guide for objective quality measurement based on Recommendations P.862, P.862.1 and P.862.2</i> . November 2005. S. 58
[linphone]	http://www.linphone.org S. 80
[Liu00]	George Lui et al.: <i>Experimental Field Trial Results of Voice-over-IP over WCDMA Links in 7th International Workshop on Mobile Multimedia Communications (MoMuC2000)</i> . Tokyo, Oktober 2000. S. 73
[MarksGonz03]	Stuart K. Marks, Ruben Gonzalez: <i>Analysis of codecs for audio streaming over the mobile internet in Proceedings of the 7th IASTED International Conference, Internet and Multimedia Systems and Applications</i> . Honolulu, 2003. S. 73
[Motorola]	Motorola, Inc.: <i>Nextel and Motorola Announce Innovation of Direct Talk, the First Off-Network Walkie Talkie Feature Integrated with a Mobile Phone</i> . Pressemitteilung, 14. Dezember 2004. http://www.motorola.com/mediacenter/news/detail.jsp?globalObjectId=4943_4231_23 S. 13
[netem]	http://linux-net.osdl.org/index.php/Netem S. 66
[NISTNet]	http://snad.ncsl.nist.gov/nistnet/ S. 66
[NokiaPoC]	Nokia: <i>Nokia launches PoC Enterprise Market Consultancy service to support operators' push to talk business</i> . Pressemitteilung, 9. Juni 2004. http://press.nokia.com/PR/200406/948591_5.html ... S. 14
[NokiaPoC2]	Nokia: <i>Interview zum Thema Push-to-talk</i> . Presstext, 2004. http://www.nokia.de/de/nokia/presseloft/specials/pushtotalk/144786.html S. 14

[NokiaSIP]	Nokia: <i>Nokia enables richer, dynamic mobile communications</i> . Pressemitteilung, 14. Juni 2004. http://press.nokia.com/PR/200406/948868_5.html S. 11
[OMAPoC]	Open Mobile Alliance: <i>Push to talk Over Cellular V1.0</i> . http://www.openmobilealliance.org/release_program/poc-v1_0.html ... S. 13
[OpenH323]	The OpenH323 Project: <i>H.323 Standards</i> . Stand 12. Mai 2004. http://www.openh323.org/standards.html S. 24
[OpenIMS]	Fraunhofer Institut für Offene Kommunikationssysteme: <i>Open IMS @ FOKUS</i> . http://www.fokus.fraunhofer.de/ims/ S. 80
[Opticom]	Opticom GmbH: <i>User Manuel PESQ OEM</i> . Version 1.7. S. 58
[PESQ]	Opticom GmbH: <i>PESQ</i> . 2006. http://www.opticom.de/technology/pesq.html S. 58
[PSQM]	Opticom GmbH: <i>PSQM, PSQM+</i> . 2006. http://www.opticom.de/technology/psqm.html S. 57
[Qiao04]	Zizhi Qiao, Lingfen Sun, Nicolai Heilemann, Emmanuel Ifeachor: <i>A New Method for VoIP Quality of Service Control Based on Combined Adaptive Sender Rate and Priority Marking</i> . Proceedings of IEEE International Conference on Communications (IEEE ICC 2004), Juni 2004. http://www.comsoc.org/tech_focus/pdfs/2005/jan/1473qiao.pdf S. 29
[Qosmotec]	Qosmotec Software Solutions GmbH. http://www.qosmotec.com S. 16
[QosmLTS]	Qosmotec Software Solutions GmbH: <i>Lab Test System (LTS)</i> . http://www.qosmotec.com/lab_test_system.shtml S. 16
[Räisänen03]	Vilho Räisänen: <i>End-to-end IP Service Quality and Mobility</i> . Vorlesung an der Helsinki University of Technology, SS2003, Teil 6. http://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38215/k03/Luennot/lec6.pdf S. 38
[Rein03]	S. Rein, F.H.P. Fitzek, M. Reisslein: <i>Voice Quality Evaluation for Wireless Transmission with ROHC</i> . 2003. Abstract: http://www.actapress.com/Abstract.aspx?paperId=14754 S. 26
[RFC791]	Jon Postel et al.: <i>Internet Protocol, Protocol Specification</i> . RFC 791, September 1981. S. 8, 35, 44, 52

