

QoS/QoE-Modelle für den Dienst Voice over IP (VoIP)

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Fachbereich Informatik

der Universität Hamburg

vorgelegt von Stefan Paulsen

Hamburg, 2015

Datum der Disputation: 27.04.2016

Gutachter der Dissertation: Prof. Dr.-Ing. Tadeus Uhl
Prof. Dr. rer. nat. Bernd E. Wolfinger
Prof. Dr. Joachim Charzinski

Vorveröffentlichungen

D. Christiansen, S. Paulsen, and T. Uhl, "EIP-Modell für den VoIP-Dienst", Patent DE102010044727 B4, Mai 15, 2014.

K. Nowicki, S. Paulsen, and T. Uhl, "Influence of the Jitter Buffer on the Quality of Service VoIP", in *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT)*, Budapest, 2011, pp. 1-5.

K. Nowicki, S. Paulsen, and T. Uhl, "New Tool for Examining QoS in the VToIP Service", *Journal of Telecommunications and Information Technology*, no. 1, p. 1652, 2014.

S. Paulsen and T. Uhl, "Adjustments for QoS of VoIP in the E-Model", in *World Telecommunications Congress (WTC)*, Wien, 2010, pp. 69-74.

S. Paulsen and T. Uhl, "Das neue, parametrisierte A-Modell für QoS beim Dienst VoIP", *PIK - Praxis Informationsverarbeitung und Kommunikation*, vol. 34, no. 1, pp. 23-30, 2011.

S. Paulsen and T. Uhl, "Numerisches Tool zur Untersuchung der QoS bei VoIP", in *MMBnet - Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen*, Hamburg, 2013, pp. 85-90.

S. Paulsen and T. Uhl, "PESQ-Algorithm in the Narrowband and Wideband VoIP Environment: Comparison Study", in *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki (KSTiT)*, Breslau, 2010, pp. 1288-1298.

S. Paulsen and T. Uhl, "Quantifying the Suitability of Reference Signals for the PESQ Algorithm", in *Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ)*, Athen, 2010, pp. 110-115.

S. Paulsen and T. Uhl, "The Codec G.711.1 in a VoIP Environment", in *1st European Teletraffic Seminar (ETS)*, Posen, 2011, pp. 93-97.

S. Paulsen and T. Uhl, "The new, parametrised VS Model for Determining the Quality of Video Streams in the Video-telephony Service", in *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki (KSTiT)*, Warschau, 2012, pp. 1155-1166.

S. Paulsen and T. Uhl, "Umgang mit Verzögerungen in QoS-Messmethoden beim Dienst VoIP", in *MMBnet - Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen*, Hamburg, 2011, pp. 61-66.

Zusammenfassung

Klassische leitungsvermittelnde Telefonanschlüsse wurden in den letzten Jahren immer stärker von den auf paketvermittelnden Netzen basierenden Voice over IP (VoIP)-Diensten verdrängt. Die parallele Datenübertragung unterschiedlicher Dienste über solche Netzwerke führt allerdings zu erhöhten Anforderungen hinsichtlich der Dienstgüte bzw. Quality of Service (QoS) bei der Übermittlung der Sprachpakete. Diese Arbeit setzt sich ausführlich mit den entsprechenden Beeinträchtigungsparametern und deren Einfluss auf die Sprachqualität während einer VoIP-Verbindung auseinander. Bestehende QoS-Bewertungsmethoden werden klassifiziert und mittels eines neu entwickelten Untersuchungstools bezüglich ihrer Vor- und Nachteile analysiert. Dieses Tool dient außerdem der Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Referenzsignale auf die Beurteilungen der einzelnen signalbasierten QoS-Bewertungstechniken. Zu diesem Zweck wird sowohl der inhaltliche Aufbau als auch das eingesetzte Frequenzspektrum dieser Signale variiert und analysiert. Ein Vergleich zwischen den QoS-Werten des parameterbasierten E-Modells und des signalbasierten PESQ-Algorithmus zeigt zum Teil erhebliche Diskrepanzen. Bei dem im Rahmen dieser Arbeit vorgestellten EIP-Modell handelt es sich um eine für IP-Umgebungen angepasste Version des E-Modells. Es kombiniert eine hohe Genauigkeit bei der Bestimmung der VoIP-Dienstgüte mit den Vorteilen einer parameterbasierten Methode. Die Erkenntnisse, die während der Entwicklung dieser Methode gewonnen wurden, führten zu der Herleitung des A-Modells, das eine eigenständige parameterbasierende Bewertungsmethode darstellt. Am Beispiel einer konkreten Integration beider Methoden in ein bestehendes Messsystem wird zudem deren Tauglichkeit bewiesen. Eine dritte neu entwickelte parameterbasierte QoS-Bewertungsmethode ist das MP3-Modell. Es ermöglicht die Beurteilung eines auf dem MP3-Codec basierenden Audio-Streaming-Dienstes. Auch hier zeigt sich eine hohe Übereinstimmung zwischen den mittels des MP3-Modells und den signalbasierten PESQ/POLQA-Algorithmen generierten QoS-Werten. Die abschließende Studie befasst sich mit dem Jitterbuffer sowie dem Einfluss seiner Dimensionierung und unterschiedlicher Implementierungsarten auf die Dienstgüte. Dabei handelt es sich um einen Puffer, der eingehenden Datenverkehr zwischenspeichert, um so ungleichmäßigen bzw. fehlerhaften Datenfluss auszugleichen. Die im Rahmen dieser Dissertation erarbeiteten parametrisierten QoS-Modelle für den VoIP-Dienst stellen eine vorteilhafte Ergänzung der existierenden QoS-Messtechniken dar.

Abstract

In recent years conventional circuit-switching telephone connections have become steadily superseded by Voice over IP (VoIP) services based on packet-switching networks. Of course, the parallel data transmission of different services in such networks places a high demand on quality of service (QoS), especially when it comes to transferring speech packets. This dissertation deals in depth with the all impairment parameters involved and their influence on the voice quality of any VoIP connection. A newly developed evaluation tool has been used to categorize and analyze strengths and weaknesses, advantages and disadvantages of existing QoS evaluation methods. The tool also provides a means to examine the influence of different reference signals on appraisal of the various signal-based QoS evaluation methods. To this end both the content structure and the frequency spectrum used by these signals have been varied and analyzed. A comparison of the QoS values provided by the parameter-based E model and the signal-based PESQ algorithm has revealed significant discrepancies. The EIP model introduced in this work is a version of the E model adapted for use in IP environments. It combines the advantages of a parameter-based method with a high degree of accuracy in determining the QoS of a VoIP service. The insights gained during the development of this method led to the development of the A model that represents an independent parameter-based evaluation method. The suitability of both methods is demonstrated by examples of their actual implementation in an existing measurement system. The MP3 model is a third, newly developed parameter-based QoS evaluation method. It allows the evaluation of audio streaming services that use the MP3 codec. Here again, the QoS values delivered by the MP3 model show a high degree of concurrence with the values generated by signal-based PESQ/POLQA algorithms. The final study addresses the jitter buffer, and shows what influence its dimensioning and different methods of its implementation can have on the quality of service. Such a buffer caches the incoming data communication to compensate unbalanced and faulty traffic. The parameter-based QoS evaluation methods for VoIP services developed in the course of this dissertation are a highly beneficial supplement to the existing methods.

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt.....	1
2	Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit	7
3	VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme	15
3.1	Begriffe	15
3.2	Anwendungsgebiete.....	17
3.3	VoIP-Systeme	18
4	Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen	21
4.1	Kommunikationsabläufe bei H.323	22
4.2	Kommunikationsabläufe bei SIP	30
5	Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP	37
5.1	IEEE 802.1p/Q.....	38
5.2	Multi-Protocol Label Switching	39
5.3	Differentiated Services	41
5.4	Integrated Services / RSVP	43
5.5	Error Concealment.....	46
6	Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP	51
6.1	Codecs	53
6.2	QoS-Beeinträchtigungsparameter in VoIP-Umgebungen	54
6.2.1	Verzögerungen	54
6.2.2	Jitter	55
6.2.3	Paketverluste.....	56
6.2.4	Bitfehler	59
7	QoS-Bewertungsmethoden	61
7.1	Klassifizierung von QoS-Bewertungsmethoden	61
7.2	Gängige QoS-Bewertungsmethoden	64
7.2.1	Der PESQ-Algorithmus.....	64
7.2.2	Der POLQA-Algorithmus	66
7.2.3	Das E-Modell.....	68
7.2.4	VQmon	73
8	Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP	79
8.1	Funktionsweise	79
8.2	Bedienoberfläche	80
9	Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus.....	85
9.1	Anforderungen an die Referenzsignale	85
9.2	Gegenüberstellung verschiedener Referenzsignale	86

10	Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich	95
10.1	Der Codec G.711.1	95
10.2	Die Analyseumgebung	96
10.3	Die Ergebnisse	97
11	Das EIP-Modell	103
11.1	Anpassungsschritte	103
11.2	Vergleichsstudie	107
11.2.1	Numerische Umgebung	107
11.2.2	Reale IP-Umgebung	108
11.3	Das EIP-Modell in der Praxis	111
12	Das A-Modell (Audio-Modell)	113
12.1	Formulierung des A-Modells	113
12.2	Vergleichsstudie	121
12.3	Verzögerungen	123
12.3.1	Verzögerungen im PESQ-Algorithmus	123
12.3.2	Verzögerungen im EIP-Modell	124
12.3.3	Verzögerungen im A-Modell	126
12.4	Das A-Modell in der Praxis	129
13	Das MP3-Modell	131
13.1	Der MP3-Codec	131
13.2	Untersuchungsumgebung und -ergebnisse	132
13.3	Formulierung des MP3-Modells	135
13.4	Vergleichsstudie	140
14	Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP	145
14.1	Arten von Jitterbuffer	145
14.2	Vergleichsstudie und Ergebnisse	146
14.3	Hinweis für die Praxis	150
15	Integration der neuen QoS-Modelle in ein Messsystem	153
15.1	Funktionsumfang des Messsystems	153
15.2	Implementierung des EIP- und A-Modells	155
16	Zusammenfassung und Ausblick	157
17	Literaturverzeichnis	161

Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1: Das ISO/OSI-Referenzmodell inkl. einiger ausgesuchter Protokolle.....	3
Tab. 2.1: Rechtsrahmen für die QoS-Überwachung und technische Implementierungen von Messsystemen im Zusammenhang mit den Internetzugängen von Endverbrauchern in den CEPT-Mitgliedsstaaten	13
Tab. 3.1: Übersicht und Vergleich einiger ausgewählter VoIP-Systeme.....	19
Tab. 4.1: H.323-Protokollfamilie	24
Tab. 4.2: SIP-Protokollfamilie	30
Tab. 4.3: SIP Request-Typen und ihre Verwendung	33
Tab. 4.4: SIP Response-Klassen und ihre Verwendung.....	33
Tab. 5.1: Konvertierung zwischen DSCP- und IP-Precedence-Werten.....	43
Tab. 5.2: Error Concealing-Methoden im Überblick	49
Tab. 6.1: Auswirkungen der Beeinträchtigungen im Netz auf die QoS der Dienste	52
Tab. 6.2: Codecs und Kodierungen sowie deren Bandbreiten und MOS-Werte	53
Tab. 6.3: Beiträge der Bearbeitungsphasen während einer VoIP-Verbindung an der gesamten Ende-zu-Ende-Verzögerung	54
Tab. 7.1: Umrechnung der PESQ- in MOS-LQO-Werte für Schmalband-Telefonie	65
Tab. 7.2: Umrechnung der PESQ- in MOS-LQO-Werte für Breitband-Telefonie	66
Tab. 7.3: Signalarten und deren Eigenschaften.....	66
Tab. 7.4: Grenzen der ausgegebenen MOS-LQO-Werte des POLQA-Algorithmus.....	67
Tab. 7.5: R-Faktor und MOS-Wert in dem E-Modell.....	69
Tab. 7.6: Parameter des E-Modells und deren Defaultwerte für einen durchschnittlichen und störungsfreien Kommunikationskanal mit PCM-Kodierung.....	71
Tab. 7.7: R-Faktoren und MOS-Werte im Breitband-E-Modell.....	73
Tab. 10.1: Die Modi des G.711.1-Codecs.....	96
Tab. 11.1: <i>Bpl</i> - und <i>Ie</i> -Gleichungen des EIP-Modells für gängige Sprachcodecs.....	112
Tab. 12.1: Parameter des A-Modells für die gängigen Sprachcodecs	129
Tab. 13.1: MPEG Audio Layer III-Versionen	131
Tab. 13.2: Koeffizienten des MP3-Faktors	137
Tab. 13.3: Parameter des MP3-Modells für einige ausgewählte Bitraten.....	143

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1: Konvergenzen des Next Generation Networks	4
Abb. 2.1: Sichtweisen auf die QoS	8
Abb. 2.2: QoS-Taxonomie	9
Abb. 3.1: Unified Communication	17
Abb. 4.1: Verbindungsaufbauphase einer H.323-Verbindung mit Gatekeeper	27
Abb. 4.2: Verbindungsabbauphase einer H.323-Verbindung mit einem Gatekeeper	28
Abb. 4.3: Verbindungsaufbauphasen einer H.323-Verbindung ohne Gatekeeper	29
Abb. 4.4: SIP-Kommunikationsablauf im Proxy-Mode.....	34
Abb. 4.5: SIP-Kommunikationsablauf im Redirect-Mode.....	36
Abb. 5.1: QoS-Verfahren in dem TCP/IP-Modell	38
Abb. 5.2: Struktur des 802.1Q-Headers	38
Abb. 5.3: Einfügen des 802.1Q-Headers in das Ethernet-Frame	39
Abb. 5.4: Labels und FECs in einem MPLS-Netzwerk	40
Abb. 5.5: IPv4-ToS-Byte	42
Abb. 5.6: DiffServ-Codepoint Field.....	42
Abb. 5.7: RSVP innerhalb von Hosts und Routern.....	45
Abb. 6.1: Schematische Repräsentation der Phasen einer VoIP-Benutzerschnittstelle und der anschließenden Übertragung der Sprachdaten.....	51
Abb. 6.2: Durch Jitter beeinträchtigte Ankunftszeiten von Sprachpaketen	56
Abb. 6.3: Markov-Verlustmodell mit 2 Zuständen	57
Abb. 7.1: Klassifizierung der QoS-Bewertungsmethoden	63
Abb. 7.2: Übersicht über die Grundstruktur des PESQ-Algorithmus	64
Abb. 7.3: QoS-Werte des E-Modells als Funktion der Bewertungsfaktoren	68
Abb. 7.4: Exponentielle Extrapolation	73
Abb. 7.5: Übersicht über die Funktionsweise von VQmon	74
Abb. 7.6: Markov-Verlustmodell mit 4 Zuständen	77
Abb. 8.1: Blockschaltbild des erstellten Tools.....	80
Abb. 8.2: Benutzerschnittstelle des erstellten Tools	83
Abb. 9.1: Charakteristiken ausgewählter Schmalband-Referenzsignale	86
Abb. 9.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefFile.wav“ ...	87
Abb. 9.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefFileGerman.wav“	88
Abb. 9.4: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprach- codec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefMixed.wav“	88
Abb. 9.5: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „PESQRef.wav“	89

Abb. 9.6: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „Or105.wav“	89
Abb. 9.7: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste bei einer burstfreien Übertragung für den Sprachcodec G.711 A-law, dem Referenzsignal Or105.wav und unterschiedlichen Signallängen.....	91
Abb. 9.8: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 5 für den Sprachcodec G.711 A-law, dem Referenzsignal Or105.wav und unterschiedlichen Signallängen	91
Abb. 10.1: Block-Diagramm des G.711.1-Kodierers.....	96
Abb. 10.2: Schmalband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R1	98
Abb. 10.3: Schmalband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R2a	99
Abb. 10.4: Breitband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R2b	100
Abb. 10.5: Breitband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R3	100
Abb. 11.1: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 10 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an.....)	104
Abb. 11.2: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 20 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an.....)	105
Abb. 11.3: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 30 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an.....)	105
Abb. 11.4: <i>Bpl</i> als Funktion vom <i>BSLP</i> (Schritte 2 und 3)	106
Abb. 11.5: <i>Ie</i> als Funktion vom <i>BSLP</i> (Schritte 2 und 3)	107
Abb. 11.6: Numerisch ermittelte QoS-Werte als Funktion der Paketverluste für verschiedene Bewertungsmethoden für den Sprachcodec G.726 (32 kbit/s; 30 ms Sprachprobenlänge; burstfreie Übertragung).....	108
Abb. 11.7: Analyse der IP-Umgebung	109
Abb. 11.8: QoS-Werte als Funktion nicht-deterministisch verteilter Paketverluste bei einer burstfreien Übertragung	110
Abb. 11.9: QoS-Werte als Funktion nicht-deterministisch verteilter Paketverluste bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 4	111
Abb. 12.1: Blockschaltbild des A-Modells	114
Abb. 12.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 20 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an.....)	116
Abb. 12.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 40 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an.....)	117
Abb. 12.4: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 60 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an.....)	117
Abb. 12.5: Approximation der PESQ-Kurve für den Sprachcodec GSM.....	118
Abb. 12.6: Illustration zur Bestimmung des <i>K</i> -Faktors für den Sprachcodec GSM.....	119

Abb. 12.7: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mit β gleich 1	120
Abb. 12.8: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mit β gleich 6	120
Abb. 12.9: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mittels unterschiedlicher Bewertungsmethoden für den Sprachcodec GSM bei einer burstfreien Übertragung..	122
Abb. 12.10: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mittels unterschiedlicher Bewertungsmethoden für den Sprachcodec GSM und bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 4.....	122
Abb. 12.11: Referenzsignal und zu Beginn zeitlich verschobenes Testsignal für den PESQ- Algorithmus	123
Abb. 12.12: Referenzsignal und innerhalb der ersten Sprachsequenz mit Stille versehenes Testsignal für den PESQ-Algorithmus	124
Abb. 12.13: EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende- Verzögerung für den Codec G.711	125
Abb. 12.14: EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende- Verzögerung für den Codec GSM	125
Abb. 12.15: A-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende- Verzögerung für den Codec G.711	127
Abb. 12.16: A-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende- Verzögerung für den Codec GSM	128
Abb. 13.1: Blockdiagramm des MP3-Kodierers.....	132
Abb. 13.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße bei einem Frame je RTP-Paket für den Codec MP3 (80 kbit/s).....	134
Abb. 13.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße bei 3 Frames je RTP-Paket für den Codec MP3 (80 kbit/s).....	134
Abb. 13.4: Blockdiagramm des MP3-Modells.....	135
Abb. 13.5: Approximation der PESQ-Werte als Funktion des <i>BFP</i> für ausgewählte Paketverluste und eine Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 2)	138
Abb. 13.6: Approximation des Parameters α als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit bei einer Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 3).....	138
Abb. 13.7: Approximation des Parameters β als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit bei einer Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 3).....	140
Abb. 13.8: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; burstfreie Übertragung; 1 Frame je RTP-Paket).....	141
Abb. 13.9: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; durchschnittlichen Burstgröße von 3; 1 Frame je RTP-Paket).....	142
Abb. 13.10: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s); burstfreie Übertragung; 3 Frames je RTP-Paket).....	142

Abb. 13.11: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; durchschnittliche Burstgröße von 3; 3 Frames je RTP-Paket)	143
Abb. 14.1: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec G.711 unter Verwendung eines FIFO-Buffers	147
Abb. 14.2: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec G.711 unter Verwendung eines PJSIP-Buffers	148
Abb. 14.3: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec GSM unter Verwendung eines FIFO-Buffers	149
Abb. 14.4: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec GSM unter Verwendung eines PJSIP-Buffers	149
Abb. 14.5: QoS-Werte (E-Modell) als Funktion der Ende-zu-Ende-Verzögerung und der Paketverluste für VoIP-Verbindungen unter Verwendung des Sprachcodecs G.711 ..	151
Abb. 15.1: Funktionsumfang und Anwendungsgebiete des Messtools <i>TraceSim</i>	154
Abb. 15.2: Benutzeroberfläche des Messtools <i>TraceSim</i>	155
Abb. 15.3: Verbindungsliste des Messtools <i>TraceSim</i>	156

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

Die Erfindung des Telefonapparates 1876 durch Alexander Graham Bell und der Ausbau des ersten Telefonnetzes in Deutschland in dem folgenden Jahr waren der Beginn der analogen Telefonie. Neben den Fortschritten der technischen Basis, wie den Endgeräten, Kabeln und Übertragungsprotokollen, waren zunächst die Digitalisierung der übertragenen Signale und später die Einführung des Integrated Services Digital Networks (ISDN) [30] die wichtigsten Entwicklungen in dem Bereich der Telekommunikation. Etwa 100 Jahre nach der Erfindung des ersten Telefonapparates war es jetzt möglich, zusätzlich zu der Sprache Daten über das bestehende Telefonnetz, das Public Switched Telephone Network (PSTN), zu übertragen und durch die Vermeidung der bei analogen Übertragungen aufgrund von Leitungsdämpfung auftretenden Signalverminderungen die Sprachqualität zu verbessern. Die bis dato mittels unterschiedlicher Netze erbrachten Dienste (Dedicated Networks), wie u.a. Fernschreiber, Fax, und Telefonie, wurden hier in einem Netz vereint (Integrated Networks). Außerdem wurden jetzt wesentlich höhere Übertragungsraten von 64 kbit/s in Europa bzw. 56 kbit/s in Nordamerika und Japan je Nutzkanal möglich, da die digitalen Daten direkt und in der Regel ohne Einsatz von analogen Modems übertragen werden konnten. Die Digitalisierung der Sprachdaten findet anhand der Pulse-Code Modulation (PCM) [139] statt. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Technik sind:

- Begrenzung des analogen Sprachsignals mittels eines Tiefpasses auf 3,4 kHz
- Abtasten des Signals mit einer Frequenz von 8 kHz mittels Pulse-Amplitude Modulation (PAM) [138]
- Quantisierung der Analogwerte durch Unterteilung des gesamten Aussteuerungsbereiches des Analogsignals in 256 Stufen und Zuordnung der einzelnen Abtastwerte in Abhängigkeit von der Amplitude zu jeweils einer dieser Stufen
- Codierung des Signals durch Zuordnung der Stufen zu jeweils einem Codewort (8 Bit)

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

Aus der Abtastrate und der Anzahl an Quantisierungsstufen ergibt sich die in dem europäischen ISDN-Netz eingesetzte Datenrate eines Nutzkanals von 64 kbit/s (8 kHz x 8 Bit). Die abweichende Bandbreite von 56 kbit/s eines ISDN-Nutzkanals in den USA und Japan resultiert aus dem Fehlen eines separaten Steuerkanals, dessen Daten zusätzlich auf den Nutzkanälen übertragen werden und daher die für das Sprachsignal zur Verfügung stehende Bandbreite verringern.

Anfang der 1960er Jahre wurde im Auftrag der US-Luftwaffe das Advanced Research Projects Agency Network (Arpanet) [46], der Vorgänger des heutigen Internets, entwickelt. Es basierte auf dem Konzept der paketvermittelnden Datenübertragung, bei der die Daten in Pakete zerlegt, in den Vermittlungsknoten zwischengespeichert und über sich dynamisch ändernden Wegen übertragen werden. Bis dato basierte die Kommunikation mittels Daten oder Sprache ausschließlich auf der verbindungsorientierten Leitungsvermittlung, die den Teilnehmern ein Übertragungssignal zur alleinigen Nutzung zur Verfügung stellt (vgl. Telefongespräche in einem PSTN). Diese Technik ermöglichte aufgrund der konstanten Signallaufzeiten eine relativ einfache Beherrschbarkeit der Dienstgüte. Allerdings hat sie den großen Nachteil der ineffizienten Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Bandbreite, da die in Anspruch genommenen Kanäle auch dann vollständig in Beschlag genommen werden, wenn Pausen während der Kommunikation auftreten. Im Gegensatz dazu werden die einzelnen Datenpakete bei der paketvermittelnden Datenübertragung in Abhängigkeit der Verfügbarkeit und Auslastung der Teilabschnitte durch die Vermittlungsknoten geleitet. Ein derartiges Netz bietet daher eine wesentlich höhere Flexibilität.

Damit Kommunikationspartner überhaupt Daten austauschen können, müssen sie bestimmte Vereinbarungen einhalten. Diese als Protokolle bezeichneten Regeln können in Abhängigkeit der entsprechenden Schicht des ISO/OSI-Referenzmodells (International Organization for Standardization / Open Systems Interconnection) eingeordnet werden (s. Tab. 1.1). Das Modell unterteilt die Übertragungsaktivitäten in 7 Funktionsebenen bzw. Schichten (Layer), wobei die Kommunikation sowohl auf dem sendenden als auch auf dem empfangenen System immer zwischen Instanzen der jeweils gleichen Schicht stattfindet.

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

Tab. 1.1: Das ISO/OSI-Referenzmodell inkl. einiger ausgesuchter Protokolle [139]

Schicht	Englische Bezeichnung	Deutsche Bezeichnung	Protokolle
7	Application Layer	Anwendungsschicht	DNS, FTP, POP, DHCP, SSH, Telnet,...
6	Presentation Layer	Darstellungsschicht / Präsentationsschicht	MIME, SSL, TLS, XDR,...
5	Session Layer	Kommunikationsschicht / Sitzungsschicht	NetBIOS, http, SMTP, H.323, SIP,...
4	Transport Layer	Transportschicht	DCCP, UDP, TCP, RTP, RTCP,...
3	Network Layer	Vermittlungsschicht / Netzwerkschicht	IP, ICMP, IGMP, IPsec,...
2	Data Link Layer	Sicherungsschicht / Verbindungsschicht	SLIP, CSLIP, PPP, ARP, RARP,...
1	Physical Layer	Physikalische Schicht / Bitübertragungsschicht	

Das damals in dem Arpanet eingesetzte Netzwerkprotokoll NCP (Network Control Program) wurde 1983 durch den TCP/IP-Protokoll-Stack (Transmission Control Protocol / Internet Protocol) [93] ersetzt. Dabei handelt es sich um eine Familie von Netzwerkprotokollen, die u.a. die Nutzung von höchst unterschiedlichen Netzen ermöglichte (Funknetzwerke, Satellitenverbindungen,...) und deren Verwendung in dem Arpanet den Grundstein für das heutige Internet legte [120].

Eine weitere Integrationsstufe ist das Next Generation Network (NGN), welches analoge leitungsvermittelnde Netze, digitale paketvermittelnde Netze und Mobilfunknetze in eine konvergente Netzwerkarchitektur auf Basis der IP-Technik integriert. Definiert wird der Begriff von der ITU-T in [83] wie folgt:

“A packet-based network able to provide telecommunication services and able to make use of multiple broadband, QoS-enabled transport technologies and in which service-related functions are independent from underlying transport related technologies. It enables unfettered access for users to networks and to competing service providers and/or services of their choice. It supports generalized mobility which will allow consistent and ubiquitous provision of services to users.”

Die Abb. 1.1 zeigt einige der treibenden Kräfte, die die Entwicklung des NGN vorantrieben und zu den entsprechenden Markt- bzw. technologischen Konvergenzen geführt haben.

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

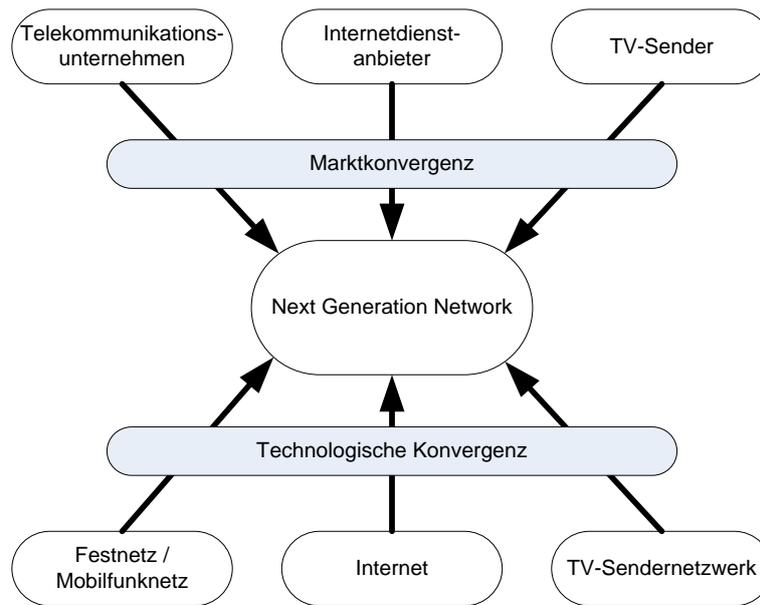


Abb. 1.1: Konvergenzen des Next Generation Networks (in Anlehnung an [84])

Einige grundlegende Prinzipien und Merkmale in einem solchen Netzwerkkonzept sind [84]:

- Trennung zwischen den Dienst- und Transportfunktionen
- Bereitstellung entsprechender Bandbreiten und Dienstgütern für die eingesetzten Dienste
- Schnelle Realisierung und Einbindung neuer Funktionen und Dienste dank offener und standardisierter Schnittstellen
- Integration der bereits bestehenden Telekommunikationsnetze
- Verfügbarkeit unterschiedlicher Zugangstechnologien an unterschiedlichen Orten bei gleichzeitiger Mobilität des Anwenders (Generalized Mobility)

Das Internet, wie auch jedes andere IP-Netzwerk mit offenen Schnittstellen, bietet eine große Angriffsfläche gegenüber Angriffen, Manipulationen und Überwachungen. Dabei kann es sich u.a. um Software-Angriffe, Identitäts- oder Informationsdiebstahl, Sabotage oder Diebstahl geistigen Eigentums handeln. Um eine gewisse Sicherheit zu gewährleisten, ist der Schutz sowohl der Übertragungsstrecke als auch der Endgeräte durch den Einsatz von Authentifizierungs- und Verschlüsselungstechniken, Virenschutz und Firewalls nötig. Die wichtigsten Protokolle bzw. Protokollfamilien, die der Sicherung der Verbindung bzw. der zu

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

übertragenden Daten dienen, sind Secure Sockets Layer (SSL) [42], Transport Layer Security (TLS) [33] und Internet Protocol Security (IPsec) [88]:

– *SSL/TLS*

- TLS ist Nachfolger von SSL
- Initialisierung auf der Sitzungsschicht und Einsatz auf der Präsentationsschicht (vgl. Tab. 1.1)
- Sicherung von HTTP-Verbindungen mittels HTTPS (Hypertext Transfer Protocol Secure) [123]
- Sicherung von Multimedia-Verbindungen durch die Verschlüsselung des SIP-Protokolls (Session Initiation Protocol) [19]

– *IPsec*

- Verschlüsselung der IP-Pakete auf der Netzwerkschicht (vgl. Tab. 1.1)
- 2 unterschiedliche Betriebsarten (Transport- und Tunnelmodus) und 2 unterschiedliche Protokolle AH (Authentication Header) und ESP (Encapsulating Security Payload) ermöglichen flexible Anwendungsmöglichkeiten.

Das NGN bietet neben all seinen Gefahren und Unsicherheiten ein großes Potenzial im Bereich digitaler Kommunikationsdienste. Das folgende Kapitel befasst sich mit den konkreten Zielen, die in dieser Arbeit erarbeitet werden sollen.

1 Einführung: Wichtige Entwicklungen auf dem Telekommunikationsmarkt

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Im Internet findet die Übertragung der Datenpakete auf der Vermittlungsschicht (Internet Protocol) nach dem sogenannten best effort-Prinzip statt. Es werden hier keine Unterscheidungen zwischen den einzelnen Paketen vorgenommen und somit auch keine Garantien bezüglich der zur Verfügung gestellten Bitrate oder den Übertragungszeiten gegeben. Es erfolgt keine Priorisierung in Abhängigkeit der Art der Daten, sodass die während einer Überlastung auftretenden Paketverluste alle Dienste gleichermaßen betreffen. Gerade aber bei Echtzeitdiensten leidet die Dienstgüte bzw. Quality of Service (QoS) unter verzögerten, beschädigten oder nicht ankommenden Datenpaketen, da hier keine nachträgliche Anpassung des Datenstroms möglich ist [136]. Um höhere Dienststufen (Service Levels) als die im Internet übliche best effort-Übertragung zu gewährleisten, ist es notwendig, für eine Anwendung die vorhandenen Netzwerk-Ressourcen mit einer garantierten Minimal-Bandbreite (Hard QoS; s. IntServ in Abschn. 5.4) oder in Abhängigkeit der verfügbaren Bandbreite oder der Art der Daten dynamisch zu reservieren (Soft QoS; s. DiffServ in Abschn. 5.3).

Der Begriff Dienstgüte bzw. Qualität wird nach dem Standard [34] als

“...die Gesamtheit von Merkmalen einer Einheit bezüglich ihrer Eignung, festgelegte und vorausgesetzte Erfordernisse zu erfüllen...”

definiert. Bei Einheiten kann es sich hier um Konzepte, Arbeitsabläufe, Produkte, Prozesse, Verfahren o.ä. handeln. Später wurde die Definition von Qualität durch die in [35] beschriebene und aktuell gültige Norm zum Qualitätsmanagement abgelöst:

„...Grad, in dem ein Satz inhärenter Merkmale Anforderungen erfüllt...”

Das entscheidende Merkmal in dieser Norm ist das Erfüllen der gestellten Anforderungen unabhängig von dem Preis oder der Güte der verwendeten Materialien. Erfüllt werden müssen dabei neben den objektiv messbaren Eigenschaften auch die subjektiven Erwartungen der Kunden. Nach der IEC 2371 ist

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

„...Qualität die Übereinstimmung zwischen den festgestellten Eigenschaften und den vorher festgelegten Forderungen einer Betrachtungseinheit...“.

Die Qualität eines Dienstes (QoS) ist nach [61]:

"...Totality of characteristics of a telecommunications service that bear on its ability to satisfy stated and implied needs of the user of the service..."

Die Charakteristiken sollten sowohl wahrnehmbar als auch messbar sein. Sobald sie definiert wurden, stellen sie die durch Metriken beschreibbaren Parameter der QoS dar.

Es ist notwendig, die Bestimmung der Qualität anhand von praxisnahen Messungen vorzunehmen, die sowohl die Sicht des Endkunden als auch die Sicht der Netzwerkprovider berücksichtigen.

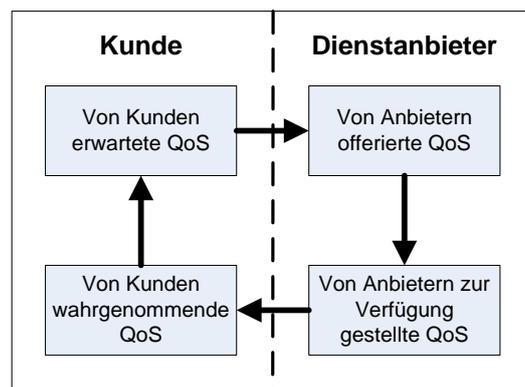


Abb. 2.1: Sichtweisen auf die QoS (in Anlehnung an [35])

Häufig existieren starke Diskrepanzen zwischen der vom Kunden erwarteten und der tatsächlich wahrgenommenen bzw. der vom Anbieter offerierten und der tatsächlich bereitgestellten QoS. Abb. 2.1 zeigt diese 4 unterschiedlichen Sichtweisen und deren Beziehungen zueinander.

Um eine Unterscheidung zwischen der Kunden- und der Anbieterperspektive vornehmen zu können, wurde in [60] der Begriff der Quality of Experience (QoE) eingeführt. Die aktuelle Definition der ITU-T lautet [73]:

„...Totality of characteristics of a telecommunications service that bear on its ability to satisfy stated and implied needs of the user of the service...“

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

In diesem Kontext findet eine implizite Unterscheidung zwischen den Qualitätskomponenten des Netzwerkes bzw. Diensteanbieters (QoS) auf der einen und den Qualitätsmerkmalen, die der Anwender aufgrund der QoS wahrnimmt (QoE), auf der anderen Seite statt.