[RFC974]	Craig Partridge: <i>Mail routing and the domain system</i> . RFC 974, Januar 1986. S. 22
[RFC1123]	R. Braden, Editor: <i>Requirements for Internet Hosts – Application and Support</i> . RFC 1123, Oktober 1989. S. 22
[RFC1144]	V. Jacobson: <i>Compressing TCP/IP Headers for Low-Speed Serial Links</i> . RFC 1144, Februar 1990. S. 26
[RFC1305]	David L. Mills: <i>Network Time Protocol (Version 3)</i> . RFC 1305, März 1992. S. 44
[RFC1633]	R. Braden, D. Clark, S. Shenker: <i>Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview</i> . RFC 1633, Juni 1994. S. 36
[RFC1889]	H. Schulzrinne, S. Casner, R. Frederick, V. Jacobson: <i>RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications</i> . RFC 1889, Januar 1996. S. 23, 24, 48
[RFC2205]	R. Braden et al.: <i>Resource ReSerVation Protocol (RSVP) – Version 1 Functional Specification</i> . RFC 2205, September 1997. S. 36
[RFC2212]	S. Shenker et al.: <i>Specification of Guaranteed Quality of Service</i> . RFC 2212, September 1997. S. 48
[RFC2246]	T. Dierks, C. Allen: <i>The The TLS Protocol Version 1.0</i> . RFC 2246, Januar 1999. S. 33
[RFC2327]	M. Handley, V. Jacobson: <i>SDP: Session Description Protocol</i> . RFC 2327, April 1998. S. 23
[RFC2406]	S. Kent, R. Atkinson: <i>IP Encapsulating Security Payload (ESP)</i> . RFC 2406, November 1998. S. 34
[RFC2460]	S. Deering, R. Hinden: <i>Internet Protocol, Version 6 (IPv6) Specification</i> . RFC 2460, Dezember 1998. S. 11, 44, 52
[RFC2474]	K. Nichols et al.: <i>Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers</i> . RFC 2474, Dezember 1998. S. 35
[RFC2508]	S. Casner, V. Jacobson: <i>Compressing IP/UDP/RTP Headers for Low-Speed Serial Links</i> . RFC 2508, Februar 1999. S. 73

[RFC2616]	R. Fielding et al.: <i>Hypertext Transfer Protocol – HTTP/1.1</i> . RFC 2616, Juni 1999.	S. 23
[RFC2833]	H. Schulzrinne, S. Petrack: <i>RTP Payload for DTMF Digits, Telephony Tones and Telephony Signals</i> . RFC 2833, Mai 2000.	S. 31
[RFC3095]	C. Bormann (ed.): <i>RObust Header Compression (ROHC): Framework and four profiles: RTP, UDP, ESP, and uncompressed</i> . RFC 3095, Juli 2001.	S. 26, 73
[RFC3175]	F. Baker et al.: <i>Aggregation of RSVP for IPv4 and IPv6 Reservations</i> . RFC 3175, September 2001.	S. 36
[RFC3261]	J. Rosenberg, H. Schulzrinne et al.: <i>SIP: Session Initiation Protocol</i> . RFC 3261, Juni 2002.	S. 22, 23, 24
[RFC3267]	J. Sjöberg et al.: <i>Real-Time Transport Protocol (RTP) Payload Format and File Storage Format for the Adaptive Multi-Rate (AMR) and Adaptive Multi-Rate Wideband (AMR-WB) Audio Codecs</i> . RFC 3267, Juni 2002.	S. 26
[RFC3697]	J. Rajahalme et al.: <i>IPv6 Flow Label Specification</i> . RFC 3697, März 2004.	S. 35
[RFC3711]	M. Baugher et al.: <i>The Secure Real-time Transport Protocol (SRTP)</i> . RFC 3711, März 2004.	S. 33
[RFC4019]	G. Pelletier: <i>RObust Header Compression (ROHC): Profiles for User Datagram Protocol (UDP) Lite</i> . RFC 4019, April 2005.	S. 28
[RFC4346]	T. Dierks, E. Rescorla: <i>The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.1</i> . RFC 4346, April 2006.	S. 33
[RFC4347]	E. Rescorla, N. Modadugu: <i>Datagram Transport Layer Security</i> . RFC 4347, April 2006.	S. 33
[Schiller03]	Jochen Schiller: <i>Mobilkommunikation</i> . Zweite, überarbeitete Auflage. Pearson Education, München, Mai 2003; ISBN 3-8273-7060-4	S. 22, 28, 34
[sipsak]	http://sipsak.org	S. 49
[SIPp]	http://sipp.sourceforge.net	S. 49
[SkypeFAQ]	Skype Ltd.: <i>Skype Technical FAQ</i> . http://www.skype.com/help/faq/technical.html	S. 40