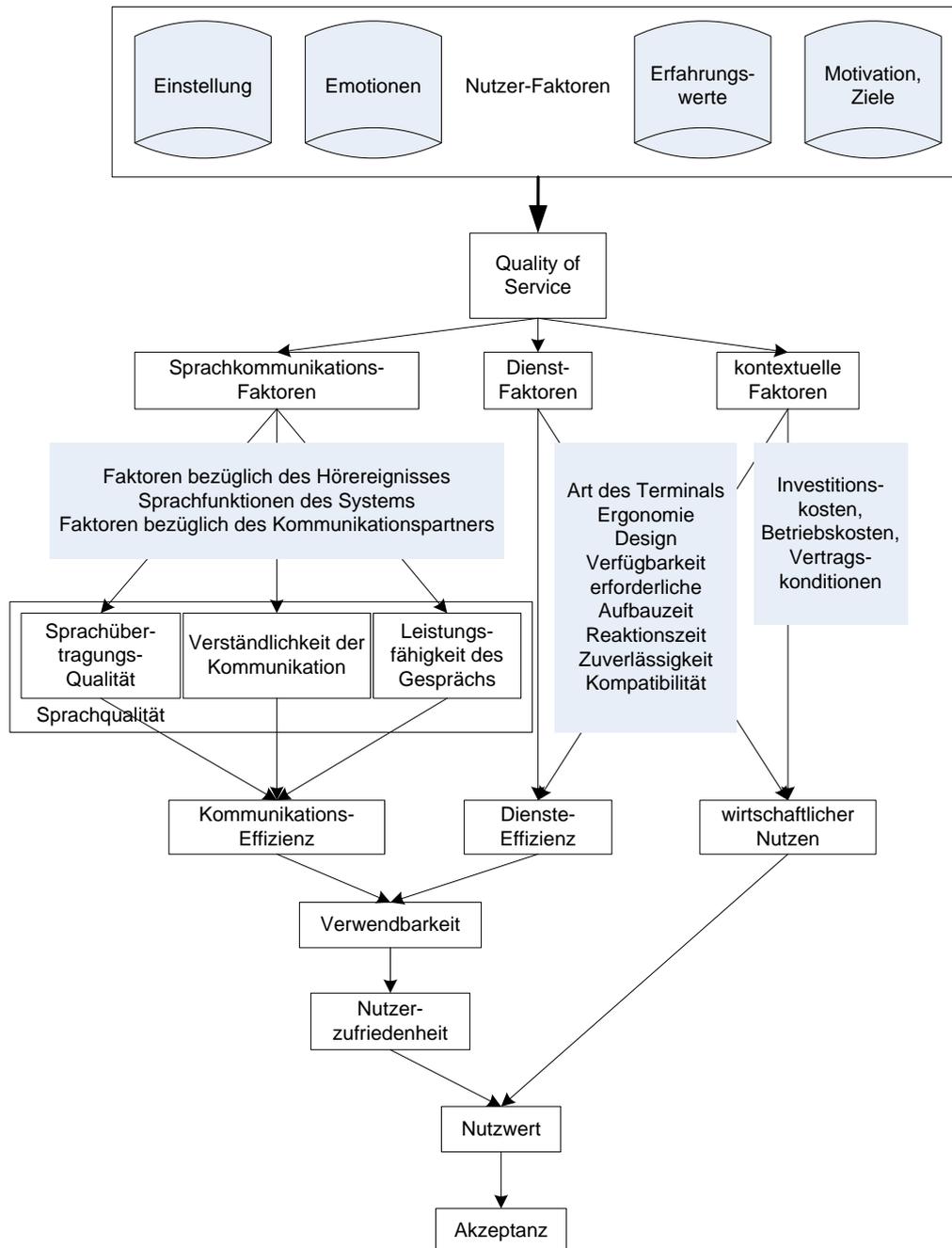


Abb. 2.2: QoS-Taxonomie (in Anlehnung an [102] [11])

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Der Begriff der QoS in Bezug auf die Sprachqualität wurde in [102] und [11] mittels einer Taxonomie in 3 Faktoren unterteilt, die zusammen die Qualitätskomponenten des Anbieters bilden (vgl. Abb. 2.2):

- *Sprachkommunikations-Faktoren*
Alle Faktoren, die direkt mit der Kommunikation zwischen den Gesprächspartnern in Verbindung gebracht werden können.
- *Dienste-Faktoren*
Faktoren, die auf Eigenschaften des Dienstes zurückgeführt werden können, wie u.a. Dienst-Support, Dienstsicherheit und Dienstfunktionsfähigkeit.
- *kontextuelle Faktoren*
Faktoren, die sich auf die nicht-physischen Aspekte des Dienstes beziehen, zu denen u.a. die Investitionskosten, die Betriebskosten und die Vertragskonditionen gehören. Diese haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Erwartungshaltung des Anwenders.

Aufgrund der zentralen Bedeutung des Anwenders bezüglich der Beurteilung der Sprachqualität und damit letztlich der Akzeptanz des VoIP-Dienstes werden die Nutzer-Faktoren an der Spitze der Taxonomie dargestellt. Die Sprachkommunikations-Faktoren tragen zu den Sprachmerkmalen und damit zu der Sprachqualität bei und resultieren aus den Qualitätskomponenten des Netzwerkes, die wiederum das Ergebnis der während der Netzwerk-Planungsphase getroffenen Entscheidungen sind. Die Sprachkommunikations-Faktoren können in 3 Komponenten unterteilt werden:

- *Sprachübertragungs-Qualität*
Alle Qualitätskomponenten, die sich auf die Sprachqualität in einer reinen Hörsituation auswirken, wie u.a. Leitungsrauschen, Pegelverlust oder Übertragungsfehler.
- *Verständlichkeit der Kommunikation*
Bezieht sich auf Faktoren, die die Kommunikationspartner betreffen. Darunter fallen auch Anpassungen der Anwender an widrige akustische Umstände, wie z.B. die Erhö-

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

hung der Lautstärke und stärkere Betonung in geräuschvollen Umgebungen oder das Nachfragen bzw. erneutes Mitteilen bei verloren gegangenen Informationen.

– *Leistungsfähigkeit des Gesprächs*

Bezieht sich auf Qualitätskomponenten, die die Leistungsfähigkeit in einer Gesprächssituation beeinflussen, wie z.B. Rückkopplungen bzw. Signal-Echos oder Übertragungsverzögerungen.

Diese Komponenten der Sprachqualität ergeben zusammen die Kommunikations-Effizienz. Diese beschreibt das Verhältnis der von dem Anwender aufgebrauchten Mittel zu der Fehlerfreiheit und Vollständigkeit, mit denen er eine bestimmte Kommunikationsaufgabe ausgeführt hat [37]. Die Dienste-Effizienz bezieht sich auf die im Zuge der Verwendung eines Dienstes aufgebrauchten Ressourcen, abgesehen von den Problemen, die bei der eigentlichen Kommunikation auftreten. Die Kommunikations- und die Dienste-Effizienz bestimmen zusammen die Verwendbarkeit des Dienstes. Bei dem Nutzwert handelt es sich um die Abstriche, die bei der Verwendbarkeit des Systems aufgrund der aufzubringenden Kosten gemacht werden müssen. Die resultierende Akzeptanz wird üblicherweise als das Verhältnis der Anzahl der tatsächlichen Anwender zu der Anzahl der potenziellen Anwender definiert.

Der gesetzliche Rahmen hinsichtlich der Qualitätsbestimmung durch die Anbieter wird mittels entsprechender Richtlinien der EU festgelegt. U.a. werden die Netzbetreiber dazu verpflichtet, Verfahren zum Netzwerkmanagement offenzulegen:

„...Die Mitgliedstaaten stellen sicher, dass die nationalen Regulierungsbehörden Unternehmen, die öffentliche elektronische Kommunikationsnetze und/oder öffentlich zugängliche elektronische Kommunikationsdienste bereitstellen, verpflichten können, unter anderem [...] Informationen über alle vom Betreiber zur Messung und Kontrolle des Datenverkehrs eingerichteten Verfahren, um eine Kapazitätsauslastung oder Überlastung einer Netzverbindung zu vermeiden, und über die möglichen Auswirkungen dieser Verfahren auf die Dienstqualität bereitzustellen...“ [124]

Außerdem müssen nationale Regulierungsbehörden dazu in der Lage sein, Mindestanforderungen an die Dienstqualität festzulegen, um eine Verschlechterung der Dienste und eine Dis-

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

kriminierung bzw. künstliche Verlangsamung des Datenverkehrs in den Netzen zu verhindern:

„...Um eine Verschlechterung der Dienste und eine Behinderung oder Verlangsamung des Datenverkehrs in den Netzen zu verhindern, stellen die Mitgliedstaaten sicher, dass die nationalen Regulierungsbehörden in der Lage sind, Mindestanforderungen an die Dienstqualität der Unternehmen, die öffentliche Telekommunikationsnetze bereitstellen, festzulegen...“ [90]

Die Umsetzung dieser Systeme zur Überwachung der Dienstgüte wird in den einzelnen Ländern mittels entsprechender Ausschreibungen an geeignete Unternehmen übertragen. In Deutschland wurden die Anforderungen im Juli 2014 durch die Bundesnetzagentur ausgeschrieben, während die Ausschreibung in Polen im September 2014 durch Office of Electronic Communications (UKE) beauftragt wurde.

In [21] wurde ein Fragenkatalog an die Mitglieder der CEPT, der europäischen Konferenz der Verwaltungen für Post und Telekommunikation, gesendet. Das Ziel war das Sammeln von Informationen bezüglich der Rechtsrahmen für die QoS-Überwachung und der technischen Implementierungen von Messsystemen im Zusammenhang mit den Internetzugängen von Endverbrauchern. Eine Übersicht über die Antworten der einzelnen Länder zeigt die Tab. 2.1. Um QoS-Messsysteme in der Praxis aufzubauen und zu betreiben, sind effiziente QoS-Bewertungsmethoden notwendig. Diesem Thema widmet sich die vorliegende Arbeit.

Zunächst sollen die Begriffe und Definitionen bezüglich der VoIP-Technologie erörtert werden. Anschließend werden die gängigen und standardisierten QoS-Bewertungsmethoden für den Dienst VoIP kurz vorgestellt, wobei hier sowohl auf die Vor- als auch auf die Nachteile dieser Techniken eingegangen wird. Die Nachteile der standardisierten QoS-Bewertungsmethoden sollen mittels Entwicklungen eigener Modelle im Rahmen dieser Arbeit entschärft werden. Um dies zu realisieren, wird zunächst eine numerische Umgebung für QoS-Untersuchungen beim Dienst VoIP aufgebaut. Zu diesem Zweck wurde ein Tool entwickelt, welches sowohl die Übertragung von Sprachpaketen als auch das Auftreten von Beeinträchtigungen simuliert und somit eine zeit- und kosteneffiziente Alternative zu Messungen in einer realen Umgebung bietet. In dem entsprechenden Programm sollen die wichtigsten standardisierten QoS-Bewertungsmethoden, d.h. PESQ, POLQA und das E-Modell (vgl. Abschn. 7.2), implementiert werden.

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Tab. 2.1: Rechtsrahmen für die QoS-Überwachung und technische Implementierungen von Messsystemen im Zusammenhang mit den Internetzugängen von Endverbrauchern in den CEPT-Mitgliedsstaaten (in Anlehnung an [21])

	Öster- reich	Kro- atien	Däne- ne- mark	Finn- land	Deutsc- hland	Lett- land	Li- tau- en	Mon- tenegro	Norwe- gen	Pol- en	Por- tugal	Ru- mäni- en	Spa- nien	Schw- eden
Kontrolle der Qualität von elektronischen Kommunikationsdiensten	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja
QoS-Anforderungen (Parameter, Key Performance Indicators (KPI)) für den privaten Internetzugang	Nein, aber in Planung	Nein, aber in Planung	Nein	Ja	Nein, aber in Planung	Ja	Ja	Ja	Nein, aber in Planung	Ja	Nein, aber in Planung	Ja	Ja	Nein
Bearbeiten von Beschwerden von Endverbrauchern	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja
Minimale Qualitätsanforderungen bezüglich des Internetzugangs als Vertragsinhalt für Endverbraucher	Nein	Nein	Nein	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Zur Verfügung stellen von Messungen und Bewertung von QoS-Parameter für private Internetzugänge und Zugang zu diesen Parametern im Rahmen der Bearbeitung von Endverbraucher-Beschwerden	Nein	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein	Nein	Ja	Nein
bewertete QoS-Parameter:														
Datenübertragungsrate	N/A	Ja	N/A	N/A	N/A	Ja	Ja	N/A	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	N/A
Weitere Parameter (Latenz, Paketverluste, ...)	N/A	Nein	N/A	N/A	N/A	Ja	Ja	N/A	Ja	Ja	Ja	Ja	Ja	N/A
Eigenes System für die Bestimmung von QoS-Parametern von Internetzugängen	N/A	Nein, aber in Planung	N/A	N/A	N/A	Ja	Ja	N/A	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	N/A

2 Aufgabenstellung und Ziele der Arbeit

Dieses Tool dient als Hauptuntersuchungsumgebung für die numerischen QoS-Messungen in dieser Arbeit. Anhand dessen werden zunächst Untersuchungen hinsichtlich der Referenzsignale während des Einsatzes von signalbasierten QoS-Bewertungsmethoden durchgeführt. Auch die standardisierten QoS-Bewertungsmethoden selbst werden im Folgenden auf ihre Effizienz untersucht. Im Rahmen der Analyse des parameterbasierten E-Modells [63] werden für IP-Umgebungen notwendige Anpassungen vorgenommen. Eine Vergleichsstudie zwischen dem ursprünglichen und dem modifizierten EIP-Modell soll anschließend die Vorteile aufzeigen. Aufgrund der bisher gewonnenen Erkenntnisse wird im Folgenden ein neues parameterbasiertes QoS-Bewertungsmodell für den VoIP-Dienst entwickelt (A-Modell). Ein weiteres neu entwickeltes und parameterbasiertes QoS-Modell ermöglicht die Bewertung von Audioströmen, die mittels des MP3-Codecs kodiert wurden (MP3-Modell). Es folgen Untersuchungen hinsichtlich des Einflusses von Jitterbuffern auf die QoS beim VoIP-Dienst. Zum Schluss wird eine konkrete Implementierung der neuen QoS-Bewertungsmodelle in einem auf dem IT-Markt eingesetzten QoS-Messsystem vorgestellt.

In den folgenden Kapiteln 3 bis 6 werden zunächst die Grundlagen des VoIP-Dienstes im Hinblick auf die Bestimmung der QoS erläutert. Die hier beschriebenen Techniken und Parameter werden für die Interpretation und Einordnung der aus den bereits existierenden QoS-Bewertungsmethoden resultierenden Qualitätsbeurteilungen benötigt. Außerdem stellen diese Informationen die Voraussetzung für das Verständnis der im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelten Methoden dar. Kapitel 7 befasst sich aus technischer Sicht mit einigen der derzeit am häufigsten eingesetzten QoS-Bewertungsmethoden. Das in Kapitel 8 beschriebene Software-Tool ermöglicht es, auf effiziente Weise Ergebnisse für diese und zukünftige Methoden zu erhalten. In dem neunten Kapitel wird der erhebliche Einfluss der bei dem Einsatz von signalbasierten Methoden verwendeten Referenzsignale aufgezeigt. Diese Signale können u.a. auf Basis ihrer Abtastrate unterteilt werden. In Kapitel 10 werden Vergleiche der mit diesen Signalen erzielten QoS-Bewertungen für den Sprachcodec G.711.1 angestellt. Im Rahmen der folgenden Kapitel 11 bis 13 werden drei neue parameterbasierte Bewertungsmethoden entwickelt und deren Vorzüge gegenüber den bereits existierenden Methoden aufgezeigt. Der Einfluss sog. Jitterbuffer, die mittels Zwischenspeicherung der ankommenden Datenpakete Laufzeitschwankungen und Verluste zu einem gewissen Grad ausgleichen können, wird in Kapitel 14 untersucht. Die neu entwickelten Methoden werden bereits in einem kommerziell vertriebenen Messsystem eingesetzt, das in Kapitel 15 näher beschrieben wird. Die Arbeit endet mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf zukünftige Arbeiten in diesem Bereich.

3 VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme

3.1 Begriffe

Das Telefonieren über Netzwerke (VoIP) wurde erstmals im Jahr 1995 auch für Privathaushalte möglich. Unter dem Namen Internet Phone (IPhone) entwickelte das israelische Unternehmen *Vocaltec* eine Anwendung, die eine Halbduplex-Verbindung für eine abwechselnde Kommunikation ähnlich einem Walkie-Talkie herstellte. Verwendung fand es damals aber aus mehreren Gründen kaum: Neben der Tatsache, dass zu dieser Zeit beinahe ausschließlich schmalbandige Zugänge zur Verfügung standen (Analog-Modem oder ISDN), die üblicherweise nach der Verbindungsdauer abgerechnet wurden, waren zudem die Infrastrukturen der Provider nicht für Echtzeit-Dienste ausgelegt. Als Vermittlungsprotokoll wurde ein in der ITU-T-Empfehlung H.323 [72] definiertes Protokoll eingesetzt, welches für audio-visuelle Kommunikation in paketbasierenden Netzwerken Verwendung fand, aber für die Datenübertragung in Echtzeit völlig überdimensioniert war. Darüber hinaus bot es keine QoS-Eigenschaften und stellte keine Schnittstellen zwischen IP- und Festnetzen bereit. Damit bestand für VoIP-Benutzer weder die Möglichkeit, Anrufe in das Festnetz zu tätigen, noch aus diesem heraus angerufen zu werden. Um die Übertragung von Sprachdaten in Echtzeit überhaupt zu ermöglichen, mussten diese stark komprimiert werden, sodass die Sprachqualität eine entsprechend geringe Qualität aufwies und es häufiger zu Verbindungsabbrüchen kam.

Erst die Verbreitung der DSL-Technik (Digital Subscriber Line) [24] und der Daten-Flatrates Anfang der 2000er Jahren führten dazu, dass sich auch der VoIP-Dienst immer größerer Beliebtheit erfreute. Zudem ermöglichte das inzwischen eingesetzte und deutlich einfachere Vermittlungsprotokoll SIP [19] im Gegensatz zu dem H.323-Protokoll eine einfachere Integration in bestehende IP-Netze, da es eine große Ähnlichkeit bezüglich der Befehlskodierung zu den bereits bestehenden Internet-Diensten, wie HTTP [6] oder Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) [89], besitzt. Die Verbreitung von speziell für den VoIP-Dienst entwickelten und einfach zu bedienenden Anwendungen, wie *Teamspeak* [131] , *Skype* [127] und

3 VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme

Google Talk [49], bot durch deren breite Nutzerbasis zudem eine entsprechende Erreichbarkeit potenzieller Gesprächspartner. Diese Lösungen arbeiten allerdings mit proprietären Protokollen, was zur Folge hat, dass ausschließlich geschlossene Gruppen miteinander kommunizieren können. VoIP ist eine standardisierte Technik, die weltweit zum Einsatz kommen kann.

Aktuell findet eine immer stärkere Verdrängung der Internet-Festnetzanschlüsse durch mobile Datenübertragung mittels Smartphones und Tablets statt. Um auch auf diesen Geräten Internettelefonie anzubieten, verschiebt sich der Fokus auf die Entwicklung von VoIP-Clients speziell für diese Geräte. Ein immer wichtigeres Anliegen wird die Sicherheit von Telefonverbindungen werden, da IP-Netze ursprünglich nicht für gesicherte Signalwege ausgelegt sind. Kontrollmechanismen an Netzübergängen werden den Anbietern in Zukunft in einem größeren Umfang Möglichkeiten bieten, die Identität zu garantieren, eine verlässliche Kommunikation zu ermöglichen und die Privatsphäre zu schützen. Eine Herausforderung bei dem Einsatz von VoIP-Diensten besteht in der starken Wechselbeziehung zwischen der Dienstgüte und den Sicherheitsanforderungen. Die in solchen Netzwerken eingesetzten Sicherheitsstandards führen häufig zu einer Verringerung der Sprachqualität. In [96] wird ein System vorgestellt, welches die Verwendung eines sicherheitsorientierten VoIP-Netzwerkes ermöglicht, ohne die Dienstgüte negativ zu beeinflussen.

Ein weiterer Trend ist trotz der entstehenden Sicherheitsbedenken die Verwendung dezentraler VoIP-Lösungen, sogenannter Cloud-Telefonanlagen oder Hosted Private Branch Exchange (PBX). Diese bieten u.a. eine höhere Flexibilität, da angemietete Kapazitäten und Funktionen in der Regel zeitnah den aktuellen Bedürfnissen angepasst werden können und keine Neuanschaffungen bestehender Hardware aufgrund gestiegener Anforderungen nötig sind.

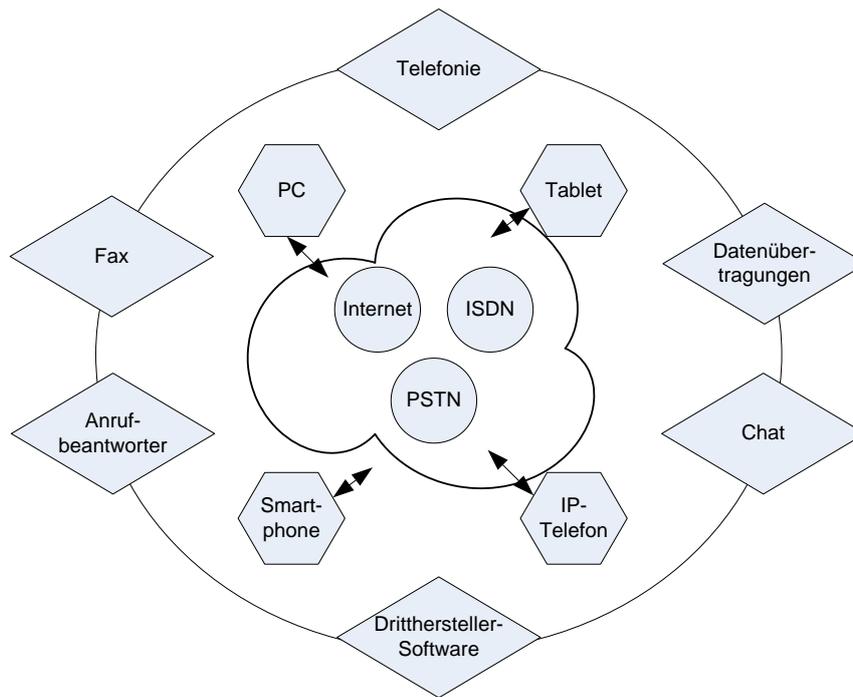


Abb. 3.1: Unified Communication

Eine weitere aktuelle Entwicklung ist die Zusammenführung verschiedener Kommunikationsdienste, sowohl Echtzeit (Real Time Communication bzw. RTC) als auch Nicht-Echtzeit, in eine einheitliche Anwendungsumgebung (Unified Communications, s. Abb. 3.1) mit dem Ziel einer effektiveren Kommunikation.

3.2 Anwendungsgebiete

VoIP-Anwendungen können in folgende Gebiete unterteilt werden:

- Unternehmen setzen VoIP in ihrem Intranet ein. Einer der Vorteile des Dienstes ist die Wiederverwendbarkeit der existierenden Netzwerk-Infrastruktur für die Sprachübertragung. Kosten können gespart werden, die durch die Installation und Wartung einer zusätzlichen Telefon-Infrastruktur aufkommen würden. Außerdem ist der Konfigurationsaufwand, wie u.a. das Hinzufügen von neuen Nutzern, relativ gering.
- VoIP wird in einem größeren Maßstab bei öffentlichen Netzbetreibern eingesetzt. Aufgrund des Vorteils der Netzwerkkonvergenz können unterschiedliche Netzwerke mittels entsprechender Netzwerk-Gateways auf einfache Art und Weise kombiniert

3 VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme

werden. Sie verwenden in ihrem Kernnetz (Backbone) daher häufig eine Mischung aus VoIP- und PSTN-Diensten.

- Nutzer mit einer Internetanbindung, die eine Software verwenden, die eine günstige und einfache Sprachkommunikation mit Verwandten, Freunden oder anderen ebenfalls diese Software einsetzenden Nutzern ermöglicht.

Offensichtlich existiert eine Vielzahl unterschiedlicher Netzwerkkonfigurationen, in denen der Dienst VoIP sinnvoll eingesetzt werden kann. Die Benutzer dieser zusammenhängenden Netze sind möglicherweise mit unterschiedlichen Arten von Qualitätsverminderungen konfrontiert, die charakteristisch für die Technologien sind, die in den jeweiligen Netzwerksegmenten verwendet werden. Außerdem ist es möglich, dass die ganzheitliche Qualität einer Sprachverbindung das Ergebnis simultan auftretender, kombinierter Effekte sowohl von stationären als auch von zeitlich veränderlichen Verminderungen ist. Aufgrund der Netzwerkzusammenschaltung steht dem Nutzer nicht zwangsläufig die Information zur Verfügung, durch welche Netzwerktypen ihre Gespräche geleitet werden. Es wäre daher möglich, dass sie ein traditionelles kabelgebundenes PSTN-Festnetztelefon verwenden, während der Netzanbieter in ihrem Kernnetz VoIP verwendet. Die von dem Nutzer wahrgenommenen Qualitätsmerkmale können daher erheblich von den erwarteten oder gewünschten Merkmalen abweichen.

3.3 VoIP-Systeme

Große Firmen der IT-Branche ließen im Laufe der Zeit mehrere kommerzielle VoIP-Systeme entwickeln. Tab. 3.1 zeigt eine Übersicht einiger ausgewählter Lösungen auf diesem Gebiet.

3 VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme

Tab. 3.1: Übersicht und Vergleich einiger ausgewählter VoIP-Systeme

	Cisco UC Manager	Open Scape	Lync	Skype	SPA 9000 Voice System (Hardware)
Zielgruppe	kleine bis große Unternehmen	üblicherweise größere Unternehmen	kleine bis große Unternehmen	üblicherweise Privatpersonen	kleine Unternehmen
Allgemeine Funktionalitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Web-Administration-Interface (PAWS) - Versionsverwaltung - Remote-Upgrade-Funktion - geringe Komplexität 	<ul style="list-style-type: none"> - Integration in GoogleMail, Lotus und Microsoft Exchange möglich - beinhaltet Softphone-Funktionalität 	Clients: <ul style="list-style-type: none"> - Erweiterung mit bereits bestehender oder neuer Software möglich - Übersetzungsdienste - kontextsensitive Anrufe Server: <ul style="list-style-type: none"> - Interaktive Sprachantwort (IVR) - Automatische Anrufverteilung (ACD) - Webchats - automatisch antwortende Bots 	<ul style="list-style-type: none"> - Facebook-Integration (u.a. Instant Messaging und Video-streaming) - Bezahlung von öffentlichen WLAN-Zugängen mittels Skype-Guthaben (Skype WiFi) - Web-Administration (Skype Manager) - Benutzung von SIP-Telefonen für Skype-Verbindungen möglich 	<ul style="list-style-type: none"> - Web-Administration - Statusanzeige aller Verbindungen - Voicemail-Integration
Video-Funktionalitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Vereinheitlichte Sprach- und Video-Funktionalität (Unified Voice und Video) - Bandbreiten-Manager 	<ul style="list-style-type: none"> - Video-Konferenzen mit sprachaktiviertem Wechseln des Videos 	<ul style="list-style-type: none"> - Konferenzen in HD-Qualität - Videocodec H.264 	<ul style="list-style-type: none"> - Unterstützung von Konferenzen mit bis zu 10 Teilnehmern 	Nicht verfügbar
Instant Messaging (IM)	<ul style="list-style-type: none"> - Gruppen-Chats - Persistent-Chats - Loggen des Gesprächsverlaufs 	<ul style="list-style-type: none"> - Anwesenheits-Management von Kontakten außerhalb der Open Scape-Anwendung mittels XMPP - persönliche Kontaktlisten 	<ul style="list-style-type: none"> - Echtzeit-Informationen über Kontakte - Anwesenheits-Management von Kontakten - Konferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> - SMS - Sprachnachrichten - Datenübertragung 	Nicht verfügbar
Konferenzen	<ul style="list-style-type: none"> - Konferenz durch Zusammenführen von Gesprächen starten 	<ul style="list-style-type: none"> - Verfügbarkeitsstatus - geplante Starts von Konferenzen - moderierte Konferenzen - Ad Hoc- und Gäste-Konferenzen - Web-Konferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> - Video-, Sprach- und Text-Konferenzen über Desktop-Client oder Telefon - moderierte Konferenzen - geplante Starts von Konferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> - Datenübertragungen zwischen den Konferenz-Teilnehmern - Austausch von Kontaktdaten zwischen den Konferenz-Teilnehmern 	<ul style="list-style-type: none"> - Annahme von Gruppenanrufen - Paging-Funktion von Konferenz-Teilnehmern

3 VoIP-Technologie: Begriffe, Techniken, Codecs, Systeme

Tab. 3.1: Übersicht und Vergleich einiger ausgewählter VoIP-Systeme (Fortsetzung)

	Cisco UC Manager	Open Scape	Lync	Skype	SPA 9000 Voice System (Hardware)
Mobilität	<ul style="list-style-type: none"> - nahtloser Wechsel zwischen Festnetz- und Mobiltelefonen während eines aktiven Gesprächs - automatisches Zuweisen von Anrufen an Festnetz- und Mobiltelefon in Abhängigkeit des Anrufers 	<ul style="list-style-type: none"> - Mittels One Number Service (ONS) kann über eine einzige öffentliche Nummer das gewünschte Telefon erreicht werden - 3 Modi: UC only / VoIP only / combined - Anwesenheitsstatus - Schneller Zugang zu Konferenzen - Einrichten von bevorzugten Geräten - Verfügbar für BlackBerry, Symbian, Nokia, HP, Windows und Apple 	<ul style="list-style-type: none"> - Konferenzen - Administration der Kontaktliste - parallele Erreichbarkeit von Mobil- und Festnetztelefon 	<ul style="list-style-type: none"> - Zuweisen von Rufnummern an Gesprächspartner, um zu Skype-Preisen zu telefonieren (Skype To Go) 	
Telefonbuch-Funktionalitäten	<ul style="list-style-type: none"> - Automatische Erkennung des Home-Clusters der Kontakte - Optionale Sicherung des Telefonbuchs in der Cloud 	<ul style="list-style-type: none"> - Anzeige der persönlichen Kontakte während der Verbindung zu anderen Unternehmensverzeichnissen 			
Telefon-Funktionalitäten	<ul style="list-style-type: none"> - codierte Anrufe - Konfiguration der Kurzwahl-tasten - Anruf-Warteschlangen - Mehrstufiges "Precedence & Preemption" für SIP-Telefone - Anrufweiterleitung - Start-/Stopp-Aufnahmetaste - E911-Unterstützung für mobile Mitarbeiter - Konferenzen 	<ul style="list-style-type: none"> - schneller Zugriff auf wichtige Kontakte - Konferenzen - Rückruf-Funktionalität - Weiterleitung 	<ul style="list-style-type: none"> - Gesprächsverwaltung: Halten, Umleiten, Verteilen und Wiederaufnahmen - Gesprächspriorisierung - Reaktionsgruppen mit benutzerdefinierten Antworten und Umleitung zu Hotlines und Helpdesks - QoS-Tools (u.a. Priorisierung) 	<ul style="list-style-type: none"> - kostenloses Verbindungen zu weiteren Skype-Nutzern - Handy- und Festnetztelefonate zu günstigen Tarifen - Konferenzen mit bis zu 25 Teilnehmern - Eigene Skype-Nummer - Umleiten von Anrufen - Anzeige von eingehenden Anrufen - Click-to-Call 	<ul style="list-style-type: none"> - mehrere interne Durchwahlnummern je VoIP-Verbindung - Weiterleitung eingehender Anrufe an mehrer Durchwahlen (sequenziell, Round Robin, Zufall) - Telefon-Management-Server - Zuweisen von Wählplänen an die Durchwahlnummern - Proxy-Protokollierung von SIP-Nachrichten
Software-Spezifikationen	<ul style="list-style-type: none"> - Anwesenheits-Management sowohl in PSTN- als auch PBX-Geräten - Verbesserte Toleranz gegenüber der Ende-zu-Ende-RTT (Round Trip Delay) - Administration von Codec-Einstellungen und -Priorisierungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Implementierung des SIP-Protokolls unabhängig vom eingesetzten Medium - Unterstützung von Web-, Desktop-, Telefon- und mobiler Clients - Integration in GoogleMail, Lotus und Microsoft Exchange möglich - Integration in GoogleMail, Lotus und Microsoft Exchange möglich - beinhaltet Softphone-Funktionalität 	<ul style="list-style-type: none"> - Möglichkeit der Integration in bestehende Hard- und Software - Anwesenheits-Management sowohl in PSTN- als auch PBX-Geräten - Tools zur Störgeräuscherkennung - Integration von GoogleTalks, Windows Live, AOL und Yahoo in das eigene Instant Messaging - Ausgabe von Statusinformationen über die Kontaktliste 	<ul style="list-style-type: none"> - Ausgabe von Statusinformationen über die Kontaktliste 	<ul style="list-style-type: none"> - Integrierter Media-Proxy oder ein direktes RTP-Routing zu dem Service-Provider - 2 FXS-Ports zum Anschluss von Telefonen, Fax-Geräten und Medien-Adapter - Fax-Support mittels G.711-Passthrough oder T.38 - Echounterdrückung mittels G.165

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

Für die Übertragung der Sprachdaten während eines VoIP-Gesprächs werden unterschiedliche Protokolle verwendet, die mittels Kapselung (Encapsulation) Metadaten in den Datenpaketen unterbringen, um so entsprechende Funktionalitäten zu gewährleisten. Auf diese Weise werden die zu übertragenden Datenpakete von den oberen Schichten zu der untersten Schicht (vgl. ISO/OSI-Referenzmodell, Tab. 1.1) durchgereicht, wobei jede Schicht die Daten der jeweils höheren Schicht entgegennimmt, ihre eigenen Informationen (Header bzw. Footer) hinzufügt und das Ergebnis anschließend an die nächsttiefere Schicht weiterleitet.

Im Folgenden werden die wichtigsten von einem VoIP-Dienst verwendeten Protokolle aufgelistet und kurz beschrieben.

– *IP (Internet Protocol)* [56]

Das vornehmliche Kommunikationsprotokoll der TCP/IP-Protokollfamilie der Netzwerkschicht (Schicht 3) des ISO/OSI-Referenzmodells (vgl. Tab. 1.1). Es ermöglicht das Adressieren von Hosts und das Routen von Datenpaketen (Datagramme) innerhalb eines oder mehrerer IP-Netze(s).

– *UDP (User Datagram Protocol)* [119]

Neben TCP das wichtigste Transportprotokoll (vgl. Schicht 4 in Tab. 1.1) im Internet. Im Gegensatz zu dem TCP-Protokoll handelt es sich bei UDP um ein simples Protokoll, welches verbindungslose Übertragungen ohne Empfangsbestätigungen ermöglicht und kein wiederholtes Senden von verloren gegangenen Daten unterstützt. Aufgrund des limitierten Funktionsumfangs des Protokolls und des daraus resultierenden geringen Overheads bietet es hohe Übertragungsraten und eignet sich daher u.a. zur Übertragung der Sprachpakete während einer VoIP-Verbindung.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

– *RTP (Real-time Transport Protocol)* [20]

Standard-Transportprotokoll (vgl. Schicht 4 in Tab. 1.1) für die Übertragung von verzögerungsempfindlichen Daten (Audio- oder Video-Streaming). Es setzt direkt auf dem UDP-Protokoll auf und fügt Informationen hinzu, die auf Seiten des Empfängers u.a. für das Feststellen von Paketvertauschungen bzw. -verlusten oder die Bestimmung der Variation der Ankunftszeiten der Pakete (Jitter, vgl. Abschn. 6.2.2) verwendet werden können.

– *RTCP (Real-time Transport Control Protocol)* [20]

Das Transportprotokoll RTCP (vgl. Schicht 4 in Tab. 1.1) wird als Teil des RTP-Protokolls eingesetzt und stellt mittels periodischer Übermittlungen von statistischen Kontrollinformationen Rückmeldungen zur Qualität der Datenübertragung zur Verfügung. Anhand dieser zusätzlichen Informationen ist u.a. eine flexible Anpassung der verwendeten Kodierungsrate an die aktuellen Gegebenheiten des Netzwerkes möglich. Es bietet außerdem Funktionalitäten, mittels Korrelation und Synchronisation unterschiedliche Medienströme, wie u.a. Audio- und Videoströme, kombiniert zu übertragen. Zusätzlich werden allen teilnehmenden Hosts anhand der SDES-Nachricht (Source Description) Informationen über den sendenden Host bereitgestellt.

In den folgenden beiden Abschnitten werden 2 weitere Protokolle bzw. Protokollfamilien vorgestellt, die eine entscheidende Rolle bei der Signalisierung von VoIP-Verbindungen spielen.

4.1 Kommunikationsabläufe bei H.323

In der entsprechenden Rahmenspezifikation der ITU-T [72] werden Komponenten und Protokolle spezifiziert, die eine audiovisuelle Kommunikation in paketvermittelnden Netzen ermöglichen. Der H.323-Standard war der erste VoIP-Standard, der das RTP zur Übermittlung der Audiodaten eingesetzt hat. Folgende Komponenten werden definiert:

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

– *Terminals*

Für bidirektionale Multimedia-Echtzeit-Kommunikation eingesetzte Endgeräte, auf denen sowohl der H.323-Protokoll-Stack als auch die entsprechenden Multimedia-Anwendungen installiert sind.

– *Gateways*

Gateways verbinden H.323- mit nicht-H.323-Netzwerken, wie z.B. einem PSTN. Hier werden Protokoll-Funktionalitäten übersetzt, Medienformate konvertiert und Informationen zwischen den Netzwerken ausgetauscht.

– *Gatekeeper*

Die Schaltzentrale hinsichtlich der Signalisierung innerhalb eines H.323-Netzwerkes. Er bietet eine Reihe wichtiger Dienste, wie u.a. die Adressierung und Authentifizierung der Terminals und Gateways, die Verwaltung der zur Verfügung stehenden Bandbreite und die Gebührenerfassung.

– *MCUs (Multipoint Control Units)*

MCUs bieten Unterstützung für Konferenzschaltungen zwischen 3 und mehr Terminals, wobei jedes Terminal eine eigene Verbindung zu dem MCU aufbaut. Dieser verwaltet die Ressourcen und handelt den zu verwendenden Codec zwischen den beteiligten Terminals aus.