- [Sunlfeachor] Lingfen Sun, Emmanuel Ifeachor: *New Methods for Voice Quality Evaluation for IP Networks*. 2003? http://www.tech.plym.ac.uk/spmc/people/lfsun/publications/ITC_18_LSun.pdf S. 67
- [tcpdump] <http://www.tcpdump.org> S. 45
- [Telia] 3GPP / Telia: *Security considerations for IMS access independence*. http://www.3gpp.org/ftp/tsg_sa/WG3_Security/TSGS3_20_Sydney/Docs/PDF/S3-010468.pdf S. 12
- [T-Mobile] T-Mobile Deutschland GmbH: *FAQs zu Push to Talk*. http://www.t-mobile.de/business/1,1793,14463-_,00.html#lang S. 14
- [UlsetStafsnes] Trond Ulseth, Finn Stafsnes: *VoIP speech quality – Better than PSTN?* Artikel in *Telenor Teletronikk*, 1/2006. http://www.telenor.com/teletronikk/volumes/pdf/1.2006/Page_119-129.pdf S. 30
- [Vodafone] Vodafone D2 GmbH: *Vodafone erhöht das Inklusivvolumen für die mobile Internetnutzung mit der UMTS-Datenkarte deutlich*. Pressemitteilung, 7. Juli 2005. http://www.vodafone.de/unternehmen/presse/6613_74139.html in <http://www.heise.de/newsticker/meldung/61476> S. 10
- [VoIPForeo] Volp Foro: *Codecs*. 2006. <http://www.en.voipforo.com/codec/codecs.php> S. 30
- [Walke02] Bernhard Walke, Marc Peter Althoff, Peter Seidenberg: *UMTS – Ein Kurs*. Zweite überarbeitete Auflage. J. Schlembach Fachverlag, Weil der Stadt, 2002; ISBN 3-935340-22-2 S. 11
- [WikipCodecs] Wikipedia Deutschland: *Codecs*. <http://de.wikipedia.org/wiki/Codec#Sprachcodecs> S. 30
- [WikipEnCodecs] Wikipedia: *Comparison of audio codecs*. http://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_audio_codecs S. 30
- [Zimmerm] Kate Greene: Interview mit Phil Zimmermann, „*Verschlüsselung ist nicht nur Schwarz und Weiß*.“ *Technology Review*, 9. Juni 2006. <http://www.heise.de/tr/artikel/74044> S. 33