Die Übertragung von Audio- und Video-Daten erfolgt mittels UDP, da die bei der Verwendung von TCP eingesetzten Fehlerkorrektur-Mechanismen zu einer Minderung der Qualität führen würden. Das verbindungslose UDP ist aber grundsätzlich nicht für Echtzeit-Übertragungen geeignet. Daher erfolgt eine entsprechende Aufbereitung durch RTP bzw. RTCP, sodass der Empfänger zusätzliche Zeit- und Synchronisationsinformationen erhält. Tab. 4.1 zeigt einen Überblick über die H.323-Protokollfamilie.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

Tab. 4.1: H.323-Protokollfamilie [10]

Audio-Codec	Video-Codec	Steuerung & User-Interface			Daten
G.711	H.261	RAS Control H.225	Call Control H.225	Media Control H.245	T.120
G.722	H.263				
G.723					
G.728					
G.729					
RTP / RTCP					
UDP			TCP		
Netzwerkschicht					
Verbindungsschicht					
Physikalische Schicht					

Die H.323-Protokollfamilie lässt sich in 3 Teilbereiche unterteilen:

- *H.225-RAS-Signalisierung (Registration, Admission and Status)*
Austausch von Signalisierungsnachrichten zwischen den Gateways und dem entsprechenden Gatekeeper mittels eines separaten RAS-Kanals. Dieser wird vor allen weiteren Kanälen geöffnet und findet unabhängig von den übrigen Kanälen für den Verbindungsaufbau und für die eigentliche Datenübertragung Verwendung. Gesteuert wird hier die Registrierung, die Zugangskontrolle, der Status, die Abmeldung gegebenenfalls Änderungen der aktuellen Bandbreite.
Die Realisierung dieses Teils des H.225-Protokolls ist nur notwendig, falls die H.323-Implementierung einen Gatekeeper vorsieht.
- *H.225-Verbindungskontroll-Signalisierung (Call Control Signaling) und -Verbindungsaufbau-Signalisierung (Call Setup Signaling)*
Ermöglicht den Aufbau und die Kontrolle von Verbindungen zwischen den H.323-Endgeräten. Über einen separaten Kanal werden Nachrichten zwischen den Endgeräten bzw. zwischen den Endgeräten und einem Gatekeeper ausgetauscht. Als Grundlage dient die ITU-T-Empfehlung Q.931 [82], welche die Signalisierung auf der 3.Schicht im ISDN beschreibt. Folgende Q.931-Nachrichten können verwendet werden:
 - Setup,
 - Call Proceeding,
 - Connect,
 - Release Complete.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

– *H.245-Medienkontrolle (Media Control)*

Das H.245-Protokoll regelt den Austausch von Kontrollnachrichten zwischen den einzelnen H.323-Komponenten und etabliert logische Kanäle für die Übertragung der Mediendaten. Zum Einsatz kommen folgende Nachrichtentypen:

- Maintenance Loop Messages,
- Master Slave Determination Messages,
- Multiplex Table Signaling Messages,
- Conference Request and Response Messages,
- Terminal Capability Messages,
- Logical Channel Signaling Messages,
- Request Multiplex Table Signaling Messages,
- Communication Mode Messages,
- Request Mode Messages,
- Conference Request and Response Messages,
- Terminal-ID,
- Round Trip Delay Messages,
- Commands and Indications.

Außerdem werden von der ITU-T mit der H.450.x-Serie eine Reihe zusätzlicher Dienste definiert, mit denen Funktionalitäten ermöglicht werden, die über reine VoIP-Verbindungen hinausgehen. Realisiert werden diese Dienste in den Terminals, da im Gegensatz zu Festnetzen keine zentralen Knoten existieren, die diese implementieren könnten. Die H.450.x-Serie umfasst folgende Dienstmerkmale:

- H.450.1: “Generic functional protocol for the support of supplementary services in H.323” (Allgemeines Funktionsprotokoll zur Unterstützung von zusätzlichen Diensten in H.323)
- H.450.2: “Call transfer supplementary service for H.323” (Anrufübertragung)
- H.450.3: “Call diversion supplementary service for H.323” (Rufumleitung)
- H.450.4: “Call hold supplementary service for H.323” (Halten und Ruf heranzholen)
- H.450.5: “Call park and call pickup supplementary for H.323” (Parken einer Verbindung)
- H.450.6: “Call waiting supplementary for H.323” (Anklopfen)

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

- H.450.7: “Message waiting indication supplementary service for H.323“ (Anzeigen einer wartenden Nachricht)
- H.450.8: “Name identification supplementary service for H.323“ (Namensidentifizierung)
- H.450.9: “Call completion supplementary Services for H.323“ (Automatischer Rückruf)
- H.450.10: “Call offer supplementary service for H.323“ (Variante des Ruf-Anklopfens)
- H.450.11: “Call intrusion supplementary service for H.323“ (Aufschalten von Rufen)
- H.450.12: “Common information additional network feature for H.323“ (Allgemeine, ergänzende Netzwerkeigenschaften)

Der Aufbau einer VoIP-Verbindung in einem H.323-System kann entweder über einen Gatekeeper oder direkt zwischen den Endgeräten realisiert werden. Der Einsatz eines Gatekeepers ist der in der Praxis häufiger auftretende Fall und wird in Abb. 4.1 und Abb. 4.2 veranschaulicht.

Bei einer solchen Verbindung können 5 Phasen unterschieden werden:

1. Rufauslösung
2. Initiale Kommunikation und Austausch von Fähigkeiten
3. Verbindungsaufbau
4. Anrufdienste (z.B. Bandbreiten-Management)
5. Anrufzustellung

Die Verbindungsphasen ohne die Verwendung eines Gatekeepers zeigt im Anschluss die Abb. 4.3. Bei den in den Abb. 4.1 bis Abb. 4.3 unterhalb der Teilnehmer gezeigten Zahlen handelt es sich um beispielhafte Ports, die für den Versand bzw. Empfang der entsprechenden Befehle verwendet werden.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

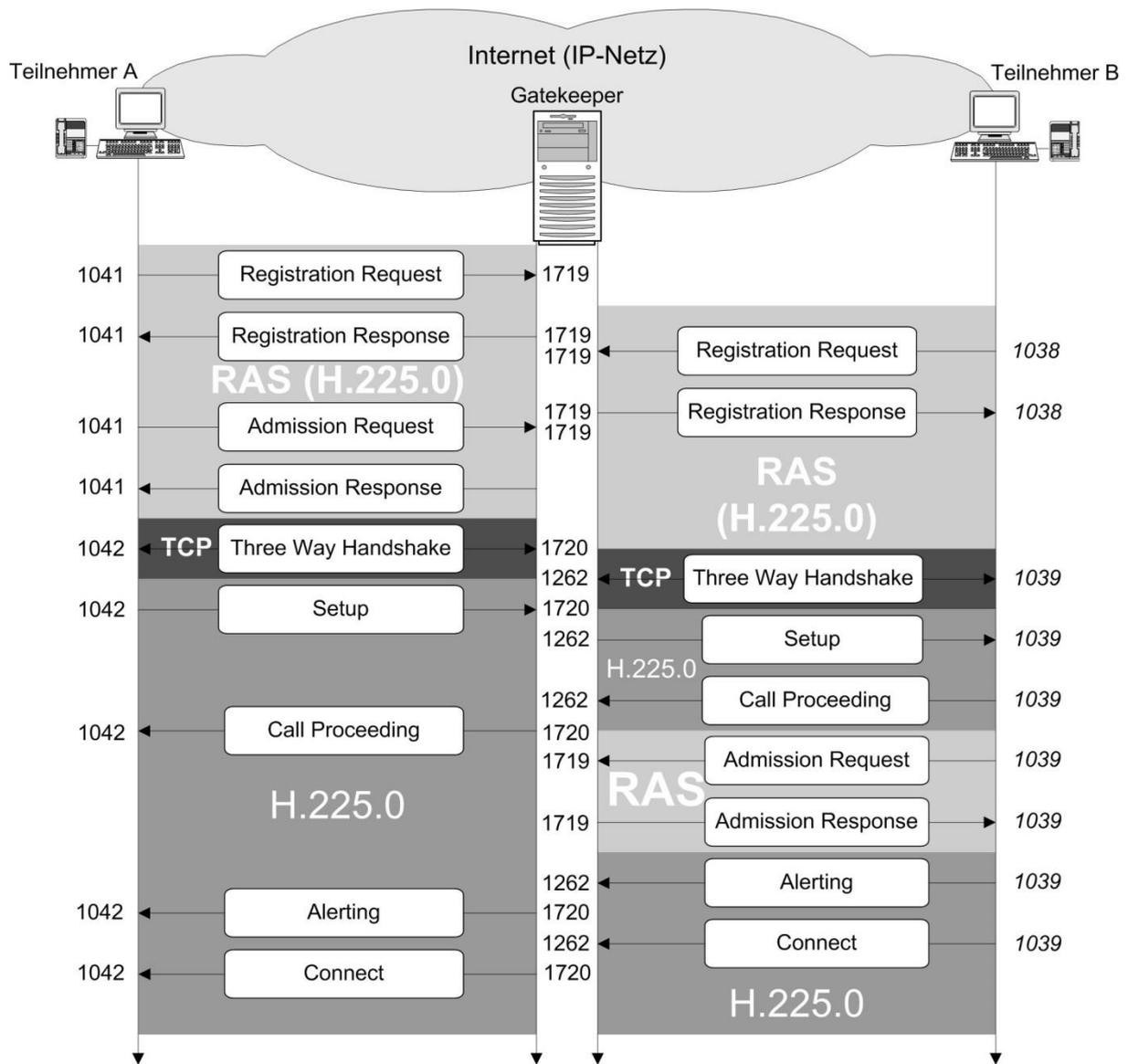


Abb. 4.1: Verbindungsaufbauphase einer H.323-Verbindung mit Gatekeeper [23]

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

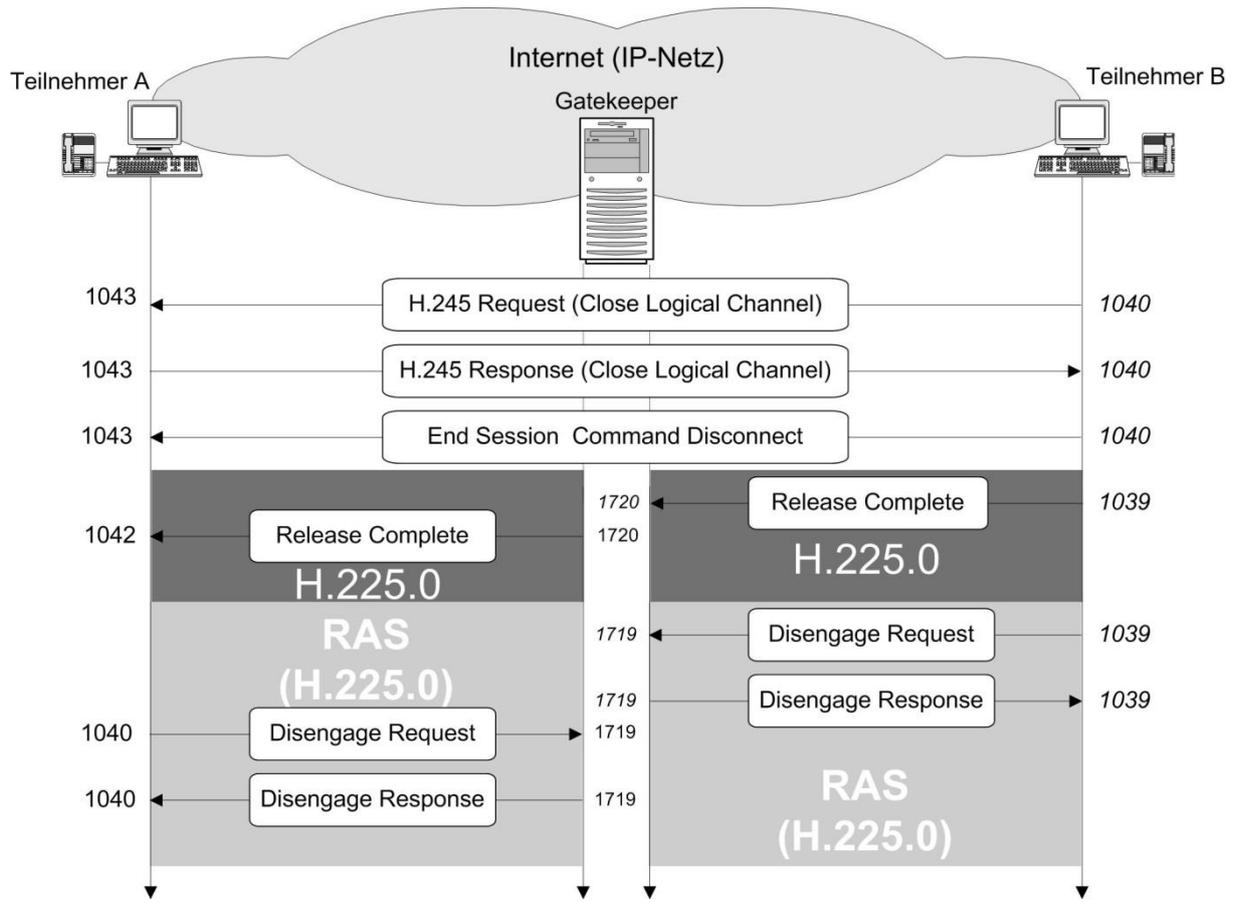


Abb. 4.2: Verbindungsabbauphase einer H.323-Verbindung mit einem Gatekeeper [23]

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

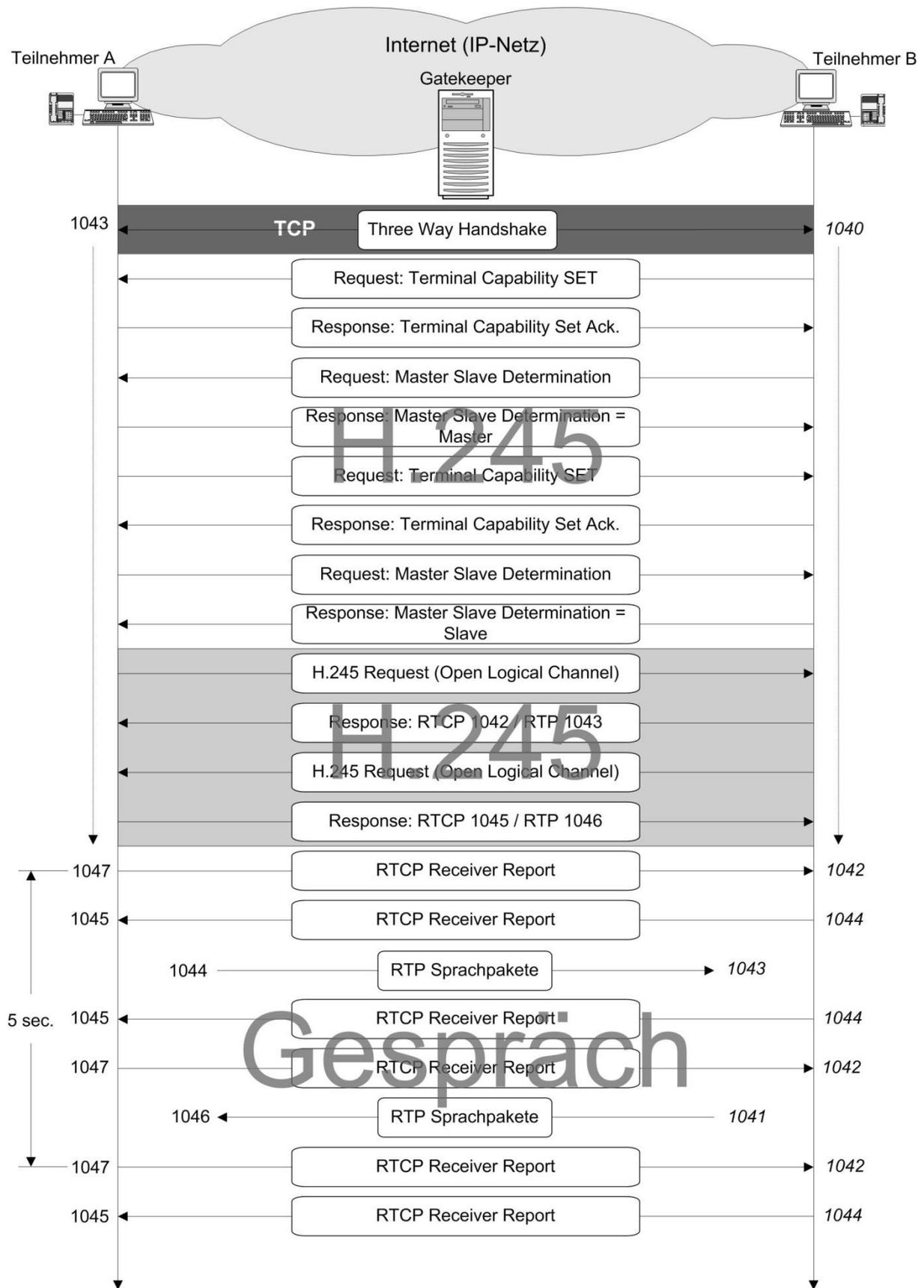


Abb. 4.3: Verbindungsaufbauphasen einer H.323-Verbindung ohne Gatekeeper [23]

4.2 Kommunikationsabläufe bei SIP

SIP [19] ist der IETF-Standard für den Aufbau von VoIP-Verbindungen. Eingesetzt wird das Protokoll auf der Anwendungsschicht des ISO/OSI-Referenzmodells (vgl. Tab. 1.1) und ist dort für den Aufbau, die Modifizierung und das Beenden von Sessions mit einem oder mehreren Teilnehmern verantwortlich. Im Gegensatz zu H.323 wurde das Protokoll mit Blick auf die Charakteristiken von IP-Netzwerken entwickelt. Das Design lehnt sich an die Client-Server-Architektur von HTTP an. Anfragen werden von einem Client generiert und an den Server gesendet. Dieser verarbeitet die Nachrichten und überträgt anschließend Antworten an den Client. Eine Anfrage und die entsprechenden Antworten ergeben eine Transaktion. Mittels INVITE- und ACK-Nachrichten definiert das Protokoll den Vorgang zum Öffnen eines zuverlässigen Kanals, über den die Kontrollnachrichten übertragen werden. Da es auf diese Weise für die Zuverlässigkeit der Verbindungen sorgt, ist es nicht auf die Zuverlässigkeit von TCP angewiesen. Das Übermitteln von Medien-Details (z.B. Codec und Bitrate) und den Netzadressen erfolgt durch das Session Description Protocol (SDP) [48], welches kein direkter Bestandteil des SIP-Standards ist.

Tab. 4.2: SIP-Protokollfamilie (in Anlehnung an [23])

Audio-Codec	Video-Codec	Steuerung & User-Interface		Daten
G.711 G.722 G.723 G.728 G.729	H.261 H.263	SIP	SIP	T.120
RTP / RTCP				
UDP			TCP	
Netzwerkschicht				
Verbindungsschicht				
Physikalische Schicht				

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

SIP stellt 5 Aspekte für den Aufbau und das Beenden von Verbindungen zur Verfügung:

- *User Location*
Benutzer können sich an einen anderen Standort begeben und können von dort auf ihre Dienste zugreifen. Dazu wird der aktuelle Aufenthaltsort anhand der IP-Adresse mittels DNS (Domain Name System) [99] [100] ermittelt.
- *Session Setup*
Aufbau eines Anrufs mit den vereinbarten Session-Parametern.
- *Session Management*
Das Session Management ermöglicht die Übertragungen und das Beenden von Sessions, das Modifizieren von Session-Parametern und das Aufrufen von Diensten.
- *User Availability*
Bestimmung der Bereitschaft des Angerufenen, die Kommunikationsanfrage entgegenzunehmen.
- *User Capabilities*
Festsetzen der während der Verbindung zu verwendenden Medien-Parameter.

SIP-Systeme setzen sich aus 2 Arten von Komponenten zusammen:

- *User Agents*
Ein User Agent ist ein System, das im Auftrag eines Benutzers handelt. Es setzt sich aus einem User Agent Client (UAC) und einem User Agent Server (UAS) zusammen. Der UAC initialisiert SIP-Anfragen, während der UAS die Anfragen verarbeitet und im Namen des Benutzers entsprechende Antworten zurücksendet.
- *Network Servers*
Es existieren unterschiedliche Arten von Servern in SIP-Systemen:
 - *Registrar Server* nehmen REGISTER-Nachrichten entgegen und leiten die enthaltenen Adressinformationen (SIP- und dazugehörige IP-Adresse) an den Location-Server der entsprechenden Domäne.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

- *Proxy Server* nimmt Anfragen entgegen und leitet sie über die eigene Adresse an Komponenten weiter, die sich dichter an dem angerufenen Gerät befinden.
- *Redirect Server* werden im Laufe der Session-Initialisierung eingesetzt und haben die Aufgabe, die Adresse des angerufenen Gerätes mittels des Location-Servers zu ermitteln. Sie teilen dem anrufenden Gerät die neuen Adresdaten mit und weisen den UAC an, eine alternative Zieladresse zu verwenden.
- Der *Location-Server* wird sowohl von den Redirect- als auch von den Proxy-Servern verwendet, um Informationen über den Angerufenen zu erhalten. Zu diesem Zweck führt es eine Datenbank von SIP- und IP-Adressen.

Jedes Endsystem in einem SIP-System kann anhand eines eindeutigen Universal Resource Identifiers (URI) identifiziert werden. Bei einer Ressource kann es sich u.a. um den Benutzer eines Online-Dienstes, eine Mailbox oder eine Telefonnummer handeln. SIP-URIs besitzen in Anlehnung an das Simple Mail Transfer Protocol (SMTP) [89] das eMail-Adressformat und können zusätzlich noch weitere Parameter wie Passwörter und Ports enthalten. URIs können u.a. folgende Strukturen aufweisen:

- user@IP-Adresse
- user@domain
- phone-number@domain

Die Kommunikation innerhalb eines SIP-Systems findet anhand von Request- und Response-Nachrichten statt, die wiederum in weitere Nachrichtentypen und –klassen unterteilt werden können. Tab. 4.3 und Tab. 4.4 geben einen Überblick über die Request-Typen und die Response-Klassen.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

Tab. 4.3: SIP Request-Typen und ihre Verwendung [23]

INVITE	Initiiert einen Anruf, enthält SIP-Adressen beider Teilnehmer (des Rufenden und Gerufenen), die Priorität u.a. mehr.
BYE	Initiiert den Abbau einer Verbindung.
ACK	Acknowledgement ist eine positive Bestätigung und bestätigt die Annahme eines Anrufes.
OPTIONS	Dient der Erfragung der Fähigkeiten eines Teilnehmers bzgl. verfügbarer Medientypen oder Codierv Verfahren.
CANCEL	Abbrechen und Beenden einer bestehenden Verbindung.
REGISTER	Ein Teilnehmer übermittelt dem Registrar-Server seine Lokation, also welches IP-Telefon er benutzt.
INFO	Dieses wird zum zusätzlichen Austausch von Informationen während einer bestehenden RTP-Session verwendet. (s. RFC 2976)
PRACK	Sogenannte Provisional Response (PR) können hiermit bestätigt werden, um eine zuverlässige Übertragung zu garantieren. (RFC3262)
UPDATE	Bestimmte Parameter können hiermit bereits beim Aufbau einer RTP-Session verändert werden. (RFC3311)
MESSAGE	Dieser Typ gehört zur SIP-Erweiterung gemäß RFC3428, die für Instant Messaging benötigt wird.
REFER	Refer wurde eingeführt, um sog. Session Transfer zu realisieren (RFC3515)
SUBSCRIBE/NOTIFY	Kann verwendet werden, um bestimmte Ereignisse zu übermitteln. (RFC3261 und 3265)

Tab. 4.4: SIP Response-Klassen und ihre Verwendung [23]

1xx = Informational	Informiert den Absender, dass sein Request weiter bearbeitet wird. (z.B. 100 = Trying, 180 = Ringing)
2xx = Success	Teilt dem Absender mit, dass sein Request erfolgreich empfangen und akzeptiert wurde. (z.B. 200 = OK)
3xx = Redirection	Signalisiert dem Absender, dass für die Bearbeitung und Weiterleitung seines Requests weitere Aktionen nötig sind. (z.B. 301 = Moved Permanently, 302 = Moved Temporarily)
4xx = Client-Error	Zeigt dem Absender an, dass der Request eine falsche Syntax enthält oder vom Server nicht ausgeführt werden kann. (z.B. 400 = Bad Request, 401 = Unauthorized, 403 = Forbidden, 404 = Not Found, 406 = Not Acceptable, 486 = Busy Here)
5xx = Server-Error	Hiermit wird dem Absender signalisiert, dass der Server nicht in der Lage war, den Request auszuführen. (500 = Internal Server Error, 501 Not Implemented, 502 = Bad Gateway, 505 SIP Version not supported)
6xx = Global-Failure	Dieser Response signalisiert, dass der Request auf keinem der Server ausgeführt werden konnte. (600 = Busy Everywhere, 606 = Not Acceptable)

SIP-Systeme können mit Proxy-, mit Redirect- oder mit einer Kombination aus beiden Server-Typen betrieben werden. Es werden daher zwischen 2 unterschiedlichen Betriebsmodi (Proxy- und Redirect-Mode) unterschieden, die im Folgenden beschrieben werden.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

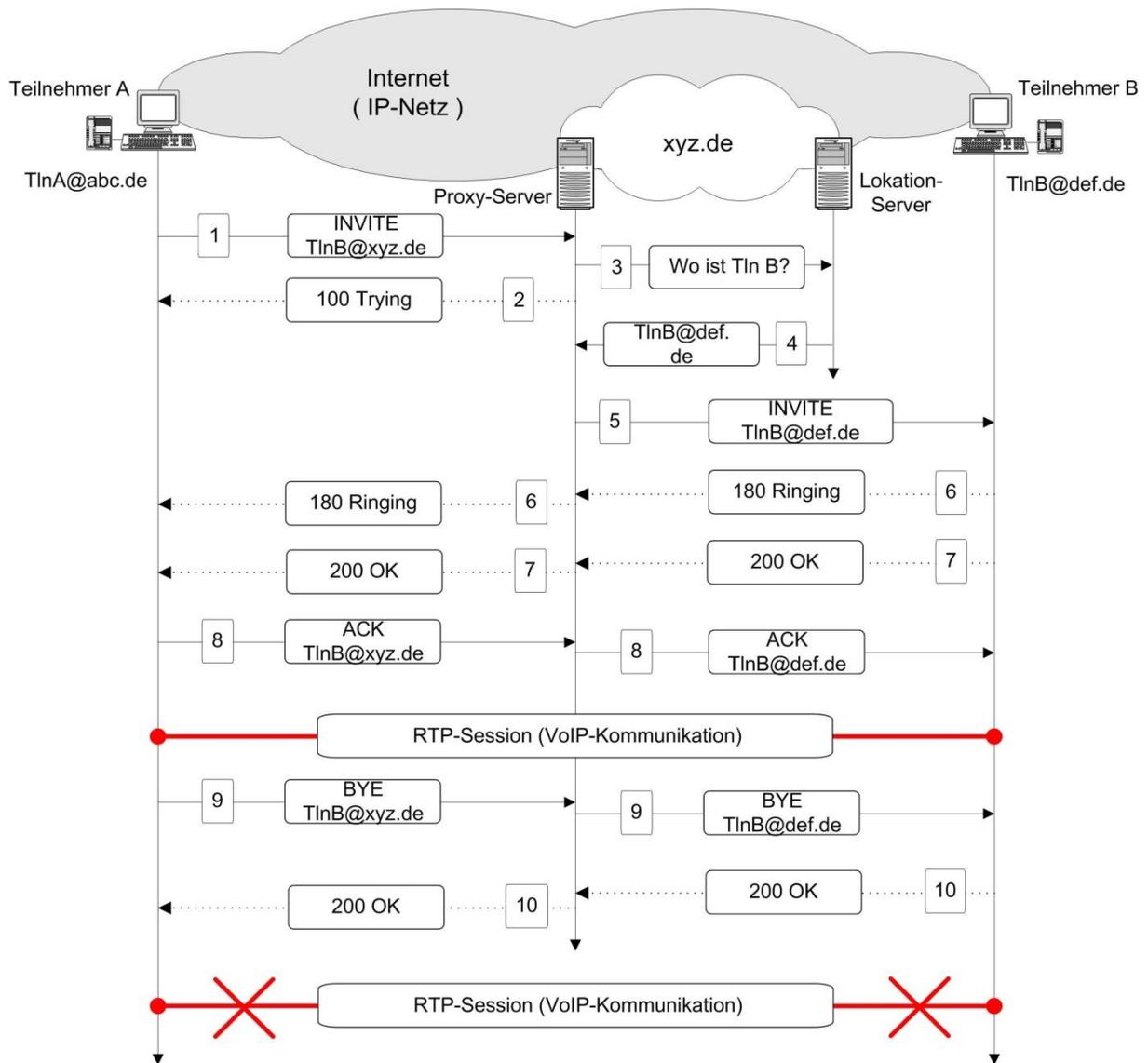


Abb. 4.4: SIP-Kommunikationsablauf im Proxy-Mode (in Anlehnung an [23])

Im Proxy-Mode sendet das anrufende Gerät eine INVITE-Nachricht an den Proxy-Server. Dieser hat die Aufgabe, mittels der in der Nachricht enthaltenen SIP-Adresse und des Location-Servers die IP-Adresse des angerufenen Teilnehmers zu ermitteln. Abb. 4.4 skizziert den Kommunikationsablauf für eine Anfrage an einen Proxy-Server der Domäne def.de.

Die Anfrage des Proxy-Servers an den Location-Server findet mittels des Lightweight Directory Access Protocols (LDAP) [142] statt. Anhand der neuen Adresse ist der Proxy-Server anschließend in der Lage, die Anfrage an Teilnehmer B weiterzuleiten. Dieser gleicht nun seine eigenen mit den angefragten Fähigkeiten ab und entscheidet, ob die RTP-Session aufgebaut werden kann. Ein erfolgreiches INVITE führt dazu, dass eine positive Response-Nachricht (Code 180=Ringung) über den Proxy-Server zurück an den anrufenden Teilnehmer

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

A übermittelt wird. Sobald Teilnehmer B den Anruf entgegennimmt, wird dies ebenfalls wieder über den Proxy-Server Teilnehmer A mitgeteilt (Code 200=OK). Die anschließende Bestätigung durch Teilnehmer A findet anhand einer ACK-Nachricht statt und wird wiederum über den Proxy-Server an Teilnehmer B übermittelt. Zu diesem Zeitpunkt ist die Verbindung aufgebaut und die Übertragung der Sprachdaten kann beginnen. Nach dem Auflegen wird eine BYE-Nachricht gesendet, auf die mit einer positiven Response-Nachricht (Code 180=Ringling) geantwortet wird. Nach dem Empfang dieser Nachricht wird die RTP-Session abgebaut.

Die Verwendung von Redirect-Servern in dem entsprechenden Mode (vgl. Abb. 4.5) erlaubt den beteiligten Geräten im Gegensatz zu dem Proxy-Mode eine direkte Kommunikation untereinander auf IP-Ebene. Die INVITE-Nachricht des anrufenden Teilnehmers A wird an den Redirect-Server gesendet, der für die Domäne zuständig ist, in der sich der angerufene Teilnehmer B befindet. Dieser stellt eine Anfrage an den Location-Server. Sollte sich die ermittelte Adresse außerhalb der Heimatdomäne befinden, wird die entsprechende SIP-Adresse anhand einer Response-Nachricht (Code 302=Moved Temporarily) an Teilnehmer A gesendet, der den Empfang durch eine ACK-Nachricht an den Redirect-Server bestätigt. Zu diesem Zeitpunkt ist eine direkte Kommunikation zwischen den beiden Teilnehmern ohne den Redirect-Server möglich. Die INVITE-Nachricht an Teilnehmer B wird nach einem erfolgreichen Abgleich der Fähigkeiten mit einer positiven Response-Nachricht (Code 180=Ringling) beantwortet. Die folgenden Kommunikationsschritte und der spätere Abbau der Verbindung erfolgen entsprechend dem Proxy-Mode.

4 Kommunikationsabläufe bei VoIP-Verbindungen

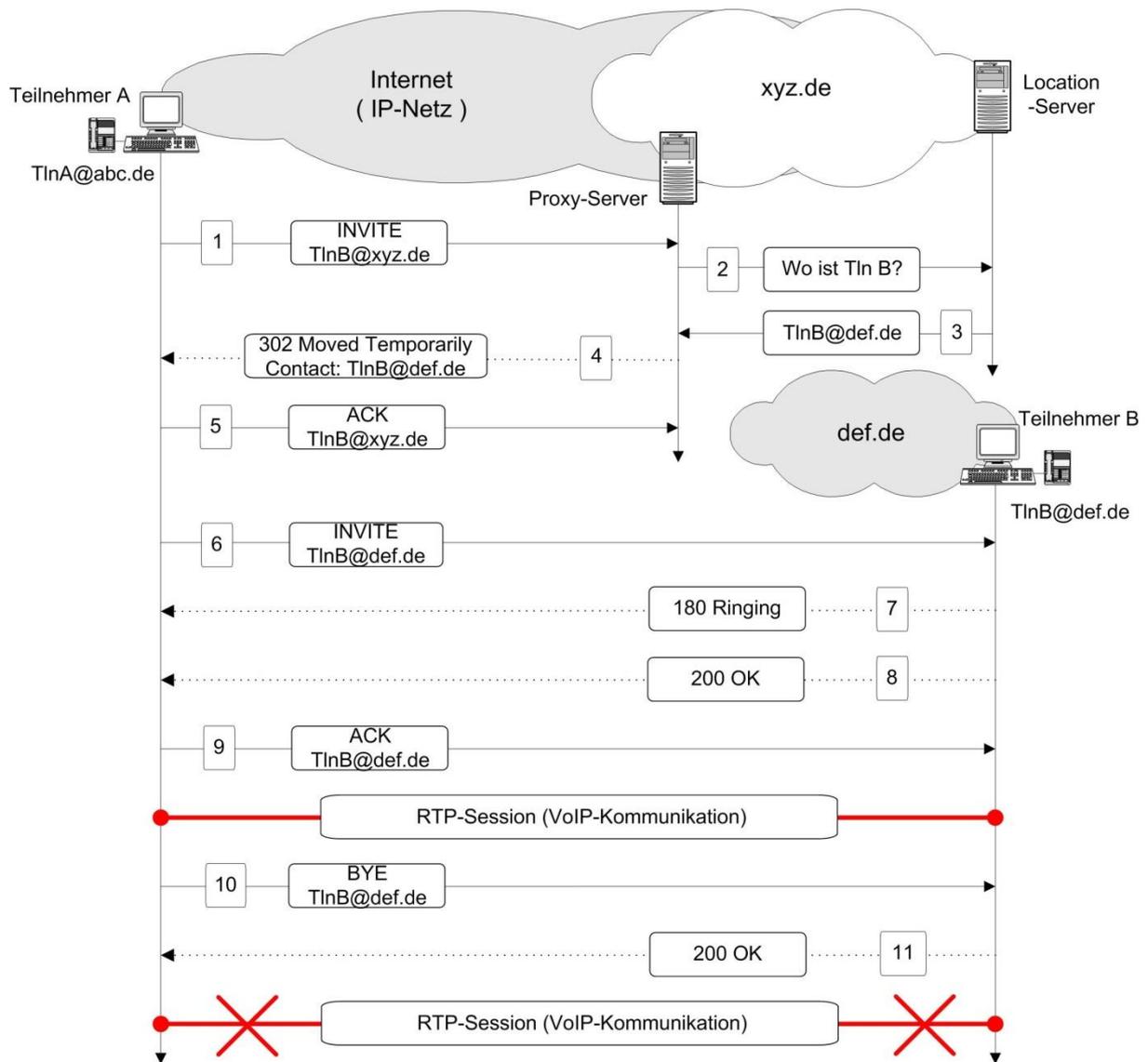


Abb. 4.5: SIP-Kommunikationsablauf im Redirect-Mode (in Anlehnung an [23])

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Der Dienst VoIP erfordert einen gewissen Grad an QoS, um eine angemessene Leistung und Nutzerakzeptanz zu erzielen. Es wurden zahlreiche Techniken entwickelt, mit deren Hilfe QoS in paketbasierenden Netzwerken realisiert werden kann. Die wichtigsten Mechanismen sind: Überdimensionierung, Priorisierung und Reservierung. Die simpelste Herangehensweise besteht in einer Überdimensionierung des Netzwerks. Hier werden sowohl die Übertragungs- als auch die Verarbeitungsgeschwindigkeiten durch den Einsatz entsprechender Medien und Komponenten derart dimensioniert, dass die Entstehung von Engpässen im Netzwerk hinreichend selten gemacht wird. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Priorisierung des Datenverkehrs. Differentiated Services (DiffServ) (vgl. Abschn. 5.3) stellt anhand der Markierung der IP-Pakete eine Priorisierung bereit, während die Standards IEEE 802.1p/Q [55] die Priorisierung auf der Netzsicherungsschicht zur Verfügung stellen (vgl. Abschn. 5.1). Integrated Services (IntServ) wiederum ermöglicht die Reservierung von Ressourcen mittels des flussbasierten Resource Reservation Protocols (RSVP) (vgl. Abschn. 5.4). Um eine Priorisierung zu realisieren, ist es zunächst notwendig, die durch VoIP-Dienste generierten Datenpakete zu identifizieren. Unter [32] wird eine Methode vorgestellt, die es ermöglicht, VoIP-Datenströme zu erkennen und zu klassifizieren. Gerade die Verwendung proprietärer Protokolle (vgl. Skype [127]) erschwert dieses Vorhaben und setzt den Einsatz heuristischer Methoden voraus, um so die entsprechenden Header-Informationen auszuwerten.