Abbildungsverzeichnis

1.1	Varianten des Datenflusses bei VoIP	8
1.2	Testkonfiguration im <i>Lab Test System</i> von Qosmotec	17
1.3	Schematischer Aufbau des LTS und Datenfluss	18
1.4	Qosmotecs LTS mit AIS und Mobilfunknetzkomponenten	19
2.1	Ablauf einer SIP-gesteuerten Kommunikation	24
2.2	Ablauf eines Gesprächsaufbaus unter Verwendung von in H.323 referenzierten Standards	25
2.3	Typisches Paket mit IPv4-, UDP- und RTP-Header sowie AMR-RTP-Payload	27
3.1	Feldtest-Setup mit ortsunabhängigem Mobile Control Server	46
4.1	Round-Trip Time des ersten Pakets nach einer Leerlaufzeit	54
5.1	Umrechnung von PESQ (P.862) nach MOS (P.800)	58
5.2	Qualität der Sprachübertragung bei unterschiedlicher Anzahl Frames pro Paket	61
5.3	Verteilung der Laufzeit bei Standardeinstellungen	63
5.4	Verteilung der Laufzeit bei Datenrate bis 32 kB/s	64
5.5	Verteilung der Laufzeit bei Datenrate bis 32 kB/s mit <i>target delay</i> von 1ms	65
5.6	Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Laufzeit	67
5.7	Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Paketverlustrate	68
5.8	Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der Puffergröße und der Schwankung der Paketlaufzeit	70
5.9	Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der größten Lücke (1/2)	71
5.10	Qualität der Sprachübertragung in Abhängigkeit von der größten Lücke (2/2)	71

Tabellenverzeichnis

2.1	Auswahl verbreiteter Sprachcodes und ihre Eigenschaften	30
5.1	MOS und PESQ-Werte ausgewählter Sprachcodecs	59

Stichwortverzeichnis

Abtastrate	28	Dual-tone multi-frequency <i>siehe</i> DTMF	
AMR	26, 53, 59, 64, 80	dummynet	66
AT-Befehl	36	E-Model	58
ATM	36	E-Plus	63
Authentifikation	12	E-Plus Mobilfunk	10, 89
Base Transceiver Station <i>siehe</i> BTS		E-Plus Service	10, 39
Bell Lab	83	eBay	39
BTS	19	Echo	51
CDMA	16, 55	EDGE	16
Circuit Switched Data <i>siehe</i> CSD		ENUM	33
Codec	28	ESP	34
Code Division Multiple Access <i>siehe</i> CDMA		Fax	31, 62
Coder	50	Festnetz	7
Compressed RTP <i>siehe</i> CRTP		FFmpeg	80
CRTP	73	Filter	38
CSD	9, 22	Flatrate	9, 39
D-AMPS	12	FOKUS	80
Decoder	28, 50	Fragment	44
DECT	7	Frame	29, 45
Dienstgüte	34	Fraunhofer Institut für Offene Kommunikationssysteme <i>siehe</i> FOKUS	
Differentiated Services <i>siehe</i> DiffServ		FreeBSD	66
Differentiated Services Code Point <i>siehe</i> DSCP		G.107	58
Differentiated Services Field <i>siehe</i> DS Field		Gateway GPRS Support Node <i>siehe</i> GGSN	
DiffServ	35	General Packet Radio Service <i>siehe</i> GPRS	
DSCP	35	Gesprächsaufbau	21
DS Field	35	GGSN	37
DTMF	31, 62	Global System for Mobile Communications <i>siehe</i> GSM	

Google Summer of Code	80	Kanalbündelung	9
GPRS	8, 14	KaZaA	39
GSM	9, 12	Keypad Markup Language	32
GSM-BOS	16	Key Press Markup Language <i>siehe</i> KPML	
GSM-R	16	KPML	32
GStreamer	59, 80, 84	Lab Test System <i>siehe</i> LTS	
H.235	33	Laufzeitschwankung	42
H.323	22, 23	libamrnb	60
Handover	55	linphone	80
High Speed Circuit Switched Data <i>siehe</i> HSCSD		LTS	16, 58, 83
HSCSD	9	Lucent Technologies	83
HSDPA	46	Luftschnittstelle	28, 37, 53
iDEN	12, 13	maketable	68
Identifikation	12	Mean Opinion Score <i>siehe</i> MOS	
iLBC	40	Mehrfrequenzwahlverfahren <i>siehe</i> MFV	
IMS	11–13, 39, 52, 81	MFV	31
Instant Messaging	10	MMS	16
Integrated Services <i>siehe</i> IntServ		Mobile Services Switching Center <i>siehe</i> MSC	
Integrität	32	MOS	57
Internet	7	Motorola	13
IntServ	36	MSC	22
ipfw	66	NAT	79
IP Multimedia Services Identity Module <i>siehe</i> ISIM		netem	66, 84
iproute2	66	Network Address Translation <i>siehe</i> NAT	
IPsec	34, 86	Nichtabstreitbarkeit	32
IPv4	8, 35, 44, 52, 53, 79	NIST Net	66
IPv6	11, 35, 52, 79, 84	Node-B	19
IPv6 Flow Label	35	Nokia	11, 13
IPv6 Traffic Class	35	NTP	44, 63
iSAC	40	O ₂	10, 63, 87
ISIM	12		
Jitter	26, 42, 48		