Ebenfalls zur QoS trägt das Multi Protocol Label Switching (MPLS) (vgl. Abschn. 5.2) bei. Es fügt zusätzliche Paket-Header hinzu, mit deren Hilfe u.a. die Vermittlungszeiten verkürzt werden können. Ein weiterer Ansatz ist das Anpassen des Netzwerks an die QoS-Anforderungen. Hier wäre u.a. die Kopplung der gesendeten Datenmenge an die momentane Netzwerk-Last zu nennen (vgl. Adaptiver Multi-Rate-Codec (AMR) [69]). Ergänzende Methoden optimieren den Jitterbuffer (vgl. Abschn. 6.2.2) hinsichtlich der auftretenden Paketverluste und den verbliebenden Verzögerungen [39] [95].

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Alle zuvor genannten Beispiele versuchen, die QoS-Parameter des Netzwerkes (Paketverluste, Verzögerungen, Jitter) (vgl. Abschn.6.2) zu verbessern. Im Gegensatz zu diesem Ansatz besteht die Möglichkeit, den Einfluss dieser Parameter auf den VoIP-Dienst zu verringern. Entsprechende Techniken senden u.a. zusätzliche redundante Daten [12] [125] oder vermindern den negativen Effekt von Verlusten während des Dekodierens (Packet Loss Concealment (PLC)). Die gängigen QoS-Techniken im Rahmen des TCP/IP-Referenzmodells zeigt die Abb. 5.1.

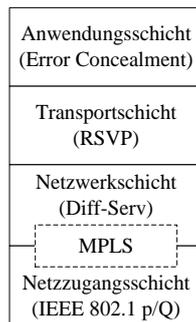


Abb. 5.1: QoS-Verfahren in dem TCP/IP-Modell (in Anlehnung an [23])

Im Weiteren werden die zuvor erwähnten QoS-Techniken näher beschrieben.

5.1 IEEE 802.1p/Q

Die Standards 802.1p und 802.1Q der IEEE beschreiben Techniken zur Sicherung der QoS auf Ethernet-Ebene mittels Priorisierung. Zu diesem Zweck wird der Datenverkehr entsprechenden VLANs (Virtual Local Area Networks) zugeordnet. Dabei handelt es sich um logische Teilnetze innerhalb eines physischen Netzwerkes. Die Ethernet-Frames werden nicht neu gekapselt, sondern ein zusätzlicher 4 Bytes-Header zwischen der MAC-Adresse der Quelle und dem T/L-Feld (Type or Length) eingefügt (vgl. Abb. 5.3). Die maximale Framegröße erhöht sich durch den Einsatz dieser Standards von 1518 Bytes auf 1522 Bytes.

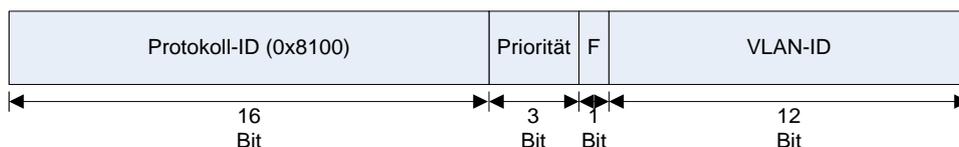


Abb. 5.2: Struktur des 802.1Q-Headers (in Anlehnung an [55])

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

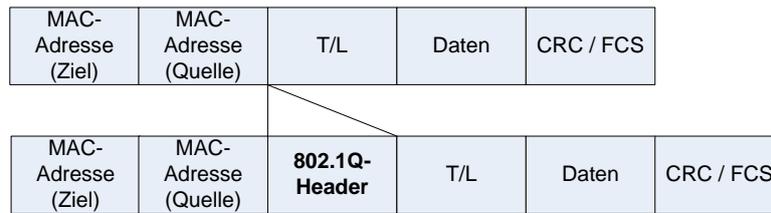


Abb. 5.3: Einfügen des 802.1Q-Headers in das Ethernet-Frame (in Anlehnung an [55])

Abb. 5.2 zeigt den Aufbau eines 802.1Q-Headers. Die ersten 2 Bytes haben den Wert 0x8100 und kennzeichnen das Frame als ein 802.1Q-Frame. Es befindet sich an der Position, an der sich zuvor das Type/Length-Feld des Ethernet-Frames befand. Die folgenden 3 Bit bilden die CoS (Class of Service) des Standards und entsprechen einer Prioritätsstufe. Die 8 möglichen Prioritäten werden in dem Standard 802.1p definiert:

1. Hintergrund-Datenverkehr (Background)
2. Best Effort
3. Bevorzugter Best Effort-Datenverkehr (Excellent Effort)
4. Zeitkritische Anwendungen (Critical Applications)
5. Videodaten (< 100 ms Verzögerung)
6. Sprachdaten (< 10 ms Verzögerung)
7. Kontrolldaten (Internetwork)
8. Kontrolldaten (Network)

Das folgende Flag gibt an, ob das Frame im Falle einer Überlastung verworfen werden darf. Die letzten 3 Bytes ordnen das Frame einem VLAN zu.

5.2 Multi-Protocol Label Switching

Bei Multi-Protocol Label Switching (MPLS) [17] handelt es sich um ein Netzwerk-Protokoll, das in dem OSI-Modell zwischen der 2. und 3. Schicht einzuordnen ist und hier zusätzliche Eigenschaften für den Transport von Daten innerhalb eines Netzwerkes bereitstellt. In traditionellen Netzwerken entscheidet jeder Router anhand seiner Routingtabelle, zu welchem Knoten er das Paket weitersendet (Next Hop). Bei dem Einsatz von MPLS wird der Pfad eines

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Pakets hingegen bereits in dem ersten Router bestimmt. Die einzelnen Schritte, die ein IP-Paket bei der Verwendung des MPLS-Protokolls durchläuft:

- Der erste Router, den das Paket durchläuft, bestimmt sowohl den Zielrouter als auch einen konkreten Pfad zu diesem Netzwerknoden (Label Switched Path (LSP)).
- Auf Basis dieser ermittelten Informationen wird das Paket mit einem Label versehen.
- Jeder weitere Router, den das Paket auf seinem Weg durchläuft, analysiert dieses Label und ist so in der Lage, es an den zuvor ermittelten folgenden Router weiterzuleiten.
- An dem Zielrouter wird das Label entfernt und mittels gewöhnlichem IP-Routing zugestellt.

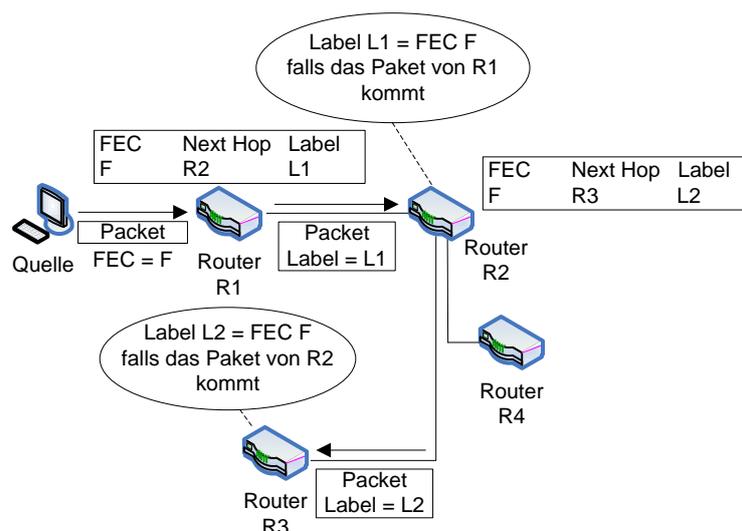


Abb. 5.4: Labels und FECs in einem MPLS-Netzwerk (in Anlehnung an [28])

Abb. 5.4 zeigt den grundsätzlichen Verarbeitungsvorgang eines Datenpaketes innerhalb eines MPLS-Netzwerkes. Bei einer Forwarding Equivalence Class (FEC) handelt es sich um eine Gruppierung von Datenpaketen mit vergleichbaren Charakteristiken (u.a. Ports und Adressen des Quell- und Zielrouters). Router behandeln Pakete mit identischer FEC auf eine ähnliche Art und Weise, sodass diese an denselben Next Hop-Router mit der gleichen Priorität gesendet werden. Das Mapping zwischen den Labels und den Label Switched Paths wird mittels

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Routing-Protokollen, wie u.a. das Label Distribution Protocol (LDP) oder das Resource Reservation Protocol mit Traffic Engineering (RSVP-TE) realisiert.

Die Verwendung des MPLS-Protokolls entlastet die Router eines Netzwerkes, da es sich bei der Bearbeitung des Labels um einen wesentlich simpler zu implementierenden Vorgang handelt als die Ermittlung des Next Hop-Routers mittels seiner Routingtabelle (IP-Routing). Die auf diese Weise erreichte Erhöhung der Vermittlungsgeschwindigkeit hat einen positiven Einfluss auf die Ende-zu-Ende-Verzögerung und somit auf die Dienstgüte.

5.3 Differentiated Services

Die Netzwerk-Architektur Differentiated Services (DiffServ) [5] [8] spezifiziert einen einfachen und skalierbaren Mechanismus zur Klassifizierung und Verwaltung des Netzverkehrs. Es ermöglicht auf eine simple Art und Weise die Priorisierung von unterschiedlichen Arten des IP-Datenverkehrs und befasst sich mit einigen Problematiken von IntServ und RSVP:

– *Skalierbarkeit*

Die Router-Information in Hochgeschwindigkeitsnetzwerken auf einem aktuellen Stand zu halten, kann aufgrund der großen Menge an Datenströmen äußerst komplex werden.

– *Flexible Service-Modelle*

IntServ besitzt nur zwei Klassen von Dienstgüten, während DiffServ eine wesentlich größere Anzahl zur Verfügung stellt.

– *Einfachere Signalisierung*

Einige Anwendungen und Endanwender benötigen möglicherweise eine qualitativere Form des Dienstes.

Durch den Einsatz von DiffServ wird ein kurzes Bitmuster in den einzelnen Paketen verwendet, um an den einzelnen Netzwerkknoten eine entsprechende Weiterleitung bzw. Per-Hop Behavior (PHB) zu realisieren. Das Bitmuster wird gemäß dem IPv4-Type of Service-Oktet (ToS) [56] genutzt, wo es sowohl einen Mechanismus für die Zuordnung von Prioritäten zu

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

den einzelnen IP-Paketen als auch einen Mechanismus zur Anforderung einer spezifischen Paket-Behandlung ermöglicht, wie u.a. höhere Durchsatzraten, höhere Zuverlässigkeit oder geringere Latenzzeiten. Die Verwendung des ToS-Bytes und die Weiterleitung mittels PHB sind die Hauptmerkmale von DiffServ:

– *Bitmuster*

6 Bits des ToS-Bytes ersetzen die 3 IP-Precedence-Bits [14] und werden Differentiated Services Code Point (DSCP) genannt. Abb. 5.5 und Abb. 5.6 zeigen sowohl das IPv4-ToS-Byte als auch das entsprechende DiffServ-Byte. Die Umrechnung zwischen DSCP- und IP-Precedence-Werten wird in der Tab. 5.1 definiert.

– *PHB*

Haben eine Gruppe von Datenpaketen den gleichen DSCP-Wert und kreuzen ihren Weg, wird dies Behavior Aggregate (BA) genannt. Es ist möglich, dass Pakete mit unterschiedlichen Ursprüngen den gleichen BA besitzen. Per-Hop Behavior kontrolliert die Priorisierung dieser Pakete.

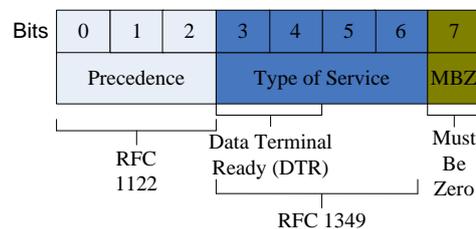


Abb. 5.5: IPv4-ToS-Byte (in Anlehnung an [3])

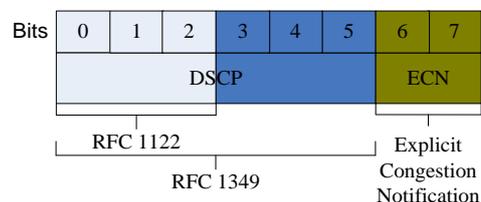


Abb. 5.6: DiffServ-Codepoint Field (in Anlehnung an [9])

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Tab. 5.1: Konvertierung zwischen DSCP- und IP-Precedence-Werten (in Anlehnung an [8])

DSCP Name	DSCP-Wert		IP-Precedence-Wert (dezimal)
	binär	dezimal	
CS0	000 000	0	0
CS1	001 000	8	1
AF11	001 010	10	1
AF12	001 100	12	1
AF13	001 110	14	1
CS2	010 000	16	2
AF21	010 010	18	2
AF22	010 100	20	2
AF23	010 110	22	2
CS3	011 000	24	3
AF31	011 010	26	3
AF32	011 100	28	3
AF33	011 110	30	3
CS4	100 000	32	4
AF41	100 010	34	4
AF42	100 100	36	4
AF43	100 110	38	4
CS5	101 000	40	5
EF	101 110	46	5
CS6	110 000	48	6
CS7	111 000	56	7

Im Gegensatz zu IntServ differenziert DiffServ den Datenverkehr und erzeugt keine virtuellen Verbindungen. Es benötigt auch keine in den Routern abgelegten Zustandsinformationen des Netzwerkes oder der Netzknoten. Da es im Internet als weltweites Netzwerk häufiger zu starken Engpässen kommt, kann das Bereitstellen und Speichern dieser Zustandsinformationen zu einem komplizierten Unterfangen werden. Daher ist IntServ in erster Linie für private und Unternehmensnetzwerke praktikabel, während DiffServ ohne Weiteres auch auf komplexere Netzwerke anwendbar ist. Die Priorisierung kann gezielt u.a. für den Echtzeitdatenverkehr eingesetzt werden und damit zu einer Erhöhung der Dienstgüte beitragen.

5.4 Integrated Services / RSVP

Das QoS-Verfahren Integrated Services (IntServ) [15] verwaltet Netzwerk-Ressourcen, um so die Ende-zu-Ende-QoS in Echtzeit-Anwendungen zu unterstützen. Es verwendet dazu das

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Resource Reservation Protocol (RSVP) [7], um für jeden Datenstrom mit gleichen Dienstgüteanforderungen (Flow) die QoS zu signalisieren und zu reservieren. Die einzelnen IP-Pakete eines Flows besitzen die gleiche Quelladresse, Zieladresse und Ports. Es können zwei unterschiedliche Dienste verwendet werden: Zum einen eine Ende-zu-Ende-Verlässlichkeit und garantierte Bandbreite für bestimmte Arten von Datenverkehr und zum anderen die Kontrolle von Paket-Lasten während eines moderaten Netzwerk-Verkehrs.

Zwei Merkmale kennzeichnen die Architektur des IntServ-Dienstes: die reservierten Ressourcen (Reserved Resources) und der Verbindungsaufbau (Call Setup bzw. Call Admission). Jeder Router unterhält Informationen über die eigenen Ressourcen, die bereits für die bestehenden Flows reserviert wurden. Außerdem ist es für die während des Verbindungsaufbaus zugesicherten QoS-Garantien notwendig, dass die entsprechende Session des Flows Ressourcen bei jedem auf dem Weg zum Zielknoten gelegenen Router reservieren kann. Die einzelnen Schritte während des Verbindungsaufbaus:

- Charakterisierung des Flows und Spezifizierung der benötigten QoS.
- *Signalisierung*: Die im vorherigen Schritt ermittelten Verkehrseigenschaften (Traffic Specification (Tspec)) und Dienstgüteanforderungen (Service Request Specification (Rspec)) des Flows müssen mittels RSVP zu den sich auf dem Datenpfad befindenden Routern transportiert werden.
- Nachdem die Router Tspec und Rspec erhalten haben, wird dort über den Aufbau der Verbindung entschieden.

Für das Funktionieren von IntServ werden eine Reihe von Funktionen innerhalb von Routern und Switches benötigt:

- *Zugangserlaubnis (Admission Control)*
Bestimmung, ob einem neuen Paketstrom die geforderte QoS bereitgestellt werden kann, ohne bereits bestehende Anfragen zu beeinflussen.
- *Klassifizierung (Classification)*
Erkennen von Paketen, die einen gewissen Level von QoS benötigen.

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

– *Überwachung (Policing)*

Sollte es die Situation erfordern, müssen Pakete verworfen werden, um so ein entsprechendes Service-Level-Agreement (SLA) einzuhalten.

– *Queuing und Scheduling*

Senden von Paketen gemäß den bereits gewährten QoS-Anfragen.

Die Abb. 5.7 zeigt das mittels RSVP realisierte Zusammenspiel dieser Funktionseinheiten.

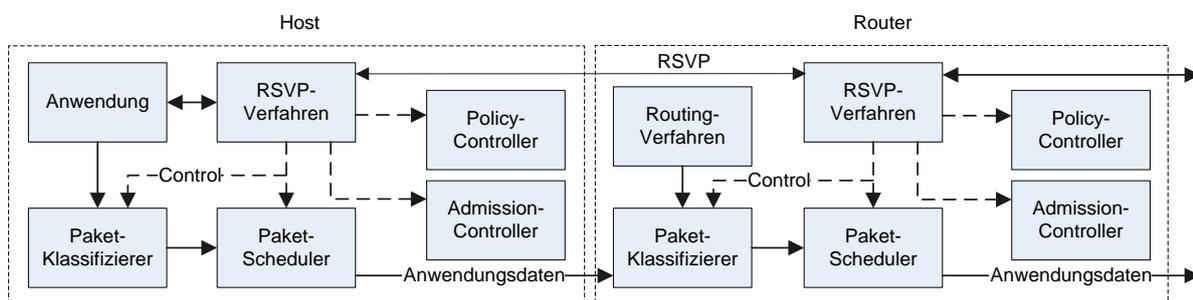


Abb. 5.7: RSVP innerhalb von Hosts und Routern (in Anlehnung an [7])

Die IntServ-Architektur definiert im Wesentlichen zwei Dienstgüte-Klassen: Guaranteed Quality of Service [45] für Echtzeitanwendungen mit strikten Anforderungen an die gewährleistete Bandbreite und Latenzzeiten und Controlled-Load Network Service [141] für Anwendungen mit flexiblen Anforderungen an die Dienstgüte.

Guaranteed Quality of Service definiert garantierte Schranken bezüglich der maximalen Verzögerung der einzelnen IP-Pakete des entsprechenden Flows. Die Realisierung dieser Beschränkungen erfolgt mittels des Leaky-Bucket-Algorithmus [130]. Dieser stellt die geforderte und konstante Übertragungsrate in den Netzwerkknoten sicher und verwirft „überlaufende“ Pakete.

Die Klasse Controlled-Load Network Service teilt dem Flow eine Dienstgüte zu, die der QoS in einem nur mit einer schwachen Last versehenen Netz entspricht. Die Überwachung dieser Qualität erfolgt mittels des Token Bucket-Verfahrens [130]. Im Gegensatz zu dem Leaky-Bucket-Algorithmus wird hier in Abhängigkeit der Burstigkeit (unregelmäßig auftretende Anhäufung von Paketankünften) des Datenstroms eine variierende Durchsatzrate erlaubt. Ein

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

Ansteigen der Netzwerklast hat daher häufig eine erhebliche Verringerung der Qualität von Datenströmen dieser Dienstgüte-Klasse zur Folge.

5.5 Error Concealment

Da es sich bei dem Internet um eine von Natur aus unzuverlässige Umgebung handelt, ist es nicht unüblich, dass einzelne IP-Pakete während einer VoIP-Verbindung entweder auf der Netzstrecke verloren gehen oder von einem Jitterbuffer (vgl. Abschn. 6.2.2) verworfen werden. Die Verdeckung dieser Paketverluste (Error Concealment) [128] hat einen erheblichen Einfluss auf die Dienstgüte. Die Realisierungen von Error Concealment-Implementierungen können entweder innerhalb von standardisierten Codecs (u.a. G.729 oder GSM) oder mittels proprietärer Methoden erfolgen. Im Folgenden werden einige häufig verwendete Techniken zur Verdeckung und Behebung von Fehlern beschrieben, die bei Datenübertragungen im Internet auftreten können [97]:

- *Beat Pattern Error Concealment* [134]
Verwendung findet diese Technik bei der Übertragung von komprimierter Musik. Hier macht man sich die Tatsache zunutze, dass Musikstücke häufig ein wiederkehrendes Muster (Beat) besitzen. Fehler im Audiostrom führen daher häufig zum Verlust eines Beats. Dieser wird bei dieser Methode durch einen bereits übertragenen Beat ersetzt. Für den Dienst VoIP spielt diese Technik allerdings nur eine untergeordnete Rolle, da Sprachübertragungen im Allgemeinen keine wiederkehrenden Muster besitzen.
- *Intra-flow Loss Recovery and Control* [18]
Der Kern dieser Technik besteht in der Korrektur der auf dem Datentransport auftretenden Fehler in dem Audiostrom. Zu diesem Zweck findet hier eine Einteilung der Pakete in Abhängigkeit der Stärke des Einfluss eines Verlustes auf die Dienstgüte statt. Eine in dieser Hinsicht größere Relevanz haben Pakete, die Daten mit Sprachsignalen beinhalten, da hier im Falle eines Verlustes für den Empfänger bedeutsame Informationen verloren gehen. Der Verlust von Paketen, die Stille enthalten, hat hingegen einen wesentlich geringeren Einfluss auf die resultierende Sprachqualität. Eine Aufgabe dieser Methode ist es, diese „sensibleren“ Datenpakete zu kennzeichnen, so dass sowohl der Sender als auch der Empfänger auf Basis dieser Informationen Entscheidungen hinsichtlich einer bevorzugten Bearbeitung treffen können.

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

– *Packet Loss Concealment (PLC)* [86]

Im Falle eines Paketverlustes wird hier entweder ein erneutes Senden des Paketes veranlasst oder eine Rekonstruktion dieses Paketes auf Basis der zuvor gesendeten Daten durchgeführt. Entsprechende Implementierungen befinden sich auf Seiten des Empfängers (u.a. innerhalb des Codecs) und haben zum Teil einen erheblichen Einfluss auf die Dienstgüte.

– *Silent Insertion (Muting)* [87]

Hierbei handelt es sich um die simpelste Error Concealment-Methode. Verlorene Pakete werden mit Paketen ersetzt, die lediglich Stille enthalten.

– *Interpolation*

Nachdem ein Paketverlust festgestellt wurde, wird das Audiosignal in dem umliegenden Bereich analysiert. Auf Basis der Charakteristiken des Signals wird anschließend entweder ein Ersatzpaket generiert oder ein bereits zuvor empfangenes und dem verloren gegangenen Paket möglichst ähnliches Paket als Ersatz wiederverwendet.

– *Wiederholtes Senden (Retransmission)* [87]

Das erneute Senden eines Paketes ist eine der am häufigsten verwendeten Techniken des Error Concealments. Für den Dienst VoIP ist sie aufgrund seiner Echtzeit-Charakteristik allerdings weniger geeignet und sollte ausschließlich bei Verbindungen mit geringen Ende-zu-Ende-Verzögerungszeiten erfolgen, sodass der negative Einfluss auf die Dienstgüte in einem überschaubaren Rahmen bleibt.

– *Wiederholtes Abspielen (Repetition)* [86]

Das zuletzt empfangene Paket wird im Falle eines Verlustes erneut verwendet. Eine simple Technik, die keinen zusätzlichen Datentransfer oder Verzögerungen verursacht. Vor allen Dingen bei der Verwendung von Paketen, die relativ kleine Audiosegmente (< 20ms je Paket) beinhalten, können mit dieser Technik akzeptable Ergebnisse erzielt werden, da hier der Effekt des wiederholten Abspielens kaum wahrnehmbar ist.

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

– *Rückmeldung (Feedback)* [52]

Der Sender wird von dem Empfänger über Eigenschaften des ankommenden Datenstroms informiert. Dieser reagiert daraufhin mit u.a. einer Verringerung oder Erhöhung der Datenrate oder dem Wechsel des verwendeten Sprachcodecs.

– *Verschachtelung (Interleaving)* [87]

Bei dieser Technik wird der Audiostrom in einzelne Frames unterteilt, die jeweils in ein Paket gekapselt und in einer veränderten Reihenfolge übertragen werden. Auf diese Weise wird der negative Effekt eines Paketverlustes verringert, da bei den auftretenden Häufungen von Paketverlusten (Bursts) nicht unbedingt aufeinanderfolgende Frames verloren gehen, sondern es sich aus Sicht des Empfängers eher um isolierte Verluste handelt. Diese können generell mit einem geringeren Aufwand mittels entsprechender Error Concealment-Methoden behandelt werden.

– *Fehlerstreuung (Error Spreading)* [105]

Eine mit Interleaving vergleichbare Technik, bei der allerdings keine weitere Einteilung des Audiosignals in Frames stattfindet. Es wird lediglich die Reihenfolge der Pakete auf Seiten des Senders permutiert und von dem Empfänger in der ursprünglichen Sequenz abgespielt. Auch hier wird ein positiver Effekt auf die Dienstgüte erzielt, da das Fehlen von größeren zusammenhängenden Teilen des Audiosignals verringert und damit eine Fehlerbehandlung vereinfacht wird.

– *Vorwärtsfehlerkorrektur (Forward Error Correction (FEC))* [140]

Den Paketen werden zusätzliche redundante Daten hinzugefügt, um im Falle einer Beschädigung die Rekonstruktion des Pakets zu ermöglichen. Voraussetzung ist, dass die zusätzlichen Daten adaptiv bestimmt werden und damit nur die minimale Datenmenge darstellen, um eine unnötige Belastung der Bandbreite zu verhindern. Außerdem führt die Berechnung der redundanten Informationen auf Seiten des Senders und die Rekonstruktion der Pakete auf Seiten des Empfängers zu einer Vergrößerung der Ende-zu-Ende-Verzögerung.

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

– *Low Bit-Rate Redundancy (LBR)* [86]

Eine mit FEC vergleichbare Technik, bei der zusätzlich zu jedem Paket ein weiteres Paket als Kopie gesendet wird. Bei der Kopie handelt es sich allerdings um ein mit einer niedrigeren Bitrate codiertes Audiosegment. Untersuchungen zeigen aber, dass die Verwendung von FEC wesentliche bessere QoS-Werte ergibt als die Verwendung von LBR.

Tab. 5.2 zeigt eine Übersicht der gängigsten Error Concealment-Methoden und deren Effektivität, positiven Einfluss auf die Dienstgüte zu nehmen.

Tab. 5.2: Error Concealing-Methoden im Überblick (in Anlehnung an [97])

Technik	Jitter	Paketverluste	Generelle Audioqualität	Gesamtbewertung
Beat Pattern Error Concealment	-	-	-	0
Intra-Flow Loss Recovery and Control	+	++	-	3
Packet Loss Concealment (PLC)	-	++	+	3
Muting	-	-	-	0
Interpolation	-	+	+	2
Retransmission	-	++	+	3
Repetition	-	+	+	2
Feedback	+	+	++	4
Interleaving	+	-	+	2
Error Spreading	++	-	++	4
Forward Error Correction (FEC)	+	++	+++	6
Low Bit-Rate Redundancy (LBR)	-	+	++	3

-: schlecht (0); +: gut (1); ++: besser (2); +++: am besten (3)

5 Verfahren zur Sicherung der Qualität beim Dienst VoIP

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

Die in der Abb. 6.1 dargestellte schematische Darstellung zeigt die Benutzerschnittstelle und anschließende Datenübertragung einer VoIP-Verbindung.

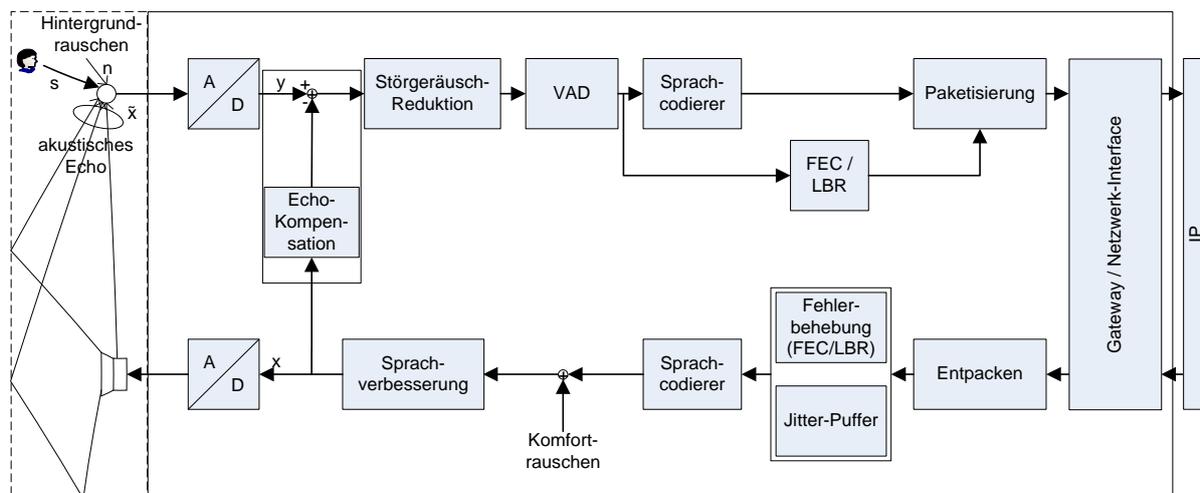


Abb. 6.1: Schematische Repräsentation der Phasen einer VoIP-Benutzerschnittstelle und der anschließenden Übertragung der Sprachdaten (in Anlehnung an [121])

Auf Seiten des Senders sind hier sowohl das Hintergrundrauschen n (für „noise“) als auch das akustische Echo des Sprechers \tilde{x} als Signale dargestellt, die dem ursprünglichen Sprachsignal s hinzuaddiert werden. Nach der Digitalisierung durch den A/D-Wandler durchläuft das Mikrofonsignal $y(k) = s(k) + n(k) + \tilde{x}(k)$ weitere Bearbeitungsschritte, bevor es in einzelne Pakete gekapselt und übertragen wird. Zunächst finden eine Echo- und Hintergrundrauschen-Reduzierung statt. Anschließend wird in dem Voice Activity Detection-Modul (VAD) überprüft, ob das aktuelle Signal-Segment Sprache beinhaltet. Sollte dies nicht der Fall sein, wird anhand eines Discontinuous Transmission-Algorithmus (DTX) entschieden, ob statt des ursprünglichen Signals lediglich die Parameter eines berechneten Hintergrundsignals gesendet werden. Auf diese Weise wird die zu übertragende Datenmenge verringert und somit die benötigte Bandbreite reduziert. In der folgenden Phase findet die Komprimierung der Daten mittels eines Sprachcodecs statt. Bei der Verwendung einer Error Concealment-Methode

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

auf Seiten des Senders werden entweder zusätzliche redundante (FEC) oder mit einer geringeren Bitrate codierte (LBR) Audiosegmente hinzugefügt (vgl. Abschn. 5.5). Die resultierenden Daten werden anschließend paketiert und über ein IP-Netzwerk übertragen, in dem sie Beeinträchtigungen wie u.a. Jitter, Verzögerungen, Paketvertauschungen und –verlusten unterworfen sind.

Auf Seiten des Empfängers werden die einzelnen Pakete zunächst entpackt. Mittels der redundanten Daten der Error Concealment-Methoden ist es möglich, den negativen Effekt aufgetretener Verluste zu verringern. Der Jitterbuffer ermöglicht den Ausgleich von moderaten Verzögerungen und Paketvertauschungen. Die resultierende Sequenz an Paketen wird anschließend mittels eines Dekodierers, der zusätzliche PLC-Eigenschaften aufweisen kann (vgl. Abschn. 5.5), dekomprimiert. Im Falle von Stille-Perioden ist es zusätzlich möglich, ein Komfortrauschen auf Basis der übermittelten Angaben zu dem Hintergrundrauschen zu erzeugen und an Stelle des Signals einzufügen. Im letzten Schritt besteht die Möglichkeit, das Signal weiter qualitativ aufzuwerten, bevor es analogisiert und abgespielt wird.

Jeder Dienst innerhalb eines IP-Netzwerkes bietet unterschiedliche Toleranzen hinsichtlich der verschiedenen Beeinträchtigungen. Die Tab. 6.1 zeigt eine Übersicht einiger Dienste und deren Anfälligkeiten gegenüber Beeinträchtigungen aus dem Netzwerk.

Tab. 6.1: Auswirkungen der Beeinträchtigungen im Netz auf die QoS der Dienste
(in Anlehnung an [44])

Dienst	Verzögerung	Jitter	Paketverluste
VoIP	hoch	hoch	niedrig
Videokonferenzen	hoch	hoch	mittel
Video-Streaming	mittel	mittel	mittel
Audio-Streaming	mittel	mittel	mittel
Client-/Server-Transaktionen	mittel	niedrig	hoch
eMail	niedrig	niedrig	hoch
Datenübertragungen	niedrig	niedrig	hoch

Die folgenden Abschnitte beschreiben die gängigen Beeinträchtigungsparameter aus dem Netz.

6.1 Codecs

Der während einer VoIP-Verbindung verwendete Sprachcodec dient der Verringerung der für die Übertragung beanspruchten Bandbreite und führt häufig zu einer Verringerung der QoS. Im Hauptsächlichen wird dies durch Ausnutzung der Eigenschaften der Spracherzeugung erreicht, wie z.B. der Bestimmung der spezifischen Eigenschaften der Stimme. Es besteht auch die Möglichkeit, dass das Signal auf dem Weg zu dem Empfänger mehrfach kodiert wird, beispielsweise bei der Übertragung über unterschiedliche Arten von Netzwerken (Tandeming [75]).

Tab. 6.2: Codecs und Kodierungen sowie deren Bandbreiten und MOS-Werte
(in Anlehnung an [40])

Codecbezeichnung	Kodierung	Bitrate (kbit/s)	Erreichbare MOS-Werte
G.711	PCM	64	bis 4,5
G.722 mit VAD und CNG	ADPCM	16, 32, 64	4,0 bis 4,5
G.721 (1988), G.726, G.727	ADPCM	32	< 3,5
G.723.1	ADCELP	5,3	bis 3,8
G.723.1	MP-MLQ	6,3	bis 3,8
G.726, G727	ADPCM	16, 24, 40	< 3,5
G.728	LD-CELP	12,8, 16	< 3,8
G.729	CS-ACELP	8	bis 4,3
G.729-A mit VAD	CS-ACELP	8	bis 4,1
IS-54	VSELP	8	< 3,8
IS-641	ACELP	7,4	< 3,8
IS-96a	QCELP	8	< 3,8
IS-127	RCELP	8	< 3,8
Japanisches PDC	VSELP	6,7	< 3,8

Die Art der Sprachcodierung hat einen wesentlichen Einfluss auf die Dienstgüte. Die höchste Qualität von ca. 4,5 MOS (vgl. Kap. 7) wird hier mittels der Codierungstechnik PCM (vgl. Kap. 1) erzielt, wobei dies mit hohen Bandbreitenanforderungen erkauft wird (64 kbit/s bei dem Sprachcodec G.711 [68]). In der Praxis werden daher häufiger Codierungstechniken wie u.a. Code Excited Linear Prediction (CELP) (vgl. G.729 [70]) oder Sum Excited Linear Prediction (VSELP) [43] verwendet, die einen Kompromiss aus Codierungsrate und Sprachqualität bieten. Die Tab. 6.2 zeigt eine Übersicht über die gängigsten Codecs für die Sprachcodie-

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

zung. Im Rahmen dieser Arbeit werden die meisten der hier aufgeführten Codecs in Betracht gezogen.

Weitergehende Untersuchungen bezüglich des Einflusses des verwendeten Sprachcodecs auf die Dienstgüte sind u.a. in [2] zu finden. Hier werden unterschiedliche Netzwerke betrachtet, wie u.a. kabelgebundene Netzwerke, WLAN (Wireless Local Area Network), WiMAX (Worldwide Interoperability for Microwave Access) und UMTS (Universal Mobile Telecommunication System (UMTS)). In [126] werden Parameter, wie u.a. die Ende-zu-Ende-Verzögerung oder der Jitter (vgl. Abschn. 6.2), für eine Reihe von Sprachcodecs und unter Einsatz unterschiedlicher Betriebssysteme untersucht. In [1] wird ein Vergleich zwischen den Codecs G.711 und G.729 im Hinblick auf einige ausgewählte Beeinträchtigungsparameter und den resultierenden Dienstgüten angestellt.

6.2 QoS-Beeinträchtigungsparameter in VoIP-Umgebungen

6.2.1 Verzögerungen

Die gesamte Ende-zu-Ende-Verzögerung während einer VoIP-Verbindung setzt sich aus den Verzögerungen zusammen, die sowohl auf Seiten des Senders bzw. Empfängers entstehen als auch während der Übertragung im Netzwerk auftreten. Die Tab. 6.3 zeigt eine Auflistung der während der einzelnen Bearbeitungsphasen auftretenden typischen Verzögerungen.

Tab. 6.3: Beiträge der Bearbeitungsphasen während einer VoIP-Verbindung an der gesamten Ende-zu-Ende-Verzögerung (in Anlehnung an [85])

Ursprung	Verzögerung [ms]
Aufnahme	10 - 40
Kodierung	10 - 20
Übertragung	70 - 120
Jitterbuffer	50 - 200
Dekodierung	10 - 20
Gesamt	150 - 400

Nutzer ordnen verspätet abgespielte Sprachelemente häufig einer verzögerten Reaktion des Gesprächspartners zu. Der Einfluss von Verzögerungen spiegelt sich daher weniger in einer verringerten wahrgenommenen Sprachqualität wieder, da eher von einer geringen Aufmerk-

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

samkeit des Gesprächspartners ausgegangen wird [16]. Außerdem ist der Einfluss von Verzögerungen abhängig von der Art des Gespräches. Unterhaltungen mit einem hohen Grad an Interaktivität erschweren das gezielte Eingreifen oder Unterbrechen des Gesprächspartners, sobald die Ende-zu-Ende-Verzögerung zunimmt. Zusätzlich führen verspätet ankommende Reaktionen zu unbeabsichtigten Unterbrechungen des Gesprächspartners, die ebenfalls zu Missverständnissen beitragen können. Beide Gesprächsparteien erwarten innerhalb eines bestimmten Zeitfensters eine Reaktion des Gegenübers, bevor eine übertragungsbedingte zusätzliche Verzögerung angenommen wird. Die Größe dieses Fensters ist zum einen von der Geschwindigkeit der Aussprache und zum anderen von der Dauer der vorausgegangen Sprachperiode (Talkspurt) abhängig. Es erweitert sich sowohl mit einer verringerten Sprechgeschwindigkeit als auch mit einer verlängerten vorangegangenen Sprachperiode. Da eine erhöhte Interaktivität eine schnellere Aussprache und kleinere Sprachperioden impliziert, werden hier signifikante Ende-zu-Ende-Verzögerungen häufiger erkannt [59]. Ein weiterer Aspekt ist die Erfahrung des Benutzers in Bezug auf durch Verzögerungen verursachte Qualitätseinbußen. Die Grenzen, innerhalb denen Verzögerungen als Beeinträchtigungsparameter wahrgenommen werden, schwanken zwischen 100 ms bis 700 ms für erfahrene und 350 ms bis 1100 ms für unerfahrene Benutzer [58].

6.2.2 Jitter

Aufgrund der Tatsache, dass die einzelnen Pakete einer VoIP-Übertragung asynchron und auf zum Teil unterschiedlichen Wegen durch die beteiligten Netzwerke geleitet werden, variieren die Ankunftszeiten der Pakete. Diese Schwankungen der Laufzeiten werden Jitter genannt und entsprechen dem Betrag der Differenz zwischen der tatsächlichen und der erwarteten Ankunftszeit. Abb. 6.2 zeigt eine Gegenüberstellung der erwarteten Ankunftszeiten von 4 mit einem zeitlichen Abstand von 20 ms versendeten Sprachpaketen und der aufgrund von Laufzeitdifferenzen verspäteten tatsächlichen Ankunftszeiten. In diesem Beispiel erreichen die Pakete 1 und 3 den Empfänger wie erwartet, während Paket 2 und 4 Jitter von 9 ms bzw. 4 ms aufweisen.

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

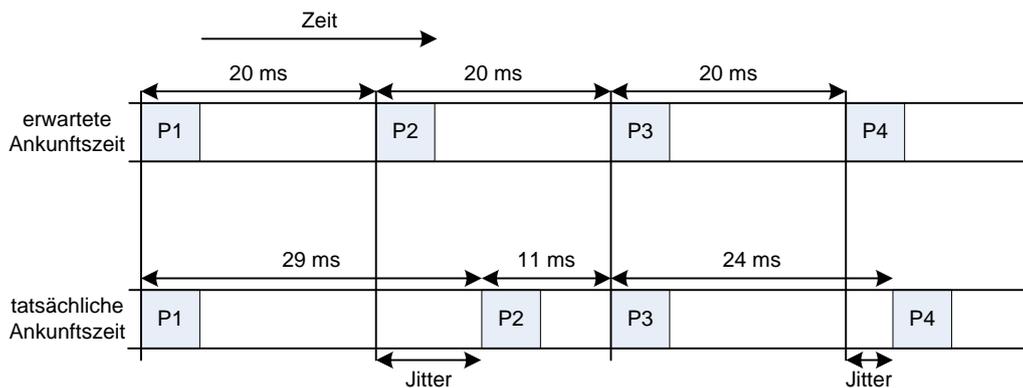


Abb. 6.2: Durch Jitter beeinträchtigte Ankunftszeiten von Sprachpaketen

Der Effekt, den dieser Beeinträchtigungsparameter auf die Dienstgüte hat, ist nicht unerheblich. Dessen Kompensation findet für gewöhnlich auf Seiten des Empfängers in einem Jitterbuffer statt. Dieser speichert ankommende Pakete, bevor sie an den Empfänger weitergeleitet werden, um so die Effekte von Verzögerungen und Vertauschungen zu minimieren. Sobald ein Paket die Kapazität des Buffers überschreitet, wird es verworfen (Pseudo-Verluste). In Abhängigkeit der Größe des Jitterbuffers erhöht sich allerdings auch die Ende-zu-Ende-Verzögerung und es verringert sich damit die Dienstgüte. Neben den fest dimensionierten Buffern werden daher häufig Buffer verwendet, deren Größe dynamisch an die aktuelle Übertragungsqualität angepasst werden können (adaptive Jitterbuffer).

6.2.3 Paketverluste

Paketverluste sind neben dem Jitter der Beeinträchtigungsparameter, welcher den größten Unterschied des Dienstes VoIP im Vergleich zu dem drahtgebundenen Festnetz darstellt. Verluste können zum einen im Netzwerk und zum anderen auf der Empfängerseite auftreten. Hier werden aufgrund von Verzögerungen im Netz verspätet ankommende Pakete von einem Jitterbuffer verworfen. Zudem können während einer Funkverbindung Bit-Fehler auftreten, die wiederum zu Verlusten führen. In Abhängigkeit der Bedeutung der verloren gegangenen Informationen besteht allerdings die Möglichkeit, die betroffenen Daten dennoch während der Dekodierung zu verwenden [47].

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

Der Einfluss von Paketverlusten auf die QoS variiert in Abhängigkeit von verschiedenen Faktoren:

– *Verlust-Verteilung*

Der bei Untersuchungen am häufigsten verwendete Fall ist der zufällige Verlust bzw. die Bernoulli-Verteilung. Hier wird für jedes Paket eine von den vorherigen Paketen unabhängige Verlustwahrscheinlichkeit angenommen. Auf die Gegebenheiten in realen Umgebungen trifft diese Verteilung für gewöhnlich nicht zu, da Verluste hier häufig aus Netzengpässen resultieren und sich daher über eine größere Anzahl an Paketen erstrecken. Die Wahrscheinlichkeit für einen Paketverlust ist somit abhängig davon, ob die vorherigen Pakete empfangen wurden (bursty loss).

– *Verlust-Modelle*

Verluste in VoIP-Netzwerken werden für gewöhnlich mittels zeitdiskreter Zustands-Modelle (Markov-Modelle) beschrieben [36]. Die simpelste Form eines Markov-Modells besteht aus 2 Zuständen (vgl. Abb. 6.3) und ist in der Lage, die Verlustwahrscheinlichkeit eines Paketes auf Basis des jeweils direkt zuvor empfangenen bzw. verloren gegangenen Paketes darzustellen. Der Parameter p entspricht hier der Wahrscheinlichkeit, dass ein Paket verloren geht, dessen Vorgänger empfangen wurde, während der Parameter q der Wahrscheinlichkeit entspricht, dass ein Paket empfangen wird, dessen Vorgänger verloren ging.

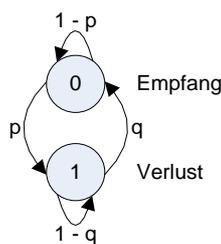


Abb. 6.3: Markov-Verlustmodell mit 2 Zuständen (in Anlehnung an [36])

Der Faktor *Burst Ratio* ($BurstR$) des Markov-Verlustmodells drückt diese Häufung in Abhängigkeit von dem aktuellen Verlust aus. Bei einem Wert größer als 1 ist diese Häufung überdurchschnittlich stark ausgeprägt, während sie bei Werten unter 1 seltener auftreten. Die *Burst Ratio* entspricht somit dem Verhältnis der gemessenen Burst-

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

größe zu der in einer burstfreien Umgebung zu erwartenden Burstgröße (vgl. Formeln (6.1) bis (6.3)) [98].

Wir definieren:

α : gemessene durchschnittliche Burstgröße (6.1)

β : für einen zufälligen und unabhängigen Verlust zu erwartende Burstgröße (6.2)

Wir erhalten:

$$BurstR = \frac{\alpha}{\beta} \quad (6.3)$$

Für einen zufälligen bzw. unabhängigen Verlust gilt das Merkmal, dass die Verlustwahrscheinlichkeit unabhängig davon ist, ob das vorherige Paket verloren ging oder empfangen wurde. Die Anzahl der bei einem zufälligen Verlust durchschnittlich aufeinanderfolgenden Verluste η kann damit anhand der Verlustwahrscheinlichkeit berechnet werden (vgl. [121], Abschn. 3.3.5.2):

$$\eta = \frac{1}{1-P_{pl}}, \text{ wobei } P_{pl} \text{ die Verlustwahrscheinlichkeit bezeichne.} \quad (6.4)$$

Die Wahrscheinlichkeiten p und q können anhand der folgenden beiden Formeln in Abhängigkeit der Burst Ratio und des Verlustes berechnet werden:

$$BurstR = \frac{1}{p + q} \quad (6.5)$$

$$P_{pl} = \frac{p}{p + q} \quad (6.6)$$

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

Um längerfristige Abhängigkeiten zwischen den Verlust-Zuständen zu ermöglichen, müssen die Modelle eine entsprechend höhere Anzahl an Zuständen aufweisen (vgl. Abschn.7.2.4)

– Fehlerkorrektur-Methoden

Mittels der in Abschnitt 5.5 beschriebenen Techniken ist es möglich, den durch einen Paketverlust entstandenen Datenverlust teilweise zu kompensieren. In realen VoIP-Netzwerken ist es üblich, eine Kombination aus verschiedenen Error Concealment-Methoden einzusetzen.

– Paketgröße

Jedes Paket besteht aus mindestens einem Codec-Frame und zusätzlichen Header-Daten, die von den beteiligten Protokollen hinzugefügt werden. Um ein zu hohes zusätzliches Datenaufkommen zu vermeiden, sollte die Anzahl der Pakete möglichst gering gehalten werden. Auf der anderen Seite führen größere Pakete zu erhöhten Verzögerungen und zu einer geringeren Sprachqualität im Falle eines Paketverlustes. Als praxistauglicher Kompromiss haben sich Paketgrößen bewährt, die einem Sprachsignalanteil von 10-60 ms entsprechen.

6.2.4 Bitfehler

Fehlerhaft übertragene Bits treten in den ersten beiden Schichten des ISO/OSI-Schichtenmodells auf. Zum einen auf der physikalischen Ebene (Schicht 1), der elektrischen, mechanischen und funktionalen Schnittstelle zu dem Übertragungsmedium. Zum anderen auf der Sicherungsschicht (Schicht 2), die für die Segmentierung der Pakete höherer Schichten in Frames und das Hinzufügen von Prüfsummen verantwortlich ist [50].

Die Bitfehler, die auf der untersten Schicht auftreten, haben für gewöhnlich keinen signifikanten Einfluss auf die resultierende Sprachqualität, solange die eingesetzten Übertragungsmedien und Schnittstellen unter normalen Betriebsbedingungen arbeiten. Die ITU-T Empfehlung G.821 [71] definiert Grenzen für die Bitfehlerraten bestimmter Übertragungsmedien und -distanzen. Allerdings ist es möglich, dass Protokolle auf höheren Ebenen Pakete mit bereits 1 Bitfehler verwerfen, u.a. durch einen Prüfsummen-Vergleich, und somit der Einfluss dieser Fehler auf die Qualität stark erhöht werden kann.

6 Beeinträchtigungsparameter beim Dienst VoIP

Bitfehler auf der Sicherungsschicht äußern sich im Allgemeinen in Verlusten der entsprechenden Pakete der auf dieser Ebene eingesetzten Techniken. Die Frame-Relay-Technik [41] verlässt sich darauf, dass die verworfenen Frames auf der Transportschicht (Schicht 4) des ISO/OSI-Schichtenmodells erneut gesendet werden, während Asynchronous Transfer Mode (ATM) [4] die von dem Bitfehler betroffenen Zellen ebenfalls verwirft und von den Protokollen der höheren Schichten erwartet, die verloren gegangenen Daten wiederherzustellen oder erneut anzufordern.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die reine Signalqualität bei hohen Bitfehlerraten das geringe Problem darstellt, da unter diesen Bedingungen vielmehr der Aufbau und das Aufrechterhalten einer VoIP-Verbindung zur Herausforderung werden.

7 QoS-Bewertungsmethoden

7.1 Klassifizierung von QoS-Bewertungsmethoden

Bewertungsmethoden zur Feststellung der Qualität des Dienstes VoIP können in 2 Kategorien unterteilt werden, die sich in der Art der Qualitätsbewertung unterscheiden: subjektive (auditive) und objektive (messtechnische) Beurteilungen. Die präzisesten Ergebnisse werden durch auditive Methoden erzielt, bei denen mittels Hörtests Aussagen über die Sprachqualität gemacht werden. Diese Verfahren sind im Vergleich zu messtechnischen Methoden deutlich aufwendiger, da deren Genauigkeit erst mit einer größeren Anzahl von Probanden gewährleistet werden kann. Nur so können die Diskrepanzen zwischen den Angaben der einzelnen Testpersonen, die durch Unterschiede beispielsweise im Hörvermögen oder der allgemeinen Motivation entstehen, minimiert werden.

Die auditiven Methoden können wiederum in analytische und zweckbestimmte (utilitaristische) Methoden kategorisiert werden. Ist das Ziel die Untersuchung von allen oder Teilmengen der wahrnehmbaren Sprachmerkmale, handelt es sich um ein analytisches Verfahren. Dieses basiert auf Analysen von Prüfreizen und hat das Ziel, die wahrnehmbaren Sprachmerkmale zu identifizieren und zu quantifizieren. Wenn möglich sollen sie ebenfalls die akustischen Charakteristiken aufzeigen und diese in entsprechende Korrelationen zu den verschiedenen Qualitätsmerkmalen stellen. Um die gesamte Bandbreite der auditiven Merkmale zu erfassen und eine gewisse Einigkeit hinsichtlich der Bedeutungen dieser Merkmale zu erhalten, werden bei diesen Verfahren erfahrene Probanden eingesetzt.

Utilitaristische Methoden ermöglichen hingegen eine Beurteilung einzelner Sprachmerkmale oder auch der generellen Sprachqualität auf entsprechenden Qualitäts- bzw. Beeinträchtigungsskalen. Des Weiteren soll anhand dieser Verfahren eine angemessene Effizienz der Test-Administration und der Datenanalyse und eine hohe Verlässlichkeit der Testmethode erreicht werden. Die Ergebnisse dieser Methoden sind insbesondere für Anwendungen relevant, die beispielsweise der Netzwerkplanung oder der Auswahl geeigneter Implementierungen von Netzwerkkomponenten dienen. Außerdem ist es möglich, die so ermittelte Dienstgüte

7 QoS-Bewertungsmethoden

anschließend als Basis für die objektiven Verfahren einzusetzen, um auf diese Weise deren Messergebnisse zu verbessern bzw. zu verifizieren.

Um den Bedarf von zeitaufwendigen und kostenintensiven Hörtests zu reduzieren, werden sogenannte instrumentale Bewertungsmethoden entwickelt. Auf Basis des Anwendungsbereiches können hier drei unterschiedliche Modelle unterschieden werden: Signalbasierte Modelle, parameterbasierte Modelle und Monitoring-Modelle (vgl. [121], Abschn. 2.2).

Signalbasierte Modelle bieten die Möglichkeit, die Verminderung der Signalqualität zu beurteilen, die u.a. durch den verwendeten Codec, Störgeräusche oder Übertragungsfehler (z.B. Paketverluste) verursacht wird. Dies wird durch die Nachbildung der Signalverarbeitung des menschlichen Hörsystems erreicht. Da solche Modelle eindimensionale Qualitätswerte anhand des Sprachsignals liefern, können sie keine Aussagen über die Quellen der Qualitätsminderung machen und werden daher als Black-Box-Modelle bezeichnet.

Parameterbasierte Modelle erleichtern im Rahmen einer Netzwerkplanung die Auswahl von Komponenten oder Konfigurationen, da diese Qualitätsanalysen bereits vor dem Aufbau des Netzwerkes ermöglichen. Sie bewerten den Einfluss von instrumentell ermittelbaren Systemmerkmalen auf die Sprachqualität und werden daher auch als Glass-Box-Modelle bezeichnet [106].

Um die Leistung eines existierenden Netzwerkes kontrollieren zu können, werden Monitoring-Modelle eingesetzt. Diese ermöglichen die Identifizierung und Lösung von Netzwerkproblemen, bevor eine große Anzahl an Benutzern unzufrieden ist. Hier wird zwischen intrusiven (Offline) und nicht-intrusiven (Online) Messungen unterschieden (vgl. [121], Abschn. 2.2.3). Bei Offline-Messungen werden spezielle Test-Anrufe ausgeführt, bei denen ein Sprachsignal über das Netzwerk übermittelt wird. Die Qualitätsbewertung oder die Bestimmung von qualitätsrelevanten Netzwerkparametern erfolgt durch den anschließenden Vergleich des gesendeten mit dem empfangenen Signal. Bei Online-Messungen wird an einem Punkt des Netzwerkes während des gewöhnlichen Netzwerkbetriebes ein Messsignal extrahiert, anhand dessen wiederum Signal-, Netzwerk- oder Gesprächsparameter hergeleitet werden können.

Bei der Feststellung der Qualität des Dienstes in einem Netz werden grundsätzlich zwei Modelle verwendet: einseitige und zweiseitige Modelle (vgl. Abb. 7.1). Das zweiseitige Modell arbeitet mit zwei Signalen: dem Referenzsignal und dem beeinträchtigten Signal. Beide Sig-

7 QoS-Bewertungsmethoden

nale sind in unkomprimierter Form verfügbar. Damit ist sowohl eine subjektive (QoE) als auch eine objektive (QoS) Bewertung der Dienstqualität möglich. Bei dem einseitigen Modell steht nur das beeinträchtigte und komprimierte Signal zur Verfügung. Hier ist nur die objektive QoS-Beurteilung möglich, da das Referenzsignal unbekannt ist. Messungen der Dienstqualität werden in dem zweiseitigen Modell offline und in dem einseitigen Modell online durchgeführt.

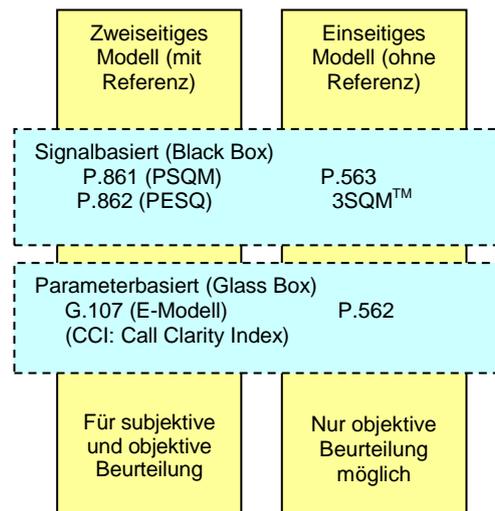


Abb. 7.1: Klassifizierung der QoS-Bewertungsmethoden [106]

In beiden Modellen können zwei Bewertungstechniken verwendet werden: signalbasierte und parameterbasierte Methoden. In dem zweiseitigen Modell werden bei signalbasierten Messungen die Eingangs- und Ausgangssignale unter Verwendung von spezialisierten Algorithmen miteinander verglichen. Bei dem einseitigen Modell wird versucht, auf das Referenzsignal zu schließen, um dieses anschließend mit dem beeinträchtigten Signal zu vergleichen. In beiden Fällen wird das zu untersuchende System als eine Black Box betrachtet. Bei den parameterbasierten Methoden werden bezogen auf das zu untersuchende System zwei Fälle unterschieden: *Glass Box* und *Black Box*. In dem ersten Fall sind der Aufbau des zu untersuchenden Systems und die Reaktionen der einzelnen Systemkomponenten auf das Referenzsignal bekannt. Diese Erkenntnisse werden dann in einem geeigneten Modell berücksichtigt. Darüber hinaus werden noch die gemessenen Netzwerkparameter in die Berechnung der QoS einbezogen. In dem zweiten Fall sind nur sehr beschränkte Kenntnisse über das zu untersuchende System verfügbar. Hier wird vorwiegend mit den gemessenen Netzwerk- und Dienstparametern gearbeitet. Abb. 7.1 zeigt die bekanntesten Bewertungsmethoden zur Bestimmung der Dienstqualität in einer VoIP-Umgebung. Die für die Praxis wichtigsten Techniken sind:

der Perceptual Evaluation of Speech Quality-Algorithmus (PESQ) und das E-Modell, die in Abschn. 7.2 im Detail vorgestellt werden. Der PESQ-Algorithmus gehört zur Gruppe der signalbasierten Methoden, das E-Modell stellt hingegen eine parameterbasierte Methode dar.

7.2 Gängige QoS-Bewertungsmethoden

7.2.1 Der PESQ-Algorithmus

In Abb. 7.2 ist die Grundstruktur des PESQ-Algorithmus dargestellt.

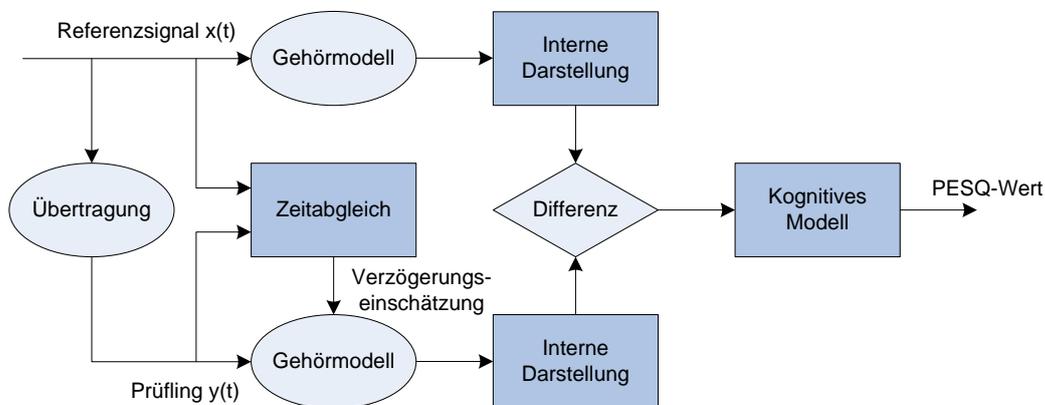


Abb. 7.2: Übersicht über die Grundstruktur des PESQ-Algorithmus (in Anlehnung an [114])

Bei diesem Modell wird das Originalsignal, oder auch Referenzsignal $x(t)$, über eine Telefonverbindung übertragen. Am anderen Ende wird das verminderte Ausgangssignal (Prüfling $y(t)$) empfangen. Durch auftretende Störeinflüsse, die auf das Sprachsignal bei der Übertragung des Prüflings einwirken, unterscheidet sich der Prüfling von dem Referenzsignal. Damit die Signale miteinander verglichen werden können, wird wie bei dem Vorgänger Perceptual Speech Quality Measurement (PSQM) [76] ein wahrnehmendes Gehörmodell verwendet. Dieses Modell bildet eine interne Darstellung des menschlichen Hörapparates nach. Die Signale müssen dabei der gesprochenen Sprache entsprechen, da die meisten Systeme für die gesprochene Sprache ausgerichtet sind. Nach einigen Umwandlungen und Berechnungen wird die Differenz zwischen der gehörgerechten internen Darstellung des Referenz- und des Prüflingsprachsignals gebildet. Das Ergebnis des Vergleichs lässt auf die Hörbarkeit der zu dem Prüfling hinzugefügten Störungen schließen. Daraus lässt sich nun ein Maß für die Qualität der Sprache berechnen.

7 QoS-Bewertungsmethoden

PESQ erzeugt eine Ausgabe der Sprachqualität im Bereich von -0,5 bis 4,5. Werte nahe -0,5 entsprechen einer sehr schlechten Sprachqualität, während Werte nahe 4,5 eine sehr gute Sprachqualität bedeuten. In den meisten Fällen liegen die Ausgabewerte zwischen 1,0 und 4,5. Dieses ist auf den ersten Blick sehr überraschend, da der ITU-Skalenbereich Werte bis 5 zulässt. Die Erklärung ist, dass PESQ einen Hörtest simuliert und dafür optimiert ist, das durchschnittliche Ergebnis aller Hörer zu reproduzieren (Mean Opinion Score (MOS)). Statistiken zeigen, dass das durchschnittlich beste Ergebnis, das im Allgemeinen von einem Hörtest erwartet werden kann, nicht 5 ist. Es liegt stattdessen bei ca. 4,5. Die Testpersonen scheinen sich eher zurückzuhalten, einer Probe eine 5 zu geben, selbst ohne wahrnehmbare Verschlechterung des Signals.

Um die PESQ-Werte in die MOS-LQO Skala (Listening Quality Objective) von 1 bis 5 umzurechnen, wird die Formel (7.1) für Schmalbandsignale [78] und die Formel (7.2) für Breitbandsignale [79] verwendet. Beide Formeln wurden aus einer Reihe von subjektiven Hörtests hergeleitet, aus denen sich jeweils ein entsprechendes Verhältnis zwischen den objektiven PESQ- und den subjektiven MOS-LQO-Bewertungen ableiten lassen kann. Die Tab. 7.1 zeigt diese Umrechnung bei der Verwendung von Schmalband-Signalen (300 – 3400 Hz) und die Tab. 7.2 für die Breitband-Telefonie (50 – 7000 Hz).

Tab. 7.1: Umrechnung der PESQ- in MOS-LQO-Werte für Schmalband-Telefonie [113]

PESQ-Wert	MOS-LQO-Wert	Sprachqualität
4,5	4,55	ausgezeichnet
4	4,15	gut
3	2,82	ordentlich
2	1,63	mäßig
-0,5	1,02	schlecht

$$LQO = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,4945 \cdot PESQ + 4,6606}} \quad (7.1)$$

Tab. 7.2: Umrechnung der PESQ- in MOS-LQO-Werte für Breitband-Telefonie [113]

PESQ-Wert	MOS-LQO-Wert	Sprachqualität
4,5	4,64	ausgezeichnet
4	4,35	gut
3	3,28	ordentlich
2	2,01	mäßig
-0,5	1,04	schlecht

$$LQO = 0,999 + \frac{4,999 - 0,999}{1 + e^{-1,3669 \cdot PESQ + 3,8224}} \quad (7.2)$$

7.2.2 Der POLQA-Algorithmus

Perceptual Objective Listening Quality Analysis (POLQA) ist der Nachfolger von PESQ und arbeitet entsprechend den Vorgaben des ITU-T-Standards P.863 [81]. Der neue Algorithmus ist für die Untersuchung von Sprachverbindungen unter Verwendung von Schmalband- (Narrowband bzw. NB), Breitband- (Wideband bzw. WB) und Super-Breitband-Signalen (Super-Wideband bzw. SWB) ausgelegt. Tab. 7.3 zeigt eine Übersicht über die Signalarten und deren Eigenschaften.

Tab. 7.3: Signalarten und deren Eigenschaften (in Anlehnung an [101])

Signal	Abkürzung	Abtastrate [kHz]	Bandbreite [Hz]
Schmalband	NB	8	300 – 3.400
Breitband	WB	16	50 – 7.000
Super-Breitband	SWB	48	50 – 14.000

Der Algorithmus verfügt über zwei Modi: NB (NB-Referenzsignal) und SWB (SWB-Referenzsignal). Der SWB-Modus des POLQA-Verfahrens ermöglicht es, beide Gruppen von Signalen auf einer einheitlichen Skala zu beurteilen. Die verminderten Signale, die in Abhängigkeit des Codecs in der Regel mit einer Abtastrate kleiner als 48 kHz vorliegen, werden intern umgerechnet, um einen Vergleich der beiden Eingangssignale zu ermöglichen. Um eine praktische Messung gemäß dem SWB-Modus von POLQA auszuführen, ist es zunächst gegebenenfalls nötig, den Prüfling durch die Verringerung der Abtastrate (Downsampling) aus

7 QoS-Bewertungsmethoden

dem SWB-Referenzsignal zu gewinnen. Die Ausgabe der POLQA-Ergebnisse erfolgt ausschließlich als MOS-LQO-Wert. Die Tab. 7.4 zeigt die minimal bzw. maximal erreichbaren Werte in Abhängigkeit des verwendeten Modus und Signals.

Tab. 7.4: Grenzen der ausgegebenen MOS-LQO-Werte des POLQA-Algorithmus [81]

	NB-Modus		WB-Modus	
	min. MOS-Wert	max. MOS-Wert	min. MOS-Wert	max. MOS-Wert
NB-Signal	1	4,5	1	4
WB-Signal	-	-	1	4,5
SWB-Signal	-	-	1	4,75

Die hohe Bandbreite an unterstützten Signalen (NB, WB, SWB) und die Beschränkung auf die entsprechende MOS-Skala (1,0 – 4,5 für den NB-Modus bzw. 1,0 – 4,75 für den SWB-Modus) hat zur Folge, dass die nach dem Standard P.863 gewonnenen MOS-LQO-Werte im Vergleich zu den entsprechenden MOS-LQO-Werten des P.862-Standards einen Offset von ca. 0,5 MOS besitzen. Dies erschwert den Vergleich der Ergebnisse dieser beiden Algorithmen. Daher findet in dem POLQA-Algorithmus vor der Ausgabe eine Umrechnung statt. Diese erfolgt gemäß der Formel (7.3) für Schmalband- bzw. Formel (7.4) für Breitband-Signale [104]. Beide Mapping-Funktionen wurden von der POLQA-Koalition, bestehend aus den Firmen OPTICOM [108], SwissQual [129] und TNO [132], entwickelt, um die entsprechenden QoS-Werte auf eine einheitliche Skala zu übertragen und einen Vergleich dieser Werte für Signale mit unterschiedlichen Abtastraten zu ermöglichen. Es werden ausschließlich Versionen des Algorithmus unterstützt, deren resultierende Bewertungen sich auf dieser Skala befinden.

$$MOS_{LQO} = 0,79 + 0,0036 \cdot MOS_{P.863} + 0,2117 \cdot MOS_{P.863}^2 - 0,0065 \cdot MOS_{P.863}^3 \quad (7.3)$$

$$MOS_{LQO} = 0,276 + 0,7203 \cdot MOS_{P.863} + 0,00756 \cdot MOS_{P.863}^2 - 0,01141 \cdot MOS_{P.863}^3 \quad (7.4)$$

7.2.3 Das E-Modell

Bei dem E-Modell handelt es sich um die Umsetzung der ITU-T-Empfehlung G.107 [63]. Für Sprach-Qualitätsbestimmungen ist es sowohl zur Netzplanung als auch während aktiver Verbindungen (Monitoring) weit verbreitet. Das Modell basiert auf einer parametrischen Beschreibung des Telefon-Netzwerkes und verwendet dazu additive psychologische Parameter. Es wurde auf Basis einer großen Anzahl von auditiven Tests entwickelt. Da es u.a. auch die Qualitätseinbußen aufgrund des Sprecher-Widerhalls berücksichtigt, ermöglicht das Modell die Beurteilung der Qualität in Gesprächssituationen. Das Ergebnis des ersten Berechnungsschritts des Modells ist der Bewertungsfaktor R , welcher alle für die Verbindung relevanten Übertragungsparameter vereint. Der Faktor R kann anschließend mittels der Formel (7.5) in einen MOS-Wert konvertiert werden [63]. Der entsprechende Zusammenhang wurde anhand von Hörtests mit einer größeren Anzahl von Probanden hergeleitet.

$$MOS = \begin{cases} 1 & R < 0 \\ 1 + 0,035 \cdot R + R \cdot (R - 60) \cdot (100 - R) \cdot 7 \cdot 10^{-6} & 0 \leq R \leq 100 \\ 4,5 & R > 100 \end{cases} \quad (7.5)$$

Aus Formel (7.5) ergibt sich folgende Beziehung zwischen dem Bewertungsfaktoren und den MOS-Werten.

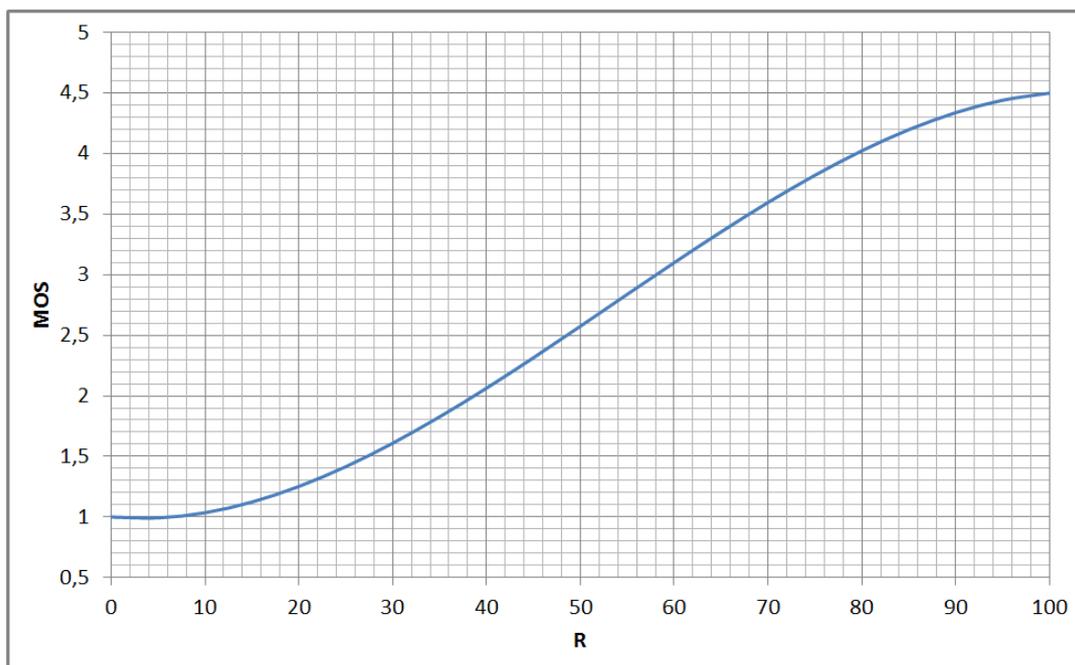


Abb. 7.3: QoS-Werte des E-Modells als Funktion der Bewertungsfaktoren [63]

7 QoS-Bewertungsmethoden

Die Tab. 7.5 zeigt die numerische Konvertierung des R-Faktors in den entsprechenden MOS-Wert.

Tab. 7.5: R-Faktor und MOS-Wert in dem E-Modell [110]

R-Faktor	MOS-Wert	Sprachqualität
100	4,5	exzellent
80	4,0	gut
60	3,1	ausreichend
40	2,0	mangelhaft
20	1,2	schlecht

Eingangsparameter

Die zentralen Parameter des E-Modells sind I_e (Equipment Impairment Factor), B_{pl} (Packet-Loss Robustness Factor) und P_{pl} (Random Packet-Loss Probability). Für die Messung der Qualität können diese drei Parameter angepasst werden und haben daher einen entscheidenden Einfluss auf die auf diese Weise erhaltenen QoS-Werte. Tab. 7.6 zeigt die gesamten Parameter des E-Modells und deren Standardwerte (Defaultwerte) für einen durchschnittlichen und störungsfreien Kommunikationskanal mit PCM-Kodierung.

– SLR, RLR, OLR

Lautstärken-Bewertungen für den sendenden (SRS) und den empfangenden (RLR) Bereich des Übertragungswegs und eine umfassende Lautstärken-Bewertung (OLR). Diese Bewertungen geben die frequenz-gewichtete Abschwächung des übertragenden Sprachsignals im Vergleich zum Referenzsignal wieder.

– Ta

Mittlere Ende-zu-Ende-Verzögerung des Übertragungsweges.