OMA	13	Robust Header Compression <i>siehe</i>	
Open Mobile Alliance <i>siehe</i> OMA		ROHC	
P-CSCF	34, 39	ROCCO	73
PAQM	57	ROHC	26, 29, 84
PCF	39	Round-Trip Time <i>siehe</i> RTT	
PDC	12	RSVP	36
PDP Address	38	RTCP	24, 33
Perceptual Audio Quality Measure		RTP .	14, 23, 24, 31, 33, 53, 59
<i>siehe</i> PAQM		RTP Control Protocol <i>siehe</i>	
Perceptual Evaluation of Speech		RTCP	
Quality <i>siehe</i> PESQ		RTT	53
Perceptual Speech Quality		Sampling-Rate	28
Measure <i>siehe</i> PSQM		Schwankung	48
PESQ	57, 66	SDP	23
ping	48	Secure Real-time Transport	
PoC	13	Protocol <i>siehe</i> SRTP	
Port Address Translation	79	Series 60 <i>siehe</i> Symbian	
Proxy	22, 33	Session Description Protocol <i>siehe</i>	
PSQM	57	SDP	
PTT	13, 51	Session Initiation Protocol <i>siehe</i>	
Push-to-talk <i>siehe</i> PTT		SIP	
Push-to-talk over Cellular <i>siehe</i>		Sicherheit	32
PoC		Siemens	33, 86
qdisc	66	Signalisierung	21
QoS	34, 49, 63, 85	SIM-Karte	12
Qosmotec	15	SIP 11, 14, 22, 23, 31, 32, 49, 81	
Quality of Service <i>siehe</i> QoS		SIP Event	32
queueing discipline <i>siehe</i> qdisc		SIP INFO	31
Real-time Transport Protocol		SIPp	49
<i>siehe</i> RTP		sipsak	49
Release 5	11, 12, 34	Skype	10, 22, 39
Release 6	12, 34	SMS	16
Release 99	12, 22	Soft Handover	56
Resource Reservation Protocol		SRTP	33
<i>siehe</i> RSVP		SSL	32
		Symbian	11, 80

T-Mobile	10, 13, 87	Universal Mobile Telecommunications System	<i>siehe</i> UMTS
tcpdump	45	Unlicensed Mobile Access <i>siehe</i> UMA	
Terrestrial Trunked Radio <i>siehe</i> TETRA		User Services Identity Module <i>siehe</i> USIM	
TETRA	9	USIM	12
TFT	38	Van Jacobson	26
TLS	32	Verfügbarkeit	32
TOS	35	Vermittlung	21
Traffic Channel	55	Vertraulichkeit	32
Traffic Flow Template <i>siehe</i> TFT		Video	22
Type of service <i>siehe</i> TOS		Vodafone	10, 63, 88
UDP	53	Voice over IP <i>siehe</i> VoIP	
UDP-Lite	28, 29	VoIP	7
UICC	12	WLAN	7, 12
UMA	11	X.509	33
UMTS	11, 16	Zfone	33
UMTS Integrated Circuit Card <i>siehe</i> UICC			

\$Id: mobile-voip-kpis.tex 140 2006-07-26 14:04:41Z mcg \$