– $T, TELR$

Die mittlere One-Way-Verzögerung (T) ist für den Sprecher-Widerhall verantwortlich, welcher durch Reflexionen an der entsprechenden Gegenstelle verursacht wird. Die Lautstärken-Bewertung des Sprecher-Widerhalls ($TELR$) beschreibt die gewichtete Abschwächung des Widerhalls auf dem Weg vom Mund des Sprechers zu den Ohren des Empfängers. Berechnet wird dieser Parameter mittels der Formel (7.6) (vgl. [121], Abschn. 2.2.2.2):

7 QoS-Bewertungsmethoden

$$TELR = SLR + RLR + EL \quad (7.6)$$

Bei dem Parameter EL handelt es sich um den Widerhall-Verlust (Echo Lost). Dieser kann als Durchschnitt der frequenzabhängigen Rückflusdämpfung des Widerhalls berechnet werden.

– $Tr, WEPL$

Die Round-Trip-Verzögerung Tr verursacht den Widerhall auf Seiten des Zuhörers ($WEPL$). Hierbei handelt es sich um einen parametrischen Deskriptor des gewichteten Durchschnitts der frequenz-abhängigen Verminderung des Zuhörer-Widerhalls.

– N_c, N_{for}

Das Leitungsrauschen (N_c) und das Grundrauschen (N_{for}) sind die gaußschen Schmalband- und Breitband-Geräuschquellen auf der Übertragungsleitung. N_c wird bestimmt als gewichteter absoluter Geräuschpegel in Relation zu dem 0dB-Punkt (größter digital darstellbarer Wert) des Netzwerks und ist ein Ausdruck der Geräusche aller Schaltkreise auf dem Übertragungsweg. N_{for} ist der gewichtete absolute Geräuschpegel auf der Empfänger-Seite und entspricht den durch die Leitung des Teilnehmeranschlusses verursachten Geräuschen.

– P_s, P_r

Gewichtete Geräuschpegel des Raums auf Seiten des Senders (P_s) bzw. Empfängers (P_r).

– D_r, D_s

Der gewichtete Durchschnitt der Mikrofon-Sensibilität auf Seiten des Senders (D_s) bzw. des Empfängers (D_r) entspricht dem Unterschied zwischen der Sprache (Direct) und den Hintergrundgeräuschen des Raums (Diffuse).

– $STMR$

Quantifizierung der Verringerung des Sprachsignals des Sprechers durch die Rückkopplung auf seinen Kopfhörer.

7 QoS-Bewertungsmethoden

- B_{pl}
Die Robustheit des verwendeten Codecs und der PLC-Methode gegenüber Paketverlusten.

- $BurstR$
Das Verhältnis der durchschnittlichen Anzahl der während eines diskontinuierlichen Zustands des Datenverkehrs (bursty) verloren gegangenen Pakete zu den durchschnittlich während eines statistischen Paketverlustes verloren gegangenen Paketen. Eine nähere Beschreibung des Parameters ist in Abschn. 6.2.3 zu finden.

Tab. 7.6: Parameter des E-Modells und deren Defaultwerte für einen durchschnittlichen und störungsfreien Kommunikationskanal mit PCM-Kodierung (in Anlehnung an [63])

Parameter	Abkürzung	Einheit	Defaultwert
Sending Loudness Rating	SLR	dB	8
Receiving Loudness Rating	RLR	dB	2
Sidetone Masking Rating	STMR	dB	15
Listener Sidetone Rating	LSTR	dB	18
D-Factor Handset, Send Side	Ds	–	3
D-Factor Handset, Receive Side	Dr	–	3
Talker Echo Loudness Rating	TELR	dB	65
Weighted Echo Path Loss	WEPL	dB	110
Round Trip Delay in a 4-Wire Loop	Tr	ms	0
Absolute Delay	Ta	ms	0
Mean One-Way Delay	T	ms	0
Number of Quantizing Distortion Units	qdu	–	1
Equipment Impairment Factor	le	–	0
Circuit Noise relative to 0 dBr-point	Nc	dBm0p	-70
Noise Floor at Receive Side	Nfor	dBmp	-64
Room Noise at Send Side	Ps	dB(A)	35
Room Noise at Receive Side	Pr	dB(A)	35
Packet Loss Percentage	Ppl	%	0
Packet Loss Robustness Factor	Bpl	%	1
Burst Ratio	BurstR	%	1
Advantage Factor	A	–	0

Das E-Modell berücksichtigt keine Beeinträchtigungsparameter, die während einer Signalübertragung in paketvermittelnden Kommunikationsnetzwerken auftreten können (Jitter, Pa-

ket-Vertauschungen, ...). Hier sind Anpassungen in dem E-Modell notwendig. Dies führte zu der Entwicklung des sog. EIP-Modells, welches in dem Kap. 11 vorgestellt wird.

Breitbandigkeit

Der Vorteil der Breitband- gegenüber der Schmalband-Telefonie kann auf unterschiedlichen Skalen ausgedrückt werden. In der Literatur werden einige Tests erwähnt, in denen diese Breitband-Verbesserung auf der MOS-Skala formuliert wird [94] [109]. Diese Tests zeigen, dass verlustfreie Schmalband-Übertragungen schlechter beurteilt werden, sobald zusätzlich auch Breitband-Übertragungen präsentiert werden. Die auf der MOS-Skala ermittelten Verbesserungen sind daher eher von spekulativer Natur, da sie auf einer Komprimierung der MOS-Skala basieren. Eine Möglichkeit, mit dieser Problematik umzugehen, ist ein Vergleich der Beurteilungen von Schmalband-Übertragungen zum einen in reinen Schmalband-Tests und zum anderen in gemischten Schmalband- und Breitband-Tests. Mittels Interpolation der Differenzen kann anschließend die effektive Verbesserung der Qualität auf der Schmalband-Skala ermittelt werden.

Um diese Verbesserung in dem E-Modell zum Ausdruck zu bringen, wird im Folgenden die *R*-Skala angepasst. Für die Quantifizierung der Erhöhung der Sprachqualität während einer Breitband-Verbindung ist es notwendig, die Skala des *R*-Faktors entsprechend zu erweitern. Während der Faktor für Schmalband-Verbindungen Werte zwischen 0 und 100 annimmt, zeigen entsprechende Untersuchungen in [62], dass es sich bei einem Maximalwert von $R_{max} = 129$ um einen soliden Kompromiss handelt, um Breitband-Verbindungen auf der gleichen Skala beurteilen zu können. Ermittelt wurde dieser Wert mittels einer exponentiellen Extrapolation aus den Bewertungen von 24 Probanden. Diese haben Schmalband-Signale sowohl in einer reinen Schmalband-Umgebung als auch in einer Umgebung, in denen sie Schmal- und Breitband-Signale beurteilen sollten, bewertet (vgl. [121], Abschn. 5.1). Dieser Zusammenhang wird in Abb. 7.4 veranschaulicht. Tab. 7.7 zeigt einige ausgewählte MOS-Werte mit den entsprechenden *R*-Faktoren sowohl für Schmalband- als auch für Breitband-Verbindungen (vgl. Formel (7.7)).

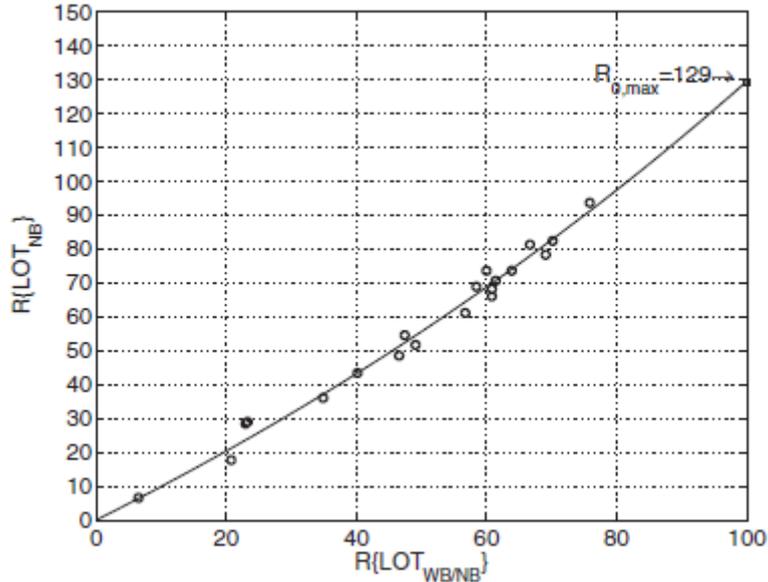


Abb. 7.4: Exponentielle Extrapolation der R_{NB} -Faktoren, um auf diese Weise die Skala-Erweiterung für R_{WB} -Faktoren zu erhalten ([121], Abschn. 5.1).

Tab. 7.7: R-Faktoren und MOS-Werte im Breitband-E-Modell (in Anlehnung an [62] [110])

$R_{NB/WB}$ -Faktor	R_{NB} -Faktor	MOS-Wert	Sprachqualität
129	100	4,5	ausgezeichnet
97	80	4,0	gut
69	60	3,1	ordentlich
43	40	2,0	mäßig
20	20	1,2	schlecht

$$R_{NB} = 169,38 \cdot \left(\exp\left(\frac{R_{NB/WB}}{176,32}\right) - 1 \right) \quad (7.7)$$

7.2.4 VQmon

VQmon von Telchemy, Inc. wurde speziell für die Bestimmung der Leistung von IP-basierenden Multimedia-Anwendungen entwickelt. Es beinhaltet Erweiterungen und Verbesserungen des E-Modells für diese Dienste und wurde standardisiert in [38]. Einige Nachteile des E-Modells gegenüber dem VQmon-Tool sind:

- Es verwendet vordefinierte Codec-Parameter, von denen nur wenige von der ITU veröffentlicht wurden und die zudem teilweise fehlerhaft sind.

7 QoS-Bewertungsmethoden

- Es bezieht keine zeitabhängigen Beeinträchtigungen mit ein, die eine häufige Folge von Überlastungen sind.
- Es berücksichtigt keine Perioden von längeren aufeinanderfolgenden Paketverlusten.

IP-Beeinträchtigungen resultieren üblicherweise aus Netzwerküberlastungen, die wiederum für gewöhnlich von überhöhten Datenaufkommen verursacht werden und daher stark zeitabhängig sind. VQmon ermittelt die Verteilung der verloren gegangenen und verworfenen Pakete mittels eines Markov-Modells, welches zwei Zustände während einer Verbindung unterscheidet:

- *Burst State*
In diesem Zustand ist die Verlustrate stark genug, um eine erkennbare Verringerung der Qualität wahrzunehmen.
- *Gap State*
In diesem Zustand wurde eine entsprechend hohe Anzahl an aufeinanderfolgenden Paketen empfangen, sodass sich die Verbindung nicht weiter in dem Burst State befindet.

Die Qualität wird für jeden Zustand separat bestimmt und anschließend mittels eines Wahrnehmungsmodells vereint, welches die Reaktionen der Hörer auf zeitabhängige Verbindungsqualitäten darstellt. Abb. 7.5 zeigt eine Übersicht über die Funktionsweise von VQMon.

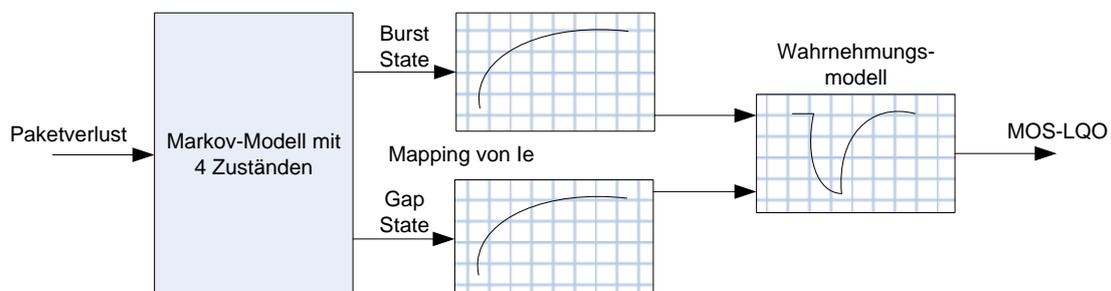


Abb. 7.5: Übersicht über die Funktionsweise von VQmon (in Anlehnung an [26])

7 QoS-Bewertungsmethoden

VQmon verwendet Elemente des E-Modells und die in [38] beschriebene Methode zur Bestimmung des Equipment Impairment Factors (I_e).

Methode zur Bestimmung des Equipment Impairment Factors (I_e)

Die im Folgenden beschriebene Vorgehensweise zur Bestimmung von I_e für das E-Modell vereint die Einflüsse der Effekte des Codecs, der Paketverluste, der Verlustverteilung, des Jitters und der Aktualität auf die Qualität der Verbindung.

Folgende Elemente werden unterschieden und dienen der Bestimmung von I_e :

– *Paketverluste*

Die Verteilung der Verluste wird anhand des empfangenen Paketstroms ermittelt und mittels eines Markov-Modells entwickelt. Die Parameter des Modells werden unter Verwendung der von dem eingesetzten Codec abhängigen Kurve (vgl. [65]) auf einen I_e -Faktor abgebildet.

– *Packet Delay Variation (PDV)*

Die Variation der Paketverzögerungen wird während eines Anrufs ermittelt und während der gesamten Verbindung als konstant angenommen. Begrenzt wird sie durch die Größe des Jitterbuffers und dem Schwellwert, an dem die Pakete von dem Buffer verworfen werden. Die meisten Implementationen des Jitterbuffers sind allerdings ausreichend dimensioniert, sodass die Pakete entweder in der korrekten Reihenfolge ausgegeben oder aber verworfen werden. In diesen Fällen wäre dieser Werte vernachlässigbar.

– *Codec*

Der verwendete Audiocodec und dessen Parameter werden ebenfalls während der Dauer der Verbindung als konstant angenommen und unter Verwendung der entsprechenden Parameter gemäß [64] auf einen I_e -Faktor abgebildet.

7 QoS-Bewertungsmethoden

– *Verzögerung*

Die Verzögerung wird anhand der zu erwartenden Einwegverzögerung (One-Way Delay) ermittelt, die durch die Übertragung, den Jitterbuffer und den Codec verursacht wird.

In einer typischen VoIP-Umgebung können Paketverluste aufgrund starker Verzögerungen auftreten. Die Verluste sollten daher entweder hinter dem Jitterbuffer des Empfängers gemessen werden oder die Verzögerung, die zu dem Verwerfen von Paketen führt, sollte bekannt sein. Werden die Verluste vor dem Jitterbuffer gemessen, sollten die einzelnen Jitterwerte unter der Annahme, dass Verzögerungen größer als der Jitterbuffer zu einem Verwerfen des entsprechenden Pakets führen, gemessen werden.

Die Verlustverteilung in IP-Netzwerken kann mittels eines Markov-Prozesses modelliert werden. Das resultierende Modell kann sowohl für die analytische als auch numerische Beurteilung der Leistung verwendet werden und besitzt Eigenschaften, die bereits bekannt sind und gut verstanden werden. Das Modell wird im weiteren Abschnitt näher beschrieben.

Markov-Modell mit 4 Zuständen

Ein zeitdiskretes Markov-Modell besitzt mehrere Zustände, zwischen denen ein System mit den bestimmten Übergangswahrscheinlichkeiten wechselt. In einem Modell mit nur zwei Zuständen werden kurzzeitige Abhängigkeiten von z.B. aufeinanderfolgenden Paketverlusten erfasst (vgl. Abschn. 6.2.3). Dabei handelt es sich um Ereignisse von äußerst geringer Dauer, wie z.B. 1-3 verloren gegangene Pakete. Gelegentlich auftretende Verbindungsprobleme können aber zu stärkeren Paketverlusten über mehreren Sekunden führen. Durch das Kombinieren eines Markov-Modells mit zwei Zuständen mit einem Gilbert-Elliott-Modell [51] ist es möglich, sowohl ein kurzzeitiges Auftreten von starken Paketverlusten als auch über einen längeren Zeitraum auftretende Übertragungsprobleme abzubilden. Das resultierende Markov-Modell mit vier Zuständen setzt sich aus zwei Modellen mit jeweils zwei Zuständen zusammen, die das System in einen „guten“ Zustand (Gap-Periode) und einen „schlechten“ Zustand (Burst-Periode) unterteilen (vgl. Abb. 7.6).

7 QoS-Bewertungsmethoden

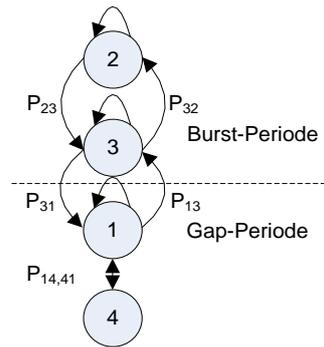


Abb. 7.6: Markov-Verlustmodell mit 4 Zuständen (in Anlehnung an [27])

Die in Abb. 7.6 gezeigten Zustände haben folgende Bedeutung:

Zustand 1: Paket empfangen

Zustand 2: Paket während eines Bursts empfangen

Zustand 3: Paketverlust während eines Bursts

Zustand 4: isolierter Paketverlust während einer Gap-Periode

Für die Definition der Burst- und der Gap-Periode wird üblicherweise ein Wert G_{min} festgelegt. Solange die Anzahl der aufeinanderfolgenden empfangenen Pakete diesen Wert nicht erreicht, befindet sich das System in einer Burst-Periode. Gehen während einer Gap-Periode mindestens zwei aufeinanderfolgende Pakete verloren, geht das System in eine Burst-Periode über.

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

Die Untersuchungen und Entwicklungen neuer parameterbasierter Bewertungsmethoden, die in den folgenden Kapiteln behandelt werden, basieren größtenteils auf den QoS-Werten von signalbasierten Methoden. Auf diese Weise können Abhängigkeiten zwischen diesen Werten und den entsprechenden Netz- und Dienstparametern festgestellt werden. Diese Messungen sollten schnell erfolgen und in einer Messumgebung wiederholbare Ergebnisse liefern. In einer realen Umgebung ist die Generierung solcher Messpunkte aufgrund des Echtzeit-Charakters des VoIP-Dienstes äußerst zeitaufwendig. Außerdem wird eine große Anzahl an Messwerten benötigt, um so mehrere Messszenarien betrachten zu können und möglichst kleine Konfidenzintervalle zu erreichen. Ein weiteres Problem in einer solchen Umgebung ist die Schwierigkeit, die Charakteristika der Beeinträchtigungen präzise zu definieren, da deren Einfluss nicht auf alle Eigenschaften der Übertragungsstrecke vorhanden ist. So erfolgt die Einspeisung von Beeinträchtigungen mittels einer Hardware bzw. Software (Wanulator), dessen konkrete Implementierung häufig nicht bekannt ist.

Im Rahmen dieses Kapitels werden daher der Entwurf und die Implementierung eines Software-Tools beschrieben, welches sowohl schnelle als auch praxisnahe Messreihen von QoS-Bewertungsmethoden erzeugen kann. Da es die gesamte Übertragungsstrecke simuliert, bietet es zudem die volle Kontrolle über die festgelegten Beeinträchtigungsparameter.

8.1 Funktionsweise

Die Abb. 8.1 zeigt das Blockschaltbild des im Rahmen dieser Arbeit entworfenen Tools zur QoS-Untersuchung beim Dienst VoIP. Das Tool wurde QoSCalc(VoIP) genannt [112].

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

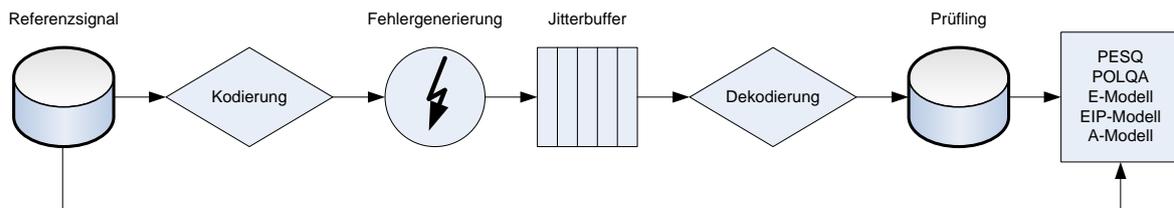


Abb. 8.1: Blockschaltbild des erstellten Tools (in Anlehnung an [112])

Im Weiteren wird die Arbeitsweise des Tools erläutert. Die einzelnen Schritte sind wie folgt:

- Zunächst wird die Referenzdatei geladen.
- Das Referenzsignal wird gemäß dem gewählten Sprachcodec codiert.
- Die codierten Sprachproben werden gemäß der gewählten Sprachprobenlängen segmentiert und in RTP-Pakete gekapselt.
- Im Fehlergenerierung-Block werden die Beeinträchtigungen im Netz (z.B. Jitter, Paketverluste) emuliert.
- Die empfangenen RTP-Pakete mit den Sprachproben werden in dem Jitterbuffer gepuffert. Dort erfolgt die Bearbeitung der angekommenen Pakete. Im Falle eines Paketverlustes wird Silent Insertion als Error Concealment-Technik verwendet (vgl. Abschn. 5.5).
- Nach der Entkapselung werden die Sprachproben im folgenden Block gemäß dem gewählten Codec dekodiert.
- Zum Schluss wird das Empfangs- und Referenzsignal dem Algorithmus PESQ oder POLQA zur Auswertung zugeführt. Diese Algorithmen berechnen daraufhin die QoS-Werte auf der MOS-Skala. Es ist auch möglich, die beim Empfang der RTP-Pakete ermittelten Parameter dem E-, EIP- oder A-Modell (vgl. Kap. 11 und 12) zuzuführen, die ebenfalls dazu in der Lage sind, die QoS-Werte auf der MOS-Skala zu bestimmen.

8.2 Bedienoberfläche

Das Tool stellt drei verschiedene Arten von Ursachen für Paketverluste zur Verfügung, die sich gegenseitig ausschließen:

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

– *Verluste innerhalb eines einfachen Jitterbuffers*

Als Parameter können hier sowohl die Dimensionierung des Jitterbuffers in Millisekunden als auch die Anzahl der Messungen für jeweils einen Messpunkt (hier: Jitterwert eines Pakets) angegeben werden. Folgende Messpunkte werden verwendet: 21 Punkte zwischen 0 ms und 20 ms (jeweils 1 ms Differenz) und 9 Punkte zwischen 40 ms und 200 ms (jeweils 20 ms Differenz). Die konkreten Jitterwerte werden durch eine Exponentialverteilung ermittelt, deren Erwartungswerte den jeweiligen Messpunkten entsprechen. Ein Paketverlust wird in dem Fall angenommen, in welchem der vorhandene Jitter des Pakets einen Wert überschreitet, den der aktuell dimensionierte Jitterbuffer aufnehmen kann.

– *Verluste auf der Übertragungsstrecke (Netzwerk)*

Verluste können u.a. durch Datenverfälschungen entstehen, die durch äußere Störeinflüsse verursacht werden. Ein so verändertes Paket wird von dem folgenden Netzwerkknoten empfangen, die Verfälschung anhand der Überprüfung des CRC-Felds entdeckt und das Paket anschließend verworfen. Weiterhin können Verluste aufgrund von Überlastungen des Netzwerks auftreten.

– *Verluste anhand einer Trace-Datei*

Bei dieser Datei handelt es sich um einen Mitschnitt einer VoIP-Verbindung, welche mittels der pcap-API (packet capture) aufgenommen wurde. Zusätzlich werden auf der Benutzeroberfläche noch die Quell- und Zieladresse benötigt, die für die Filterung der entsprechenden RTP-Pakete innerhalb dieser Datei verwendet werden. Die Sequenznummern der Pakete werden ausgewertet, die Paketverluste und die durchschnittliche Burstgröße werden bestimmt und der resultierende QoS-Wert wird ausgegeben. Außerdem wird eine CSV-Datei erstellt, die zusätzlich die analysierten Pakete mit den zugehörigen Sequenznummern enthält.

Das Tool QoSCalc(VoIP) wurde unter Verwendung der Programmiersprache C++ implementiert. Die Abb. 8.2 zeigt die aufgebaute Bedienoberfläche des erstellten Tools. Zur Bedienung des Tools: Zunächst ist es notwendig, eine für den zu untersuchenden Algorithmus geeignete Referenzdatei auszuwählen. In der ITU-T-Empfehlung [77] sind einige Referenzdateien zu finden, die an dieser Stelle in Anspruch genommen werden können. Wird als Ursprung der

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

Verluste eine Trace-Datei gewählt, ist die Angabe einer Referenzdatei nicht nötig, da sich die benötigten Informationen in den einzelnen RTP-Dateien des Netzwerkmittschnitts befinden. Wird ein anderer Verlust-Ursprung gewählt, wird das ausgewählte Signal daraufhin analysiert und u.a. dessen Abtastrate und Sampleanzahl ermittelt. Es ist möglich, diese Sprachdatei für die signalbasierten Berechnungen zu vergrößern, indem angegeben wird, aus wie vielen dieser Signale sich das für die Untersuchungen zu verwendete Signal zusammensetzt (Wave Length, vgl. Abb. 8.2). Aus der anschließenden Auswahl der Bewertungsmethode (PESQ, POLQA, E-Modell, EIP-Modell, A-Modell) ergeben sich grundsätzliche Änderungen an den zur Verfügung stehenden Einstellungsmöglichkeiten auf der Benutzeroberfläche. Für das parameterbasierte E-Modell ist es möglich, die Parameter Bpl und Ie anzupassen. Über die Default-Buttons werden die Werte entsprechend der Empfehlung [64] gesetzt.

In jedem Fall, außer bei der Verwendung einer Trace-Datei, ist die Auswahl des zu verwendenden Codecs notwendig. Dieser legt Werte auf der Benutzeroberfläche fest, wie u.a. die maximale Anzahl an Blöcken pro Paket und die Größe eines Blocks in Millisekunden. Bei einem Block handelt es sich um eine für jeden Codec fest definierte Anzahl an Sprachsamples, die wiederum einen entsprechenden zeitlichen Anteil des Signals ergeben. Jeder Codec besitzt eine feste Blocklänge, wobei sich die einzelnen RTP-Pakete aus einer frei wählbaren Anzahl an Blöcken zusammensetzen. Zudem legt die Codec-Wahl die Default-Werte für die E-Modell Parameter Bpl und Ie fest und bestimmt, ob entweder der Schmalband- oder der Breitband-Modus der verwendeten Bewertungsmethode verwendet wird. Unterstützt werden zu diesem Zeitpunkt folgende Codecs: G.711 a-Law, G.711 μ -Law, G.711.1 (64 kbit/s, 80 kbit/s, 96 kbit/s), G.721, G.723.1, G.726 (16 kbit/s, 24 kbit/s, 32 kbit/s, 40 kbit/s), G.729a, GSM, iLBC, G.722 (64 kbit/s), G.722.2 (6,6 kbit/s, 8,85 kbit/s, 12,65 kbit/s, 14,25 kbit/s, 15,85 kbit/s, 18,25 kbit/s, 19,85 kbit/s, 23,05 kbit/s, 23,85 kbit/s) und MP3 (64 kbit/s, 80 kbit/s, 96 kbit/s, 128 kbit/s).

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

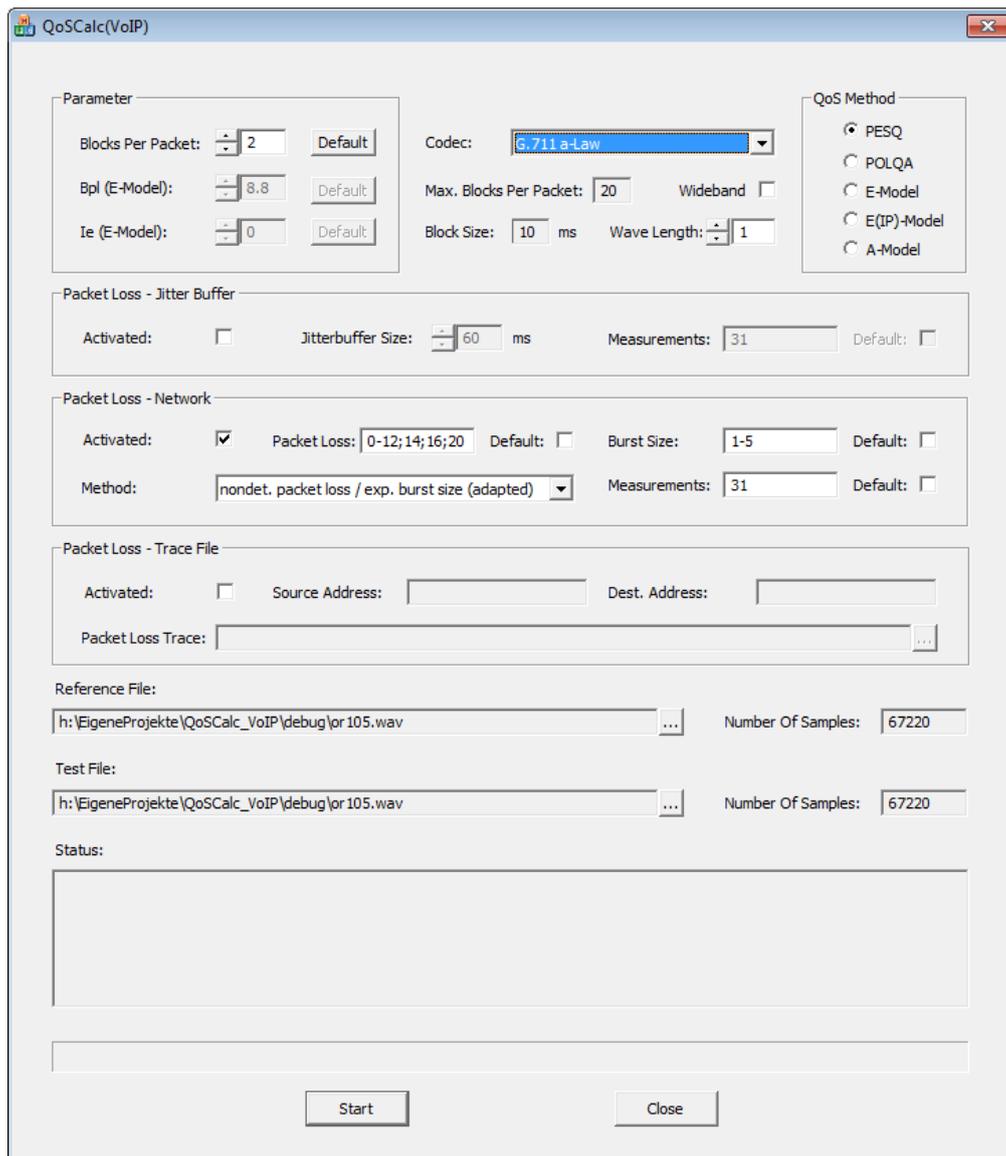


Abb. 8.2: Benutzerschnittstelle des erstellten Tools [112]

Für die Berechnung der QoS-Werte bei Netzverlusten stehen vier unterschiedliche Einstellungen der Bestimmung der Paketverluste zur Auswahl: deterministisch verteilte Verluste mit einer festen Burstgröße, binomialverteilte Verluste mit einer festen Burstgröße, binomialverteilte Verluste mit einer exponentialverteilten Burstgröße (gerundet nach DIN 1333) und das Markov-Verlustmodell. Bei den ersten drei Verlustarten wird die Bündelung der auftretenden Paketverluste unabhängig von dem aktuellen Paketverlust betrachtet. Höhere Verlustraten führen allerdings zwangsläufig auch zu einer Häufung von direkt aufeinanderfolgenden Verlusten. Der Faktor *Burst Ratio* (*BurstR*) des Markov-Verlustmodells drückt diese Häufung in Abhängigkeit von dem aktuellen Verlust aus (vgl. Abschn. 6.2.3).

8 Entwicklung eines numerischen Tools zur Untersuchung der QoS bei VoIP

Grundsätzlich wird am Ende der Messreihe eine CSV-Datei mit den QoS-Werten, den Paketverlusten und gegebenenfalls den Burstgrößen erstellt. Außerdem werden für jeden Messpunkt das arithmetische Mittel, die Standardabweichung und ein Konfidenzintervall berechnet. Anschließend werden diese Werte mittels eines VBA-Makros in entsprechende Excel-Datenblätter übernommen, in denen die Kurvenverläufe dargestellt werden.

In [107] wird ein Software-Tool beschrieben, in welchem die Übertragung von Datenpaketen auf eine vergleichbare Art und Weise simuliert werden kann und mittels verschiedener Codecs und Verlustwahrscheinlichkeiten und -verteilungen Beeinträchtigungen erzeugt werden können. Dieses Tool behandelt den VToIP-Bereich (Video Telephony over IP) und verwendet daher entsprechende Video-Bewertungsmethoden, wie u.a. der signalbasierte PEVQ-Algorithmus (Perceptual Evaluation of Video Quality) oder das in [116] entwickelte parameterbasierte VS-Modell (Video Streaming).

Das Tool QoSCalc(VoIP) wurde in umfangreichen Tests auf die Funktionalität und Verwendbarkeit untersucht. Diese Tests haben eindeutig die Eignung des Tools für solche VoIP-Untersuchungen bestätigt. Auch ein Vergleich mit praktischen Messsystemen (z.B. TraceSim der Firma Nextragen [103]) ist positiv ausgefallen und hat die Verwendbarkeit des Tools in einer numerischen VoIP-Umgebung untermauert. Dementsprechend ist es möglich, es bei der Erarbeitung der neuen, parameterbasierten QoS-Modelle für den Dienst VoIP einzusetzen.

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

9.1 Anforderungen an die Referenzsignale

Gemäß der Empfehlung P.830 der ITU-T [77] sollten Referenz-Sprachsignale aus einfachen und sinnvollen Äußerungen mit leicht verständlichen Sätzen bestehen. Die Sprache sollte in 2-3 Abschnitte unterteilt sein, die jeweils mit Stille voneinander getrennt sind und derart zusammengestellt und vorgetragen werden, dass keine offensichtlichen Gedankengänge zwischen den Sätzen erkennbar sind. Besonders kurze oder lange Äußerungen sollten vermieden werden. Im Idealfall sollten sie zwischen 2 und 3 Sekunden lang sein. Das gesamte Referenzsignal sollte zwischen 8 und 12 Sekunden lang sein, wobei zwischen 40% und 80% gesprochen werden sollte. Sollten längere Pausen erwünscht sein, ist es ratsam, mehrere Aufnahmen mit jeweils 8-12 Sekunden zu erzeugen.

Der Raum, in dem die Aufnahme erfolgt, sollte eine Nachhallzeit von unter 500 ms und Umgebungsgeräusche von maximal 30 dBA aufweisen und die Aufnahmegeräte sollten von hoher Qualität sein. Die Sprecher sollten ihre Sätze fließend aber nicht dramatisch und in einer möglichst konstanten Lautstärke sprechen. Störgeräusche, wie z.B. Papierrascheln, sollte vermieden werden. Die aktuelle Gesamtlautstärke sollte ständig überwacht werden und zwischen 20 dBA und 30 dBA liegen. Jeder außerhalb dieser Grenzen liegende Satz sollte aussortiert und erneut aufgenommen werden. Störungen des Signals durch überflüssige Quantisierungen, Clipping oder weiteres Abtasten sollten vermieden werden. Sowohl das Referenzsignal als auch das verminderte Signal sollten für Schmalband-Untersuchungen mit einer Abtastrate von 8 kHz bei einer linearen PCM-Auflösung von 16 Bit vorliegen.

Die ITU-T stellt unter [74] eine Auswahl an Referenzsignalen bereit, die für die Verwendung bei dem PESQ-Algorithmus geeignet sind. Auch die Firma Opticom als deutscher Lizenzinhaber für den PESQ-Algorithmus stellt auf ihrer Homepage einige geeignete Referenzdateien zur Verfügung [108]. Im Rahmen der im folgenden Abschnitt durchgeführten Gegenüberstellung werden folgende Signale verwendet:

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

- DefaultRefFile.wav (Opticom)
- DefaultRefFileGerman.wav (Opticom)
- DefaultRefFileMixed.wav (Opticom)
- PESQRef.wav (Opticom)
- Or105.wav (ITU-T)

Abb. 9.1 zeigt den Aufbau dieser 5 Signale (Reihenfolge: s. obige Aufzählung).



Abb. 9.1: Charakteristiken ausgewählter Schmalband-Referenzsignale [114]

Die hier dargestellten Wellenformen weisen eine große Anzahl der zuvor erwähnten Anforderungen an Referenzsignale für den PESQ-Algorithmus auf, wie u.a. die Gesamtdauer, das Verhältnis von Sprache zu Pause, die Anzahl der Sprachsegmente und die Signalamplitude. Der Vergleich zeigt aber auch große Unterschiede zwischen den Signalen. Welchen Einfluss diese Unterschiede auf die resultierenden QoS-Werte des PESQ-Algorithmus haben, wird in den Untersuchungen des folgenden Abschnitts analysiert werden.

9.2 Gegenüberstellung verschiedener Referenzsignale

In der Vergleichsstudie werden unter Verwendung des Tools QoSCalc(VoIP) (vgl. Kap. 8) folgende Parameter angenommen:

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

- Binomialverteilte Paketverluste zwischen 0 % und 20 %.
- Burstfreie Übertragung und exponentialverteilte Burstgröße mit Durchschnittswerten von 5 und 10 (gerundet nach DIN 1333).
- Sprachcodec G.711 A-law.
- Sprachprobenlänge von 20 ms.
- 31 Messungen je Wert der verwendeten Veränderlichen (hier: Paketverluste). Damit werden Konfidenzintervalle erreicht, die kleiner als 10% der untersuchten Mittelwerte sind (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).
- PESQ-Algorithmus als QoS-Bewertungsmethode.

In Abb. 9.2 bis Abb. 9.8 werden die Ergebnisse der Vergleichsstudie illustriert.

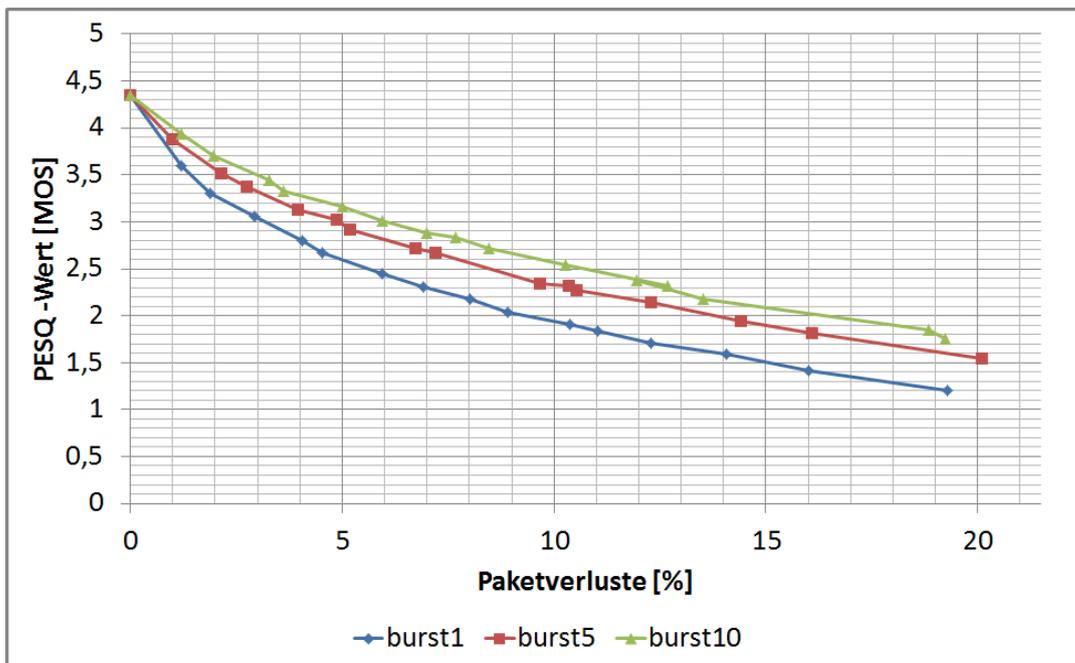


Abb. 9.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefFile.wav“ [114]

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

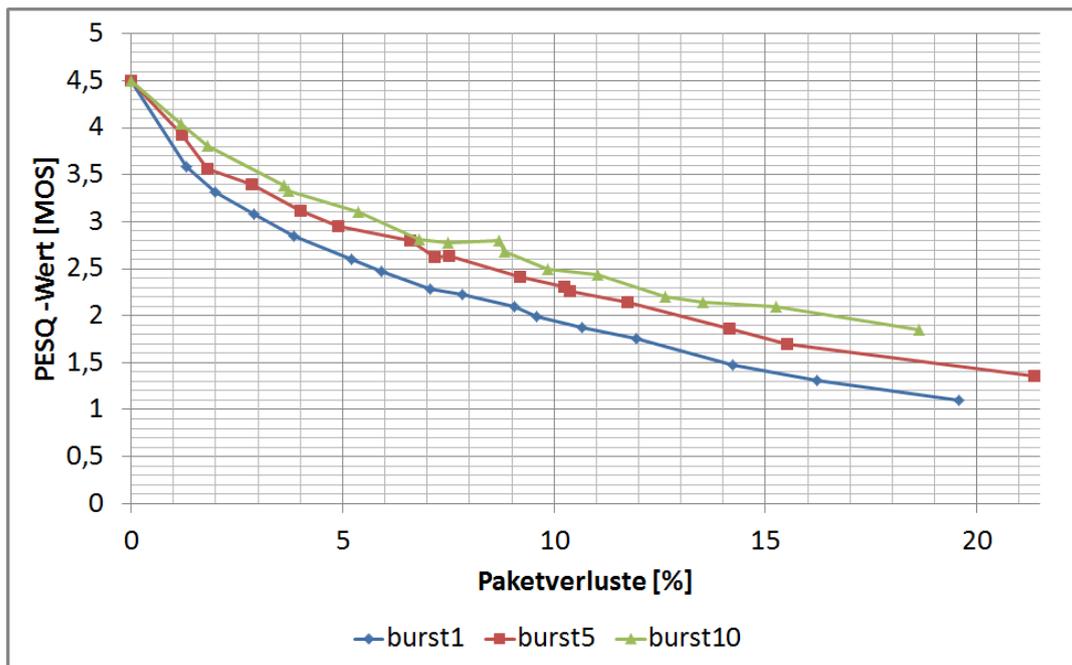


Abb. 9.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefFileGerman.wav“ [114]

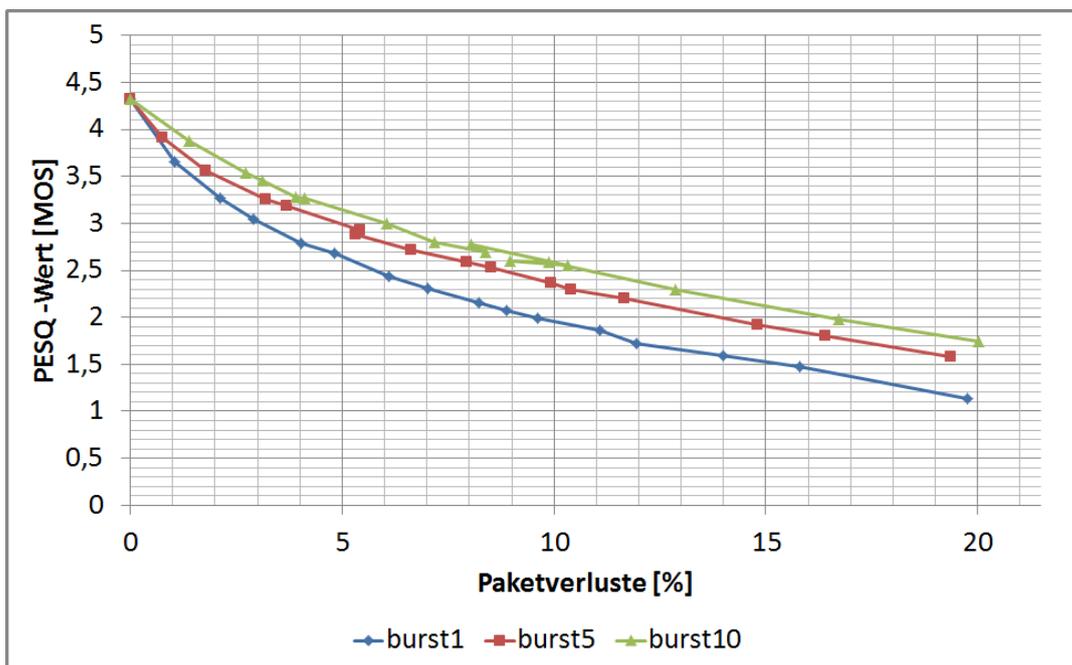


Abb. 9.4: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „DefaultRefMixed.wav“ [114]

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

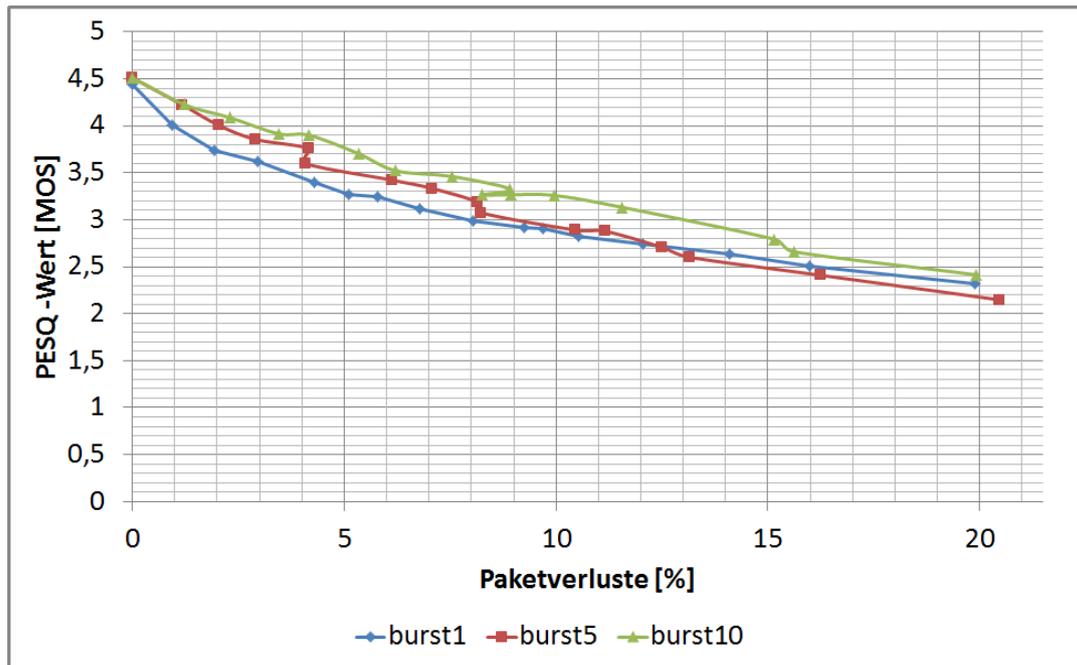


Abb. 9.5: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „PESQRef.wav“ [114]

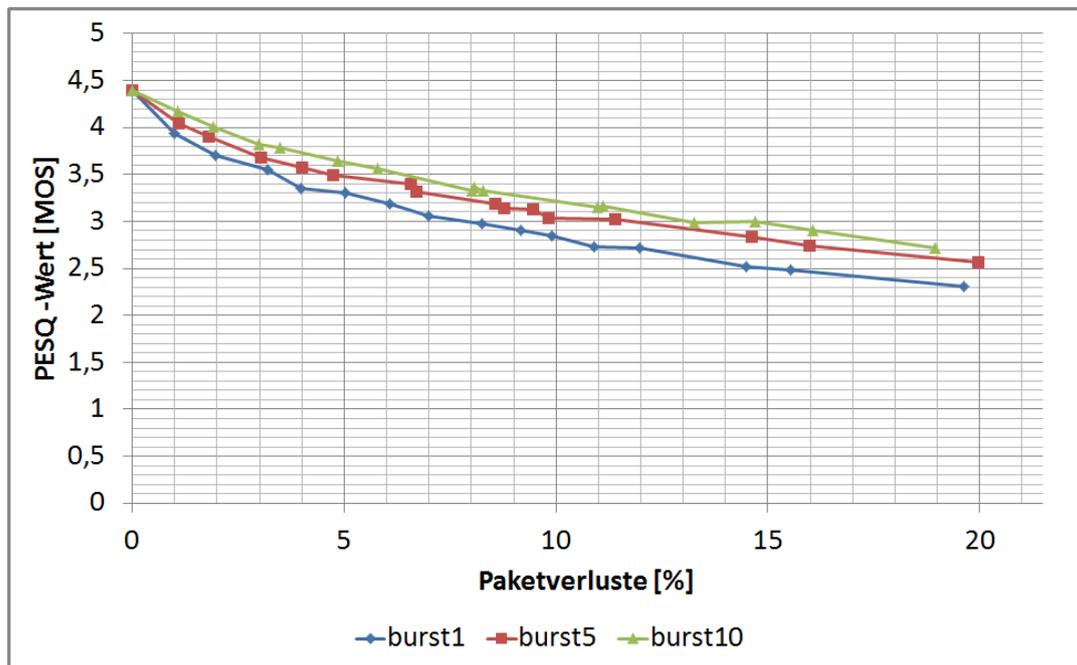


Abb. 9.6: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für den Sprachcodec G.711 A-law unter Einsatz des Referenzsignals „Or105.wav“ [114]

Die in den Abb. 9.2 bis Abb. 9.6 gezeigten QoS-Kurven zeigen leicht exponentielle Verläufe. Außerdem wird der erhebliche Einfluss der Burstgröße auf die Sprachqualität deutlich. In

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

allen Fällen führt eine Burstgröße von 1 zu den schlechtesten Qualitätswerten, wobei sich bei steigenden Größen die Dienstgüte entsprechend erhöht. Die beiden letzten Szenarien (Abb. 9.5 und Abb. 9.6) zeigen wesentlich höhere Robustheiten gegenüber Paketverlusten als die Kurven der übrigen Referenzdateien. Dies lässt sich mit dem höheren Sprachanteil in den ersten 3 Szenarien erklären. Bei steigenden Paketverlusten gehen hier größere Anteile an Sprache verloren, während in den beiden letzten Szenarien eher Pakete verloren gehen, die hauptsächlich Stille beinhalten. Für alle hier untersuchten Referenzdateien werden für den Sprachcodec G.711 A-law in einer verlustfreien Umgebung vergleichbare PESQ-Werte von ca. 4,4 MOS erzielt.

Von dem PESQ-Algorithmus werden einige Warnungen ausgegeben:

- Das Referenzsignal ist zu kurz (Abb. 9.2)
- Aktiv-Sprachpegel des Referenzsignals zu hoch; sollte bei etwa -30 dBoV liegen (Abb. 9.2)
- Aktiv-Sprachpegel des Testsignals zu hoch; sollte bei etwa -30 dBoV liegen (Abb. 9.2)
- Führende Stille des Referenzsignals zu kurz (Abb. 9.2)
- Endende Stille des Referenzsignals zu kurz (Abb. 9.2 und Abb. 9.4)
- Führende Stille des Testsignals zu kurz (Abb. 9.2)
- Endende Stille des Testsignals zu kurz (Abb. 9.2 und Abb. 9.4)
- Pegel des Grundrauschens sollte bei etwa -75 dBoV liegen (Abb. 9.2 bis Abb. 9.6)
- Zeitliche Struktur der Signale ist kritisch (Abb. 9.2 bis Abb. 9.4)

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Dateien PESQRef.wav (Opticom; Abb. 9.5) und Or105.wav (ITU; Abb. 9.6) die wenigsten Warnungen ausgegeben werden. Diese entsprechen daher am ehesten den Anforderungen, die an die Referenzsignale gestellt werden und können daher für weitere QoS-Messungen empfohlen werden.

In der Praxis ist es häufig erforderlich, die Dienstgüte über einen längeren Zeitraum zu messen. Dabei stellen sich die Fragen: Sollten bei solchen Untersuchungen mehrere Messungen mit einem kürzeren Signal oder eine Messung mit einem längeren Signal durchgeführt werden? Wie verhält sich der PESQ-Algorithmus in solchen Szenarien. Im Folgenden werden diese Fragen näher untersucht werden.

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

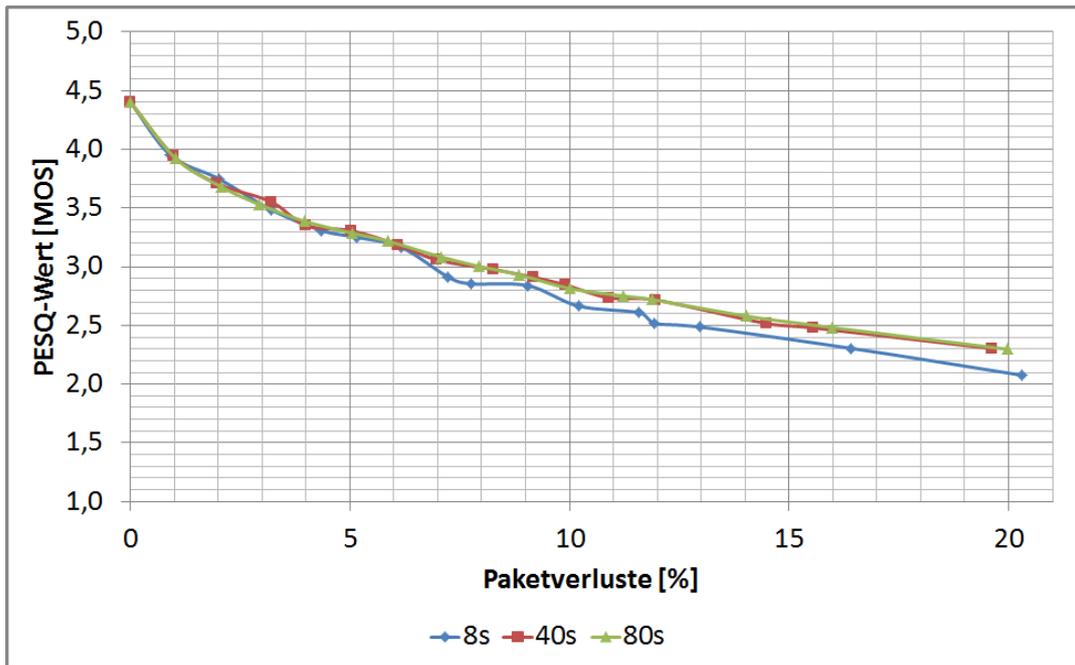


Abb. 9.7: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste bei einer burstfreien Übertragung für den Sprachcodec G.711 A-law, dem Referenzsignal Or105.wav und unterschiedlichen Signallängen [114]

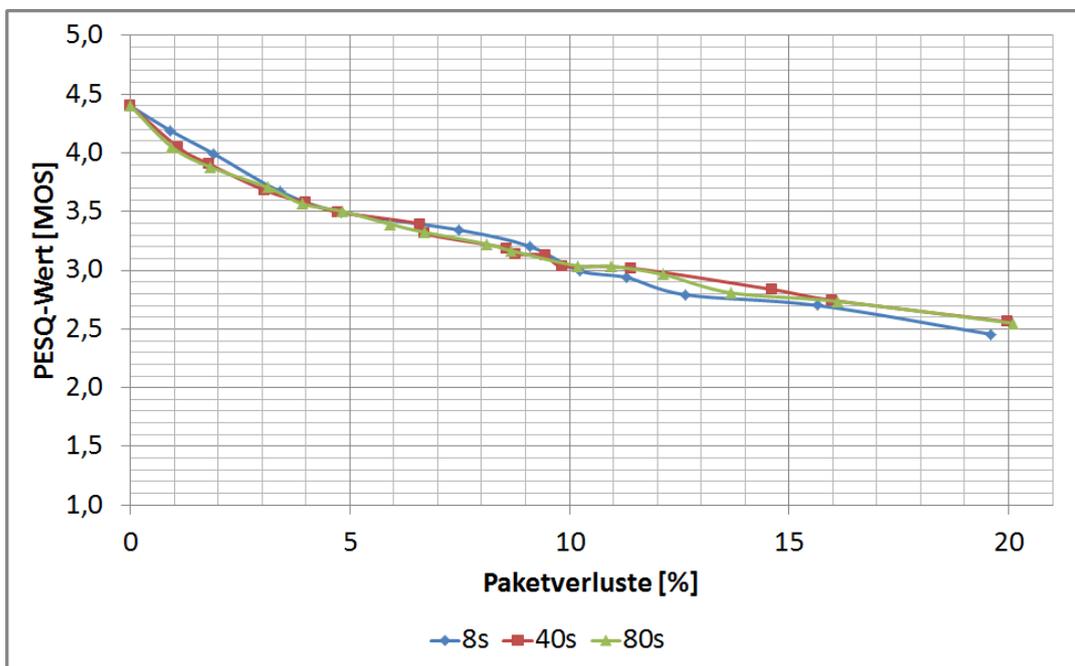


Abb. 9.8: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 5 für den Sprachcodec G.711 A-law, dem Referenzsignal Or105.wav und unterschiedlichen Signallängen [114]

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

In der nachkommenden Analyse-Serie wird die für den PESQ-Algorithmus besonders geeignete Referenzdatei Or105.wav eingesetzt. Durch einfaches Kopieren und Anfügen des ursprünglichen 8 s langen Signals werden zunächst sowohl ein 40 s als auch ein 80 s langes Signal erzeugt. Alle 3 Dateien beinhalten homogene Daten von unterschiedlicher Länge und werden in der anschließenden numerischen Simulation miteinander verglichen. Die Abb. 9.7 und Abb. 9.8 zeigen die entsprechenden Kurvenverläufe für eine Burstgröße von 1 und eine durchschnittliche Burstgröße von 5.

Die QoS-Kurven aus den Abbildungen illustrieren, dass eine längere Dauer von Signalen zu glatteren Verläufen mit geringen Streuungen führt. Für die Praxis lässt sich daraus ableiten, dass es für Messungen mit einer langen Dauer sinnvoll ist, längere Referenzsignale mit identischem Inhalt zu verwenden, um so ausgewogenere QoS-Werte zu erhalten. Der PESQ-Algorithmus arbeitet auch mit längeren Dateien zuverlässig und gibt keine wesentlichen Warnungen aus. Zusätzlich sollte erwähnt werden, dass bei nur einer Messung mit einer größeren Referenzdatei lediglich eine einzige Synchronisation innerhalb der RTP-Session nötig ist. Dies hat eine wesentliche Verringerung des Messaufwandes zur Folge und ist daher in praktischen Messszenarien von Vorteil.

In einer weiteren numerischen Studie, auf die an dieser Stelle nicht weiter eingegangen wird, wurden weitere in der Praxis häufig verwendete Sprachcodecs, wie u.a. GSM, iLBC und G.723.1, eingesetzt. Auch hier bestätigten sich die oben ausgeführten Schlussfolgerungen bezüglich des positiven Einflusses der Länge der benutzten Referenzsignale auf die Dienstgüte.

Es wurde aufgezeigt, dass Referenzsignale für die Tauglichkeit in signalbasierten Bewertungsmethoden eine ganze Bandbreite an Anforderungen erfüllen müssen, die dazu führen, dass nur wenige Dateien für den Einsatz in solchen Untersuchungsszenarien geeignet sind. Die Unterschiede zwischen den erzielten QoS-Werten können in Abhängigkeit der eingesetzten Referenzsignale erhebliche Proportionen annehmen. Dies kann wiederum zur Folge haben, dass die Beurteilung der gewonnenen Werte und Kurvenverläufe zu inkonsistenten Schlüssen führen kann. Die Wahl eines geeigneten Referenzsignals ist daher von großer Bedeutung. Es wurde zudem gezeigt, dass das von der ITU-T bereitgestellte Referenzsignal Or105.wav und die von der Firma Opticom erhältliche Referenzdatei PESQRef.wav für die Verwendung in dem PESQ-Algorithmus geeignet sind.

9 Referenzsignale bei dem PESQ-Algorithmus

Weiterhin ist im Rahmen der Untersuchungen deutlich geworden, dass es für Messungen über einen längeren Zeitraum von Vorteil ist, längere Signale mit wiederkehrendem Inhalt statt des entsprechenden kürzeren Signals einzusetzen. Aufgrund der verminderten Streuung haben die ermittelten QoS-Werte eine stärkere Aussagekraft. Außerdem kann der praktische Messaufwand durch den Einsatz größerer Dateien verringert werden. 2010 wurden die in diesem Kapitel gewonnen Erkenntnisse auf der Konferenz CTRQ in Athen präsentiert [114].

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden ausschließlich Schmalband-Signale (300 Hz–3400 Hz) verglichen. Zunehmend Verwendung in VoIP-Umgebungen finden Breitband-Sprachcodecs (50 Hz–7000 Hz), wie u.a. G.722, G.722.1, G.722.2 und G.711.1. Mittlerweile wurde zudem eine neue Version des PESQ-Algorithmus veröffentlicht, die die Analyse des erweiterten Frequenzbereiches unterstützt. Auf der Homepage der Firma Opticom [108] ist eine Auswahl an Breitband-Referenzdateien abrufbar, die ebenfalls auf die Tauglichkeit für die Breitband-Version des PESQ-Algorithmus untersucht werden sollten. Die in diesem Kapitel aufgeführten Untersuchungsmethoden können als Basis für eine solche Analyse dienen.

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

Für einen Großteil der aktuellen VoIP-Implementierungen stellen Breitband-Codecs (50 Hz–7000 Hz) einen sinnvollen Kompromiss aus Dienstgüte und benötigter Bandbreite dar. Es existiert zurzeit eine Reihe von Breitband-Sprachcodecs, u.a. G.711.1, G.722, usw.. Sie weisen eine Reihe von unterschiedlichen Eigenschaften auf. Große Unterschiede sind u.a. in den genutzten Codierungsraten und in der Robustheit gegenüber Paketverlusten zu vermerken. Ein weiteres Merkmal stellt die Beeinflussung der Sprachqualität durch die einzelnen Codecs dar. Diese Qualität wird für gewöhnlich in subjektiven Tests festgestellt. Dabei wird für die Darstellung der Beurteilung die bekannte MOS-Skala genutzt. In der Praxis werden zur Feststellung der QoS in VoIP-Umgebungen (unter Verwendung verschiedenen Codecs) für gewöhnlich folgende Bewertungsmethoden eingesetzt: das E-Modell und der PESQ-Algorithmus. Für die beiden Methoden stehen zwei Versionen zur Verfügung: Schmalband (NB) und Breitband (WB). Im Fall des E-Modells werden die Parameter *Bpl* und *Ie* des jeweiligen Codecs benötigt. Leider sind diese nicht für alle auf dem Markt verfügbaren Sprachcodecs bekannt. Eine besondere Lücke ist hier im Fall der Breitband-Codecs zu verzeichnen. Aus diesem Grund wird in dieser Vergleichsstudie der PESQ-Algorithmus verwendet.

10.1 Der Codec G.711.1

Der Sprachcodec G.711.1 der ITU-T [67] ist eine Erweiterung des Codecs G.711 und unterstützt sowohl mit 8 kHz (Schmalband) als auch mit 16 kHz (Breitband) abgetastete Audiosignale. Schmalband-Signale werden durch einen PCM-Kodierer sowohl zu einem Kern-Bitstrom (64 kbit/s) als auch einem Erweiterungs-Bitstrom (16 kbit/s) kodiert. Die hohen Frequenzen eines Breitband-Signals werden mittels einer modifizierten diskreten Kosinustransformation (engl.: Modified Discrete Cosine Transform (MDCT)) zu einem Höherfrequenz-Bitstrom (16 kbit/s) kodiert. Zuletzt verbindet ein Multiplexer die einzelnen Bitströme. Abb. 10.1 zeigt die einzelnen Kodier-Phasen in einem Blockschaltbild.

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

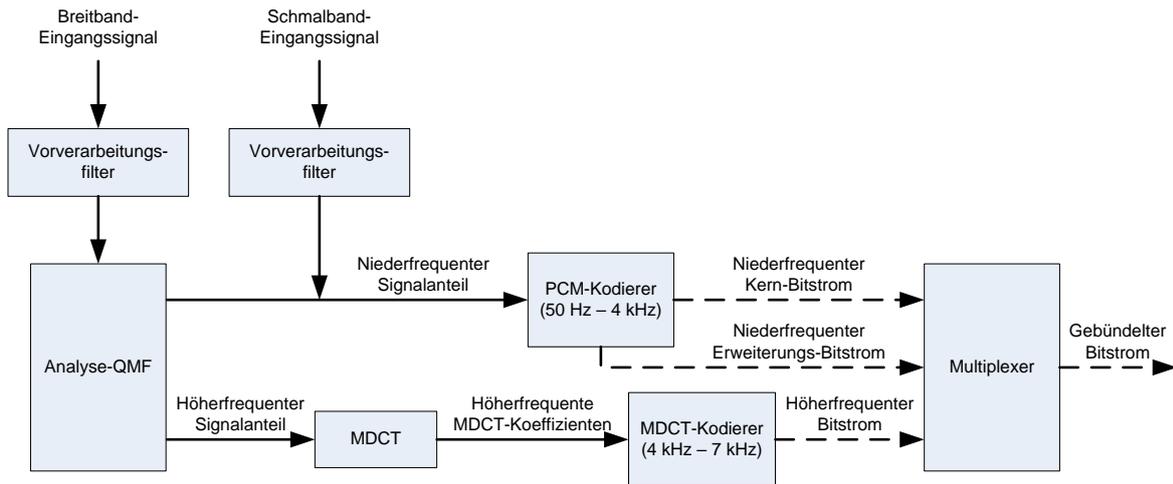


Abb. 10.1: Block-Diagramm des G.711.1-Kodierers (in Anlehnung an [115])

Tab. 10.1: Die Modi des G.711.1-Codecs [115]

Modus	Abtastrate [kHz]	Kern-Layer (Layer 0)	Niederfrequenter Erweiterungs-Layer (Layer 1)	Höherfrequenter Erweiterungs-Layer (Layer 2)	Gesamt-Bitrate [kbit/s]
		64 kbit/s	16 kbit/s	16 kbit/s	
R1	8	x	-	-	64
R2a	8	x	x	-	80
R2b	16	x	-	x	80
R3	16	x	x	x	96

Die in Tab. 10.1 aufgelisteten Modi des Codecs zeigen zusätzlich die eingesetzten Kodier-Layer und resultierenden Bitraten.

10.2 Die Analyseumgebung

Für die Bestimmung des QoS-Wertes eines ca. 8-sekündigen Referenzsignals mittels des PESQ-Algorithmus wird in der Praxis auf einem handelsüblichen Büro-Rechner etwa 1 Minute benötigt. Um diese Zeit zu verringern und gleichzeitig eine große Anzahl an Messszenarien miteinzubeziehen, wird das Tool QoSCalc(VoIP) (vgl. Kap. 8) verwendet.

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

Für die Analysen werden folgende Parameter angenommen:

- Binomialverteilte Paketverluste von 0 % bis 20 %.
- Burstfreie Übertragung.
- 8-kHz-Signale: “p564_speech_spm2.bin”, “p564_speech_frfl.bin”, “p564_speech_ukf1.bin” und “p564_speech_spm1.bin” als Referenzsignale (gemäß der Empfehlung [74]).
- 16-kHz-Signale: “p564_speech_ukf1_wb.bin”, “p564_speech_spm2_wb.bin”, “p564_speech_jpf2_wb.bin” und “p564_speech_dem1_wb.bin” als Referenzsignale (gemäß der Empfehlung [74]).
- G.711.1 mit 64 kbit/s (Schmalband-Modus R1) und Sprachprobenlängen von 5 ms, 10 ms und 20 ms.
- G.711.1 mit 80 kbit/s (Schmalband-Modus R2a) und Sprachprobenlängen von 5 ms, 10 ms und 20 ms.
- G.711.1 mit 80 kbit/s (Breitband-Modus R2b) und Sprachprobenlängen von 5 ms, 10 ms und 20 ms.
- G.711.1 mit 96 kbit/s (Breitband-Modus R3) und Sprachprobenlängen von 5 ms, 10 ms und 20 ms.
- 31 Messungen je Messpunkt. Auf diese Weise ist es möglich, ein Konfidenzintervall von unter 10% des Durchschnittswertes bei einer Fehlerrate von 5% zu erhalten.
- PESQ auf der MOS-LQO-Skala als resultierende QoS-Werte.
- Einfügen von Stille im Falle eines Paketverlustes (vgl. Abschn. 5.5).

Die Ziele der gemäß den oben genannten Szenarien durchgeführten Untersuchungen sind zum einen die Bestimmung der QoS-Werte für den Codec G.711.1 mittels einer signalbasierten Bewertungsmethode (hier: PESQ) und zum anderen die Ermittlung geeigneter Parameter für das parameterbasierte E-Modell auf Basis dieser Werte. Der folgende Abschnitt befasst sich mit den Ergebnissen der Untersuchungsszenarien und deren Interpretation.

10.3 Die Ergebnisse

Die erste Untersuchungsreihe betrifft die Schmalband-Modi des Codecs G.711.1 in einer VoIP-Umgebung. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen Abb. 10.2 und Abb. 10.3. Die Kurven

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

zeigen, dass die Schmalband-Modi des Codecs in einer verlustfreien Umgebung mit QoS-Werten von ca. 4,5 MOS eine sehr hohe Sprachqualität ermöglichen. Die exponentiellen Kurven verlaufen recht flach, was auf eine gute Robustheit gegenüber Paketverlusten schließen lässt. Bemerkenswert ist hier, dass bei Verlusten von bis zu ca. 6 % (Praxisfall) kaum eine Beeinflussung der QoS-Werte durch die Größe der Sprachprobenlänge zu verzeichnen ist. Der Unterschied ist erst bei höheren Paketverlusten zu bemerken (nicht praxisrelevanter Fall). In diesem Bereich der Veränderlichen zeigt sich auch, dass bei der Verwendung von kleinen Sprachprobenlängen ein geringerer Einfluss auf die QoS-Werte zu erkennen ist, als dies bei der Verwendung von großen Sprachprobenlängen der Fall ist.

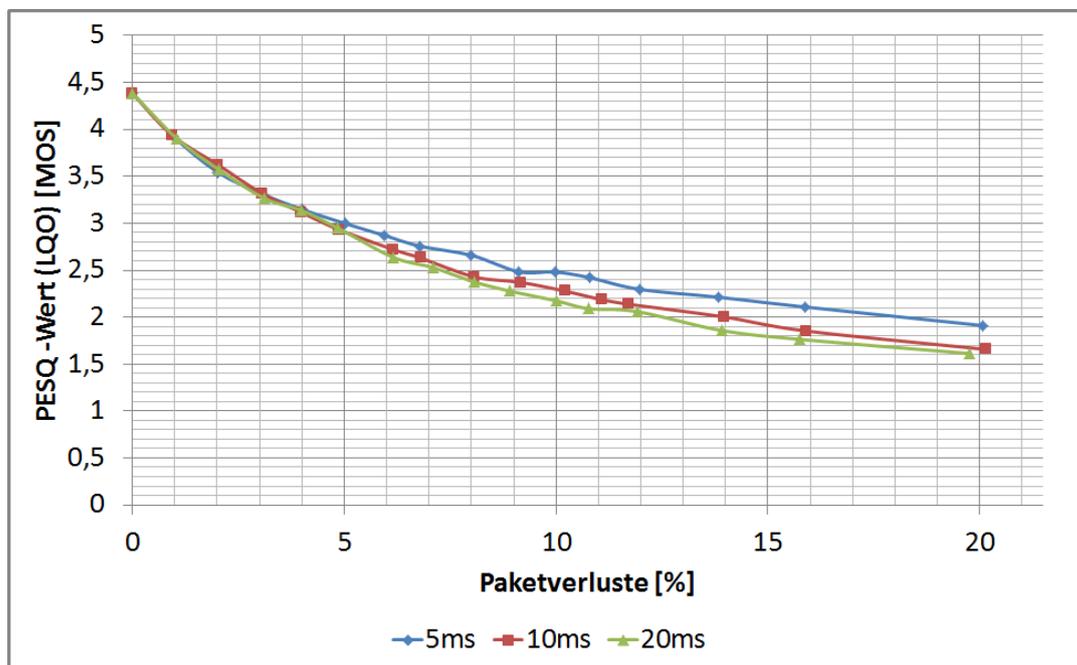


Abb. 10.2: Schmalband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R1 [115]

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

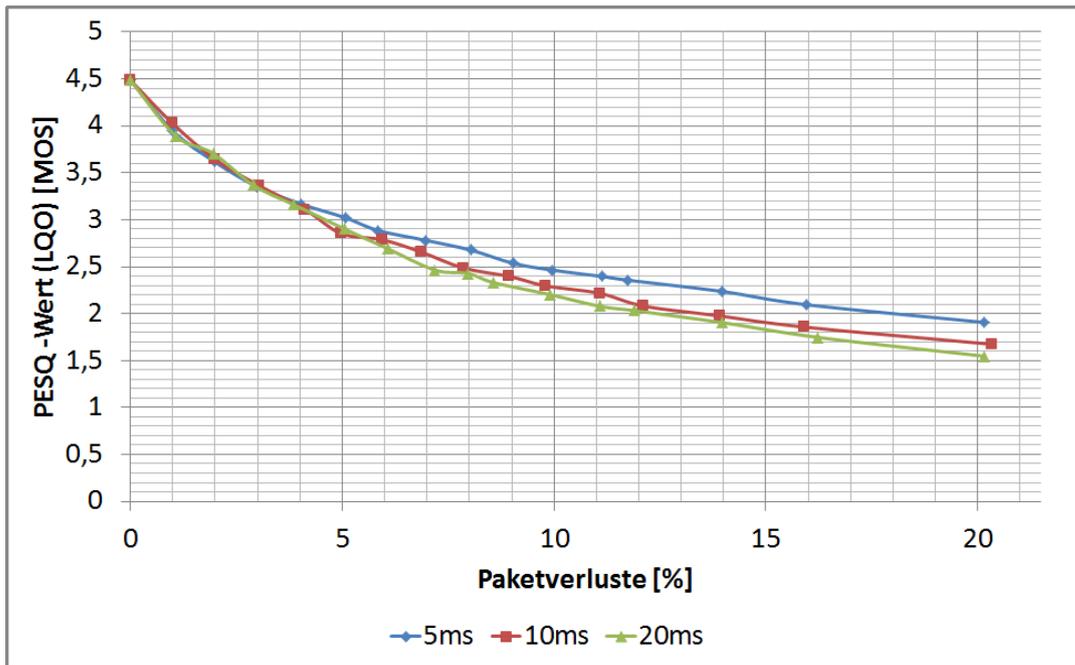


Abb. 10.3: Schmalband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R2a [115]

Die zweite Untersuchungsreihe betrifft die Breitband-Modi des Codecs G.711.1 in einer VoIP-Umgebung. Die erhaltenen Ergebnisse zeigen Abb. 10.4 und Abb. 10.5. Auch hier haben die QoS-Kurven einen exponentiellen Charakter, jedoch mit größerer Steilheit als im Schmalband-Fall. Dies bedeutet, dass diese Modi eine geringere Robustheit gegenüber Paketverlusten aufweisen als die Schmalband-Modi. Weiterhin ist zu erkennen, dass die Sprachprobenlänge bei geringen Paketverlusten einen bedeutend stärkeren Einfluss auf die QoS-Werte aufweist, als dies bei größeren Verlusten der Fall ist. Im Vergleich zu dem Schmalband-Fall entspricht dies den gegensätzlichen Verhältnissen. Außerdem ist abzulesen, dass der Modus R3 in einer Umgebung ohne Verluste einen äußerst hohen QoS-Wert aufweist (ca. 4,5 MOS). Die Diskrepanz zu dem Modus R2b kann hier mit der höheren Kodierungsrate von 96 kbit/s begründet werden (vgl. Tab. 10.1).

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

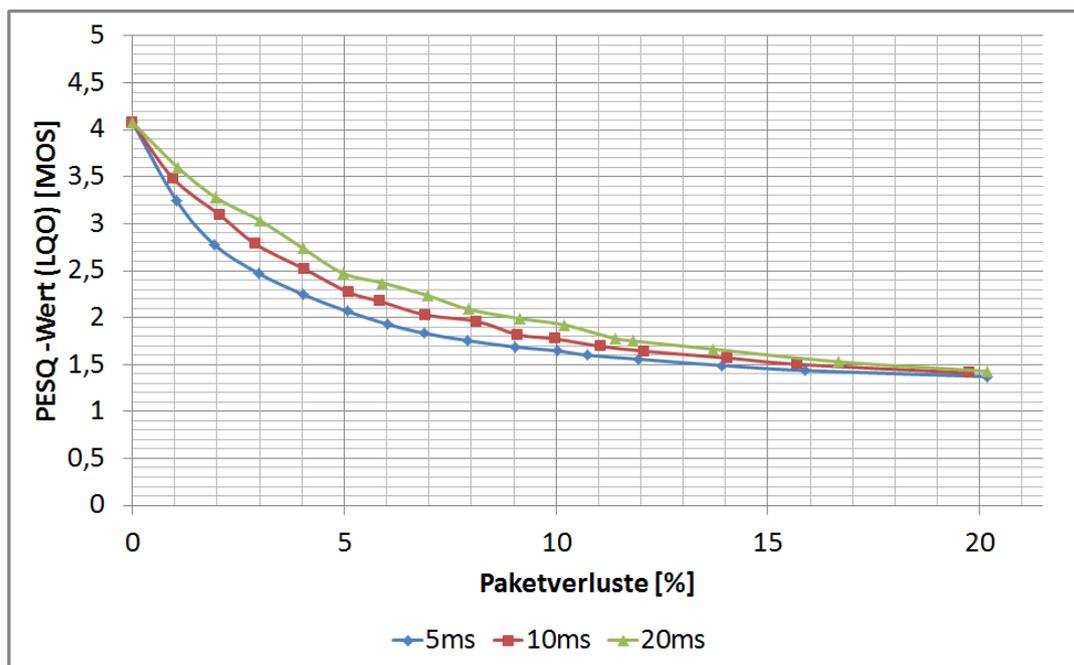


Abb. 10.4: Breitband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R2b [115]

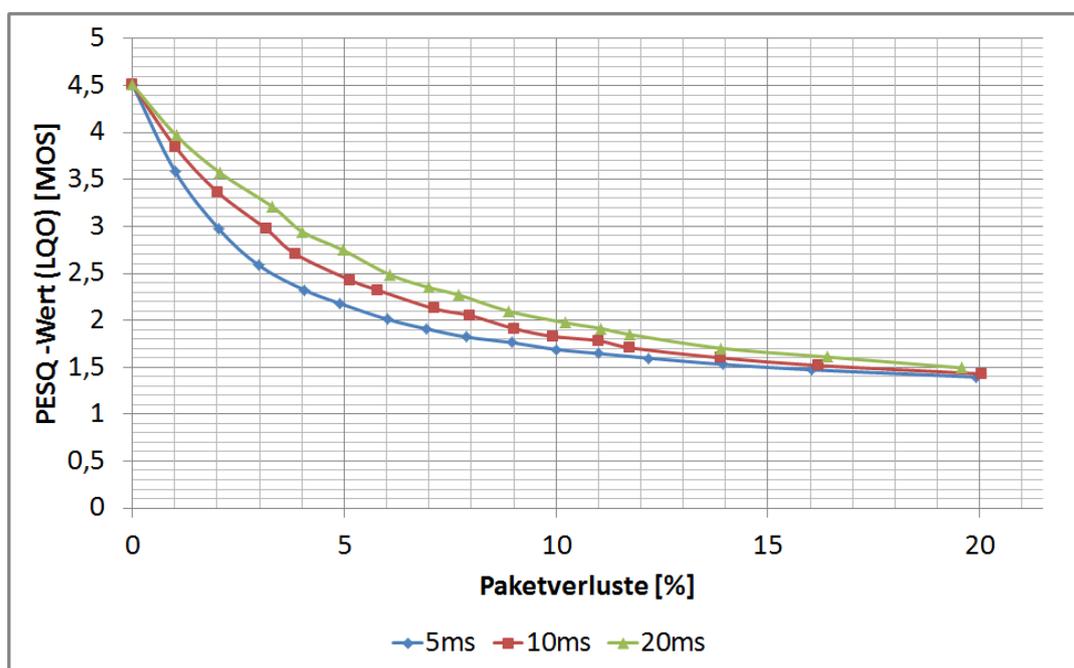


Abb. 10.5: Breitband-PESQ-Werte (MOS-LQO) als Funktion der Paketverluste und Sprachprobenlänge für den G.711.1-Modus R3 [115]

Die im Rahmen dieses Kapitels erhaltenen Ergebnisse wurden in [115] veröffentlicht und 2011 auf dem European Teletraffic Seminar in Posen präsentiert. Wie bereits zu Beginn

10 Schmalband-, Breitband- und Super-Breitband-Sprachcodecs : Ein Vergleich

dieses Kapitels erwähnt, konnte das E-Modell bei dieser Vergleichsstudie nicht verwendet werden, da für die Breitbandcodecs die Parameter Bpl und Ie nicht bekannt sind. Aus diesem Grund befasst sich das folgende Kapitel mit einer Anpassung des E-Modells für die Verwendung in IP-Umgebungen.

11 Das EIP-Modell

Wie bereits in Abschnitt 7.2.3 beschrieben, handelt es sich bei dem E-Modell um die am weitesten verbreitete parameterbasierte Bewertungsmethode für den VoIP-Dienst. Entwickelt wurde es ursprünglich als Planungsmodell für Telefonnetzbetreiber in leitungsvermittelnden Netzen. Der Einsatz des Modells in paketvermittelnden Netzwerken führt dazu, dass einige Charakteristiken der Datenübertragung in diesen Netzen nicht hinreichend in die Bewertung einfließen. In IP-Umgebungen kommt es vermehrt zu Übertragungsempfängen, da die Pfade, die die einzelnen Sprachpakete auf dem Weg zum Empfänger benutzen, nicht fest definiert sind. Überlastete Netzwerkknoten führen daher häufig zu Beeinträchtigungen, wie u.a. die Häufung von Paketverlusten durch das Verwerfen von verspätet ankommenden Paketen in einem Jitterbuffer (Bursts). Das E-Modell betrachtet diesen Faktor nicht und geht bei der Beurteilung von autonom auftretenden Einzelverlusten aus. In diesem Kapitel soll daher eine entsprechende Anpassung des E-Modells erarbeitet werden.

11.1 Anpassungsschritte

Um eine Anpassung des E-Modells für IP-Umgebungen zu erreichen (anwendbar auf beliebige Sprachcodecs), werden folgende Optimierungsschritte definiert und implementiert:

- *Schritt 1*
Bestimmung der PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste für Burstgrößen von 1 bis 10 und mehreren Sprachprobenlängen unter Verwendung des Tools QoS-Cal(VoIP).

- *Schritt 2*
Optimierung der Parameter Bpl und Ie des E-Modells unter Verwendung der Methode der kleinsten Quadrate. Die Ergebnisse des 1.Schritts dienen als Basis für diese Untersuchungen. Die Hauptvariable ist hier das Produkt der Burstgröße und Sprachproben-

11 Das EIP-Modell

länge (*BSLP*). Für jede untersuchte Sprachprobenlänge wird ein Satz an Kurven produziert.

– Schritt 3

Lineare Approximation der Kurven aus dem 2.Schritt. Bestimmung der mittleren Kurvenverläufe von *Bpl* und *Ie* für jeden Sprachcodec. Als Ergebnis werden lineare Gleichungen für *Bpl* und *Ie* als Funktion von *BSLP* generiert.

Die Ergebnisse der oben dargestellten Schritte werden beispielhaft mittels der folgenden Abbildungen unter Verwendung des Sprachcodex G.726 (32 kbit/s) anschaulich dargestellt.

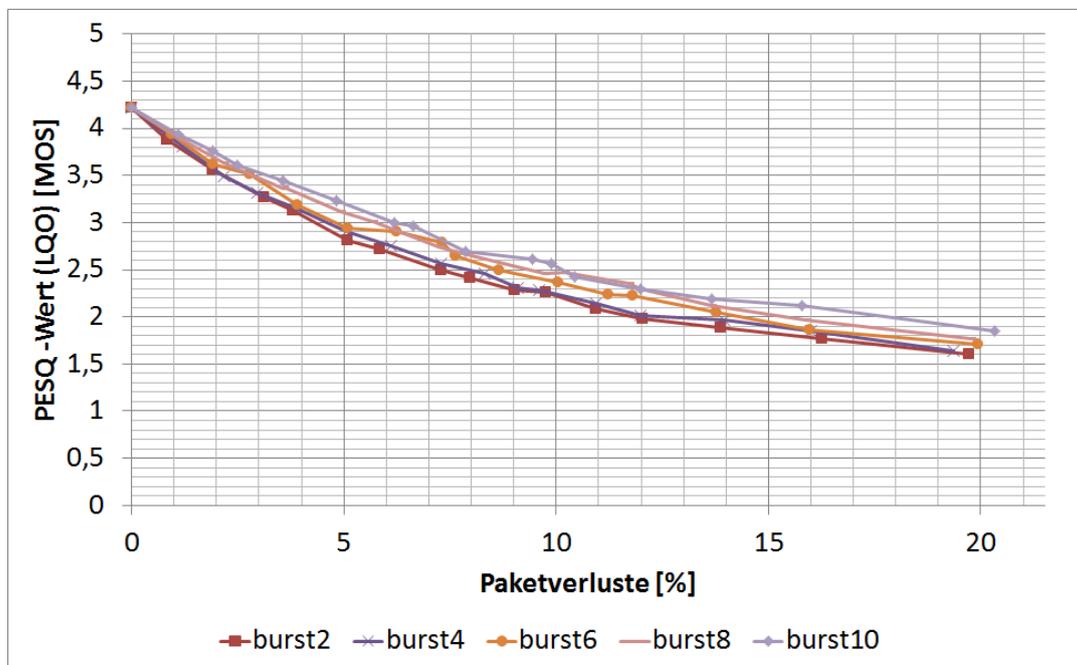


Abb. 11.1: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 10 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an [22])

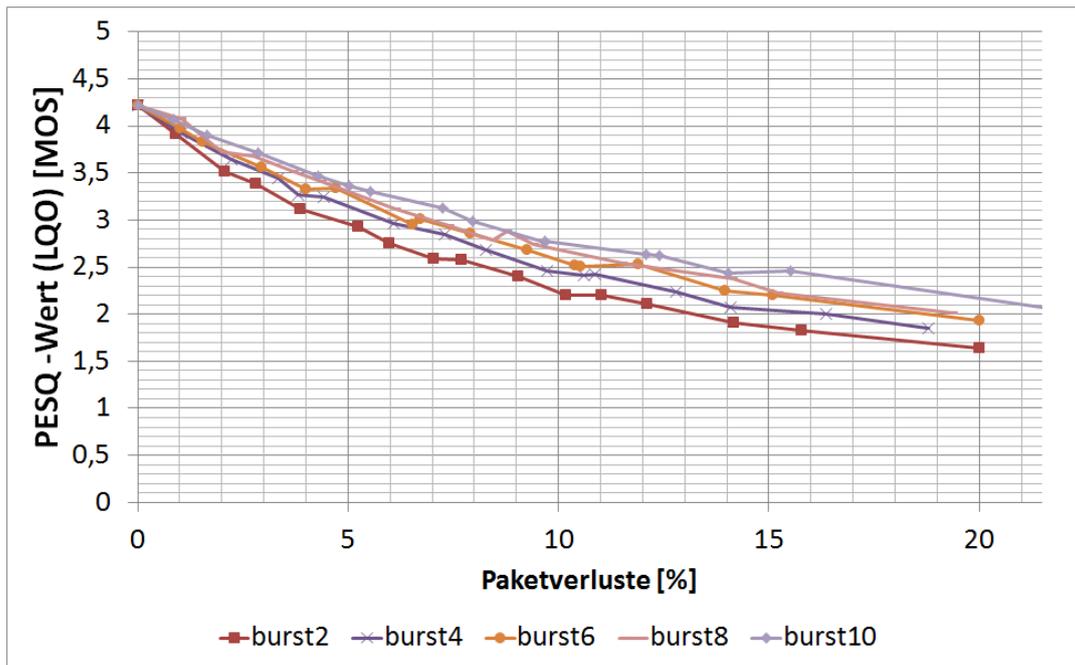


Abb. 11.2: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 20 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an [22])

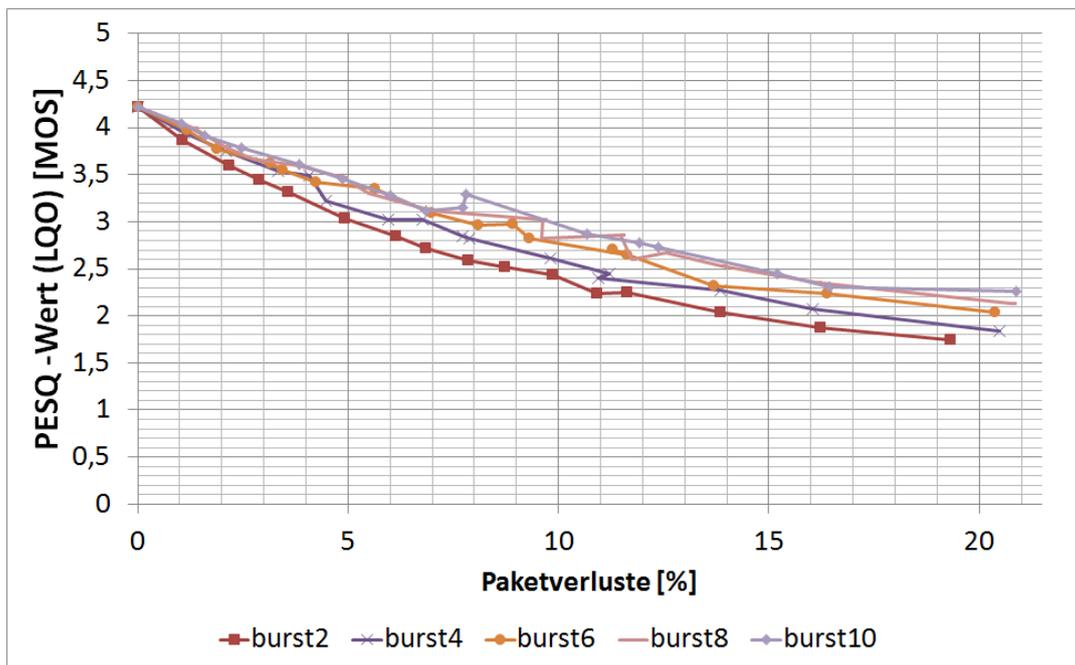


Abb. 11.3: PESQ-Werte (LQO) als Funktion der Paketverluste und Burstgröße bei einer Sprachprobenlänge von 30 ms (Schritt 1) (in Anlehnung an [22])

Die in den Abb. 11.1 bis Abb. 11.3 dargestellten Kurvenverläufe zeigen alle einen leicht exponentiellen Charakter. Sowohl die Burstgröße als auch die Sprachprobenlänge haben dabei

11 Das EIP-Modell

einen erheblichen Einfluss auf die Dienstgüte. Steigende Werte führen jeweils zu erhöhten QoS-Werten. Es zeigt sich, dass das gleiche Produkt aus der Burstgröße und der Sprachprobenlänge (*BSLP*) zu jeweils vergleichbaren QoS-Werten führt. Das EIP-Modell macht sich dieses Verhalten zunutze und verwendet das Produkt *BSLP* zur Bestimmung der Dienstgüte für den betreffenden Sprachcodec.

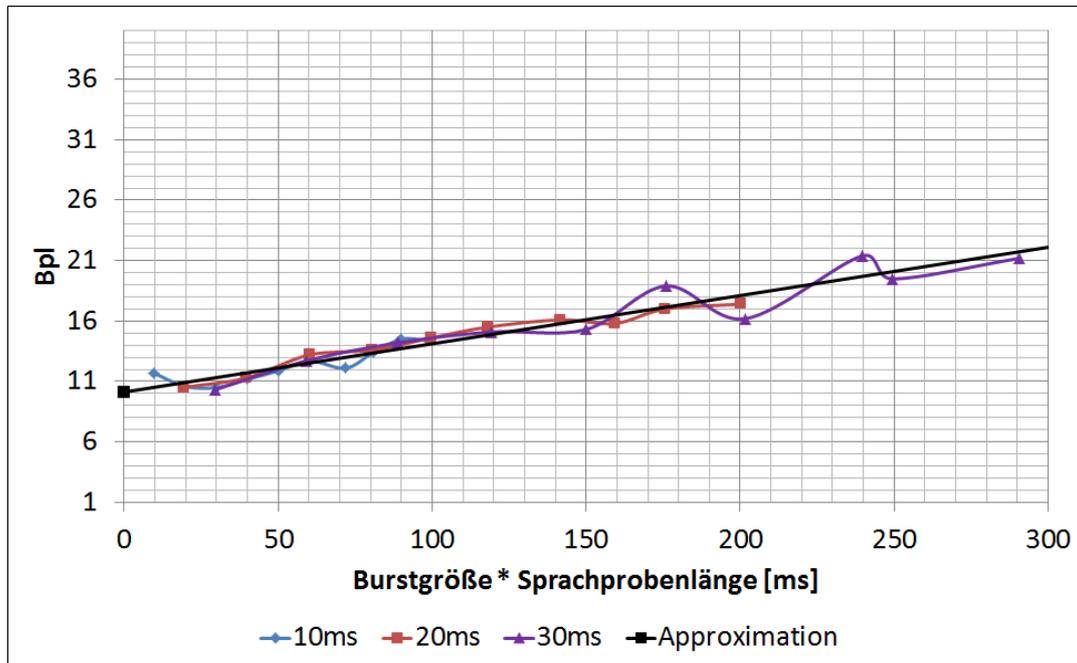


Abb. 11.4: *Bpl* als Funktion vom *BSLP* (Schritte 2 und 3) [22]

Abb. 11.4 illustriert die starke Abhängigkeit zwischen den *Bpl*-Werten und dem *BSLP*. Formel (11.1) beschreibt dieses Verhalten und wurde durch lineare Approximation der drei Kurven mittels der Methode der kleinsten Quadrate ermittelt (Details in [22]).

$$Bpl = 0,0634 \cdot BSLP + 20,815 \quad (11.1)$$

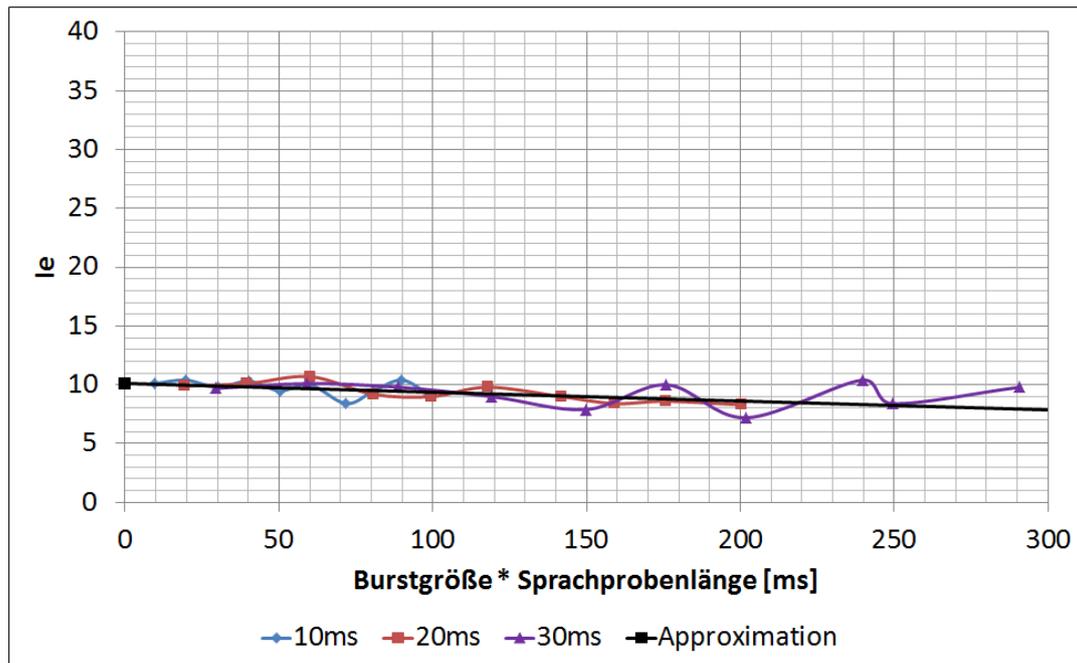


Abb. 11.5: I_e als Funktion vom BSLP (Schritte 2 und 3) [22]

Abb. 11.5 zeigt den geringen Einfluss des *BSLP* auf den I_e -Wert. Aufgrund der flachen Verläufe der Kurven wurde auch hier eine lineare Approximation angewendet, die mittels der Methode der kleinsten Quadrate durchgeführt wurde (vgl. Formel (11.2), Details in [22]).

$$I_e = 0,01 \cdot BSLP + 17,76 \quad (11.2)$$

Die Tauglichkeit des angepassten E-Modells wird in den folgenden Abschnitten unter Beweis gestellt.

11.2 Vergleichsstudie

11.2.1 Numerische Umgebung

Zunächst findet eine Analyse der Effizienz des EIP-Modells an dem Beispiel des Sprachcoders G.726 (32 kbit/s) mittels des numerischen Tools QoS-Cal(VoIP) statt. Die Werte des EIP-Modells werden mit den QoS-Werten sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des ursprünglichen E-Modells unter Verwendung der entsprechenden Default-Werte verglichen. Die

11 Das EIP-Modell

Ergebnisse dieser Untersuchung zeigt die Abb. 11.6 exemplarisch für eine Sprachprobenlänge von 30 ms bei einer burstfreien Übertragung.

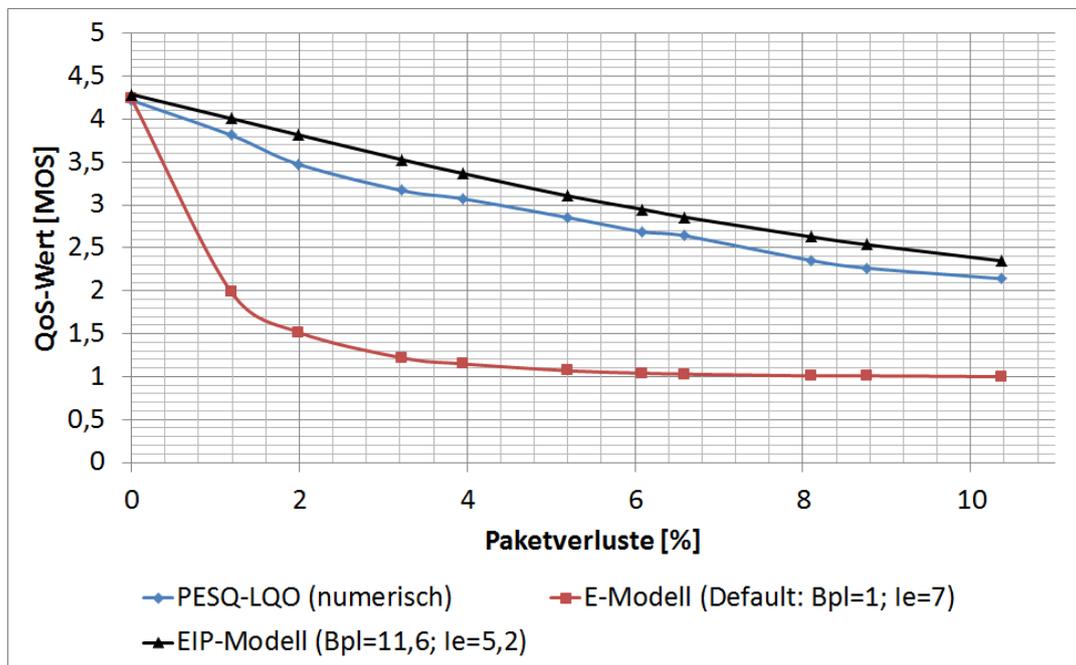


Abb. 11.6: Numerisch ermittelte QoS-Werte als Funktion der Paketverluste für verschiedene Bewertungsmethoden für den Sprachcodec G.726 (32 kbit/s; 30 ms Sprachprobenlänge; burstfreie Übertragung) [22]

Der Vergleich zeigt die wesentlich stärkere Realitätsnähe der aus dem EIP-Modell resultierenden QoS-Werte. Die linearen Kurvenverläufe des EIP-Modells und des objektiven PESQ-Algorithmus ähneln sich wesentlich stärker, als es bei den exponentiell verlaufenden E-Modell-Kurven der Fall ist.

11.2.2 Reale IP-Umgebung

Die Abb. 11.7 beschreibt die reale IP-Umgebung für die Vergleichsstudie. Sie setzt sich aus den folgenden Tools der Firma Nextragen [103] zusammen: das Echtzeit-Kommunikationssystem TraceSim_VoIP mit dem implementierten Messsystem TraceView_VoIP und dem TraceSim_VoIP-Client für die Spiegelung der RTP-Pakete. Außerdem wird ein Wanulator eingesetzt, der die Aufgabe hat, die Beeinträchtigungen im Netzwerk zu simulieren. In diesem Fall handelt es sich um eine Software-Lösung, die den eingehenden Datenverkehr anhand von konfigurierbaren Parametern, wie u.a. Paketverlustwahrscheinlich-

11 Das EIP-Modell

keit, Verzögerung und Jitter, entsprechend manipuliert und anschließend wieder ausgibt [137].

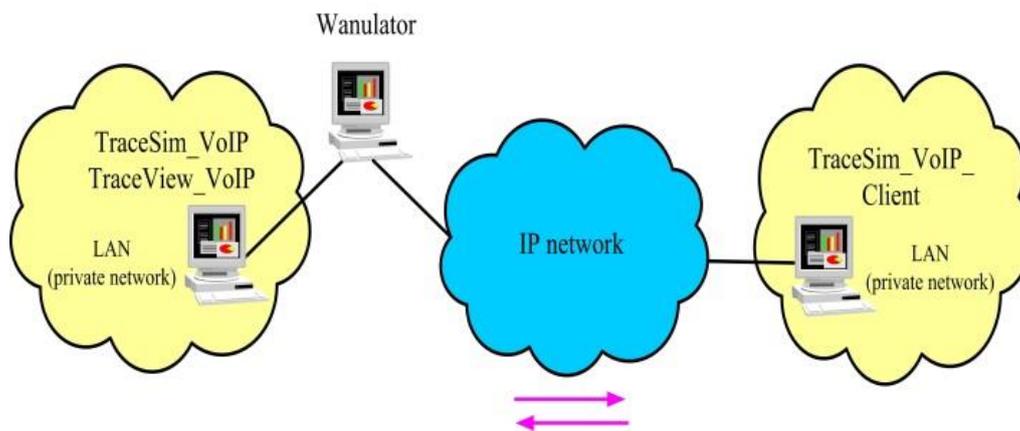


Abb. 11.7: Analyse der IP-Umgebung [22]

TraceSim_VoIP baut eine RTP-Verbindung zu dem TraceSim_VoIP-Client auf. Der Client spiegelt die ankommenden RTP-Pakete zurück zur TraceSim_VoIP-Anwendung. Bevor die QoS-Messungen beginnen können, müssen beide Anwendungen zunächst mittels DTMF-Tönen synchronisiert werden. Anschließend wird das Referenzsignal or105.wav [77] übertragen. Die RTP-Pakete werden von dem TraceSim_VoIP-Client empfangen, gespiegelt und zurück an die TraceSim_VoIP-Anwendung bzw. das integrierte Messsystem TraceView_VoIP gesendet. Hier werden das empfangene und das Referenzsignal anhand des E-Modells, des EIP-Modells und des PESQ-Algorithmus verglichen. Mittels des zwischengeschalteten Wanulators werden Netz-Beeinträchtigungen wie Paketverluste, Verzögerungen und Jitter emuliert.

Die folgenden Parameter sind gegeben:

- Nicht-deterministisch verteilte Paketverluste (von dem Hersteller des Wanulators nicht näher spezifiziert) von 0 bis 20 % bei einer burstfreien Übertragung.
- Nicht-deterministisch verteilte Paketverluste (von dem Hersteller des Wanulators nicht näher spezifiziert) von 0 bis 20 % bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 4.
- Sprachcodec G.726 (32 kbit/s).
- Sprachprobenlänge von 20 ms.

11 Das EIP-Modell

- 31 Messungen je Messpunkt. Auf diese Weise ist es möglich, ein Konfidenzintervall von unter 10% des Durchschnittswertes bei einer Fehlerrate von 5% zu erhalten.
- PESQ, E-Modell and EIP-Modell als QoS-Bewertungsmethoden.

Die Ergebnisse der Vergleichsstudie zeigen Abb. 11.8 und Abb. 11.9. Die Kurven zeigen bei steigenden Paketverlusten exponentiell abnehmende QoS-Werte. Die PESQ- und die EIP-Modell-Kurve haben sehr ähnliche Verläufe, während die Kurve des ursprünglichen E-Modells stark abweicht. Außerdem bestätigt sich auch hier, dass die durchschnittliche Burstgröße einen nicht unerheblichen Einfluss auf die Dienstgüte hat. Beide Diagramme bestätigen die Praxistauglichkeit des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten EIP-Modells.

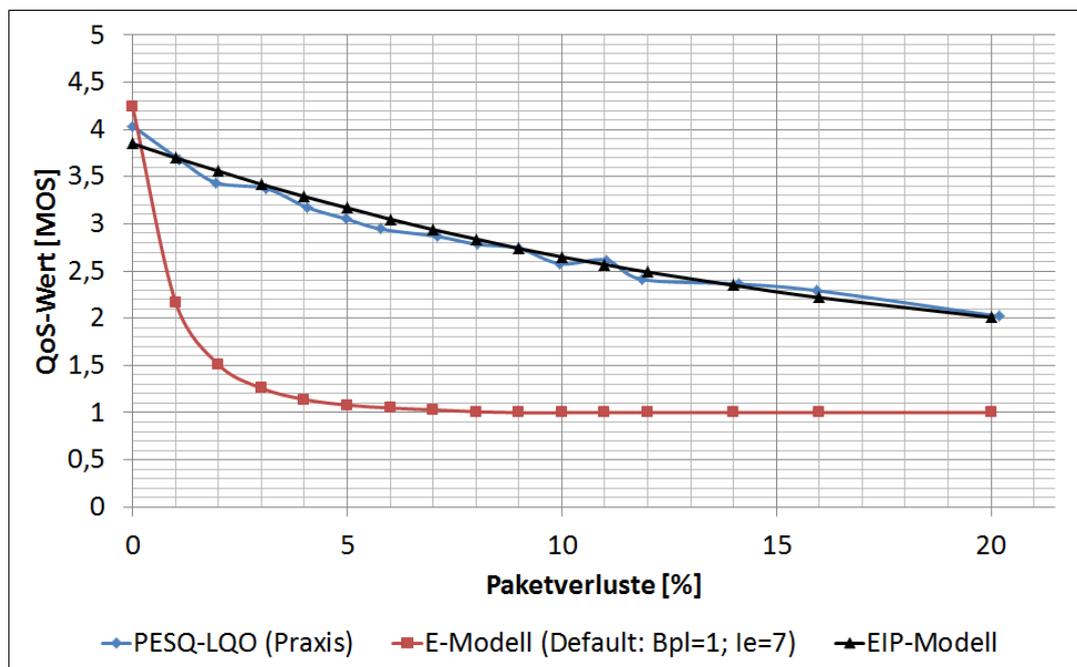


Abb. 11.8: QoS-Werte als Funktion nicht-deterministisch verteilter Paketverluste bei einer burstfreien Übertragung [22]

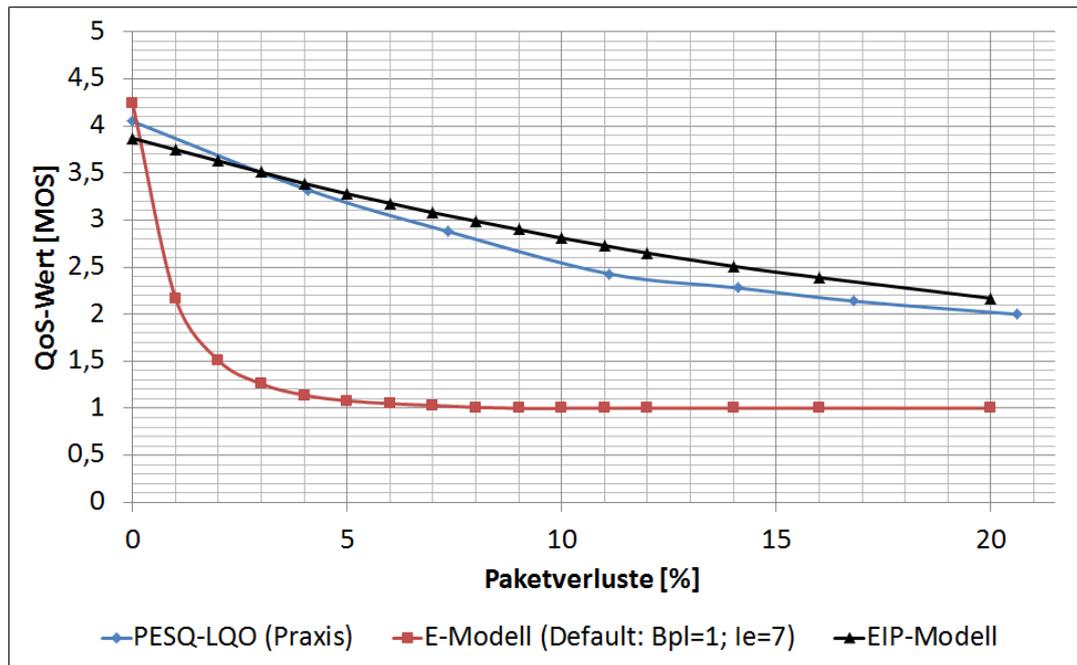


Abb. 11.9: QoS-Werte als Funktion nicht-deterministisch verteilter Paketverluste bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 4 [22]

Die in diesem Kapitel dargestellten Ergebnisse wurden im Jahr 2010 auf dem Kongress WTC im Tagungsband veröffentlicht und mit Erfolg einem großen Publikum präsentiert [110].

11.3 Das EIP-Modell in der Praxis

Die in den vorherigen Abschnitten erzielten guten Ergebnisse haben dazu geführt, dass in einer groß angelegten Studie die Anpassung des E-Modells für alle gängigen Sprachcodecs vorgenommen wurde. Die im Rahmen dieser Studie gewonnenen Ergebnisse zeigt die Tab. 11.1.

11 Das EIP-Modell

Tab. 11.1: *Bpl*- und *Ie*-Gleichungen des EIP-Modells für gängige Sprachcodecs [22]

Sprachcodec	Bandbreite	<i>Bpl</i>	<i>Ie</i>
G.711 a-Law	Schmalband	$0,037 * \text{BSLP} + 10,486$	$-0,0089 * \text{BSLP} + 5,483$
G.711 μ -Law	Schmalband	$0,0325 * \text{BSLP} + 10,225$	$-0,0149 * \text{BSLP} + 3,7721$
G.721	Schmalband	$0,041 * \text{BSLP} + 10,187$	$-0,0087 * \text{BSLP} + 10,488$
G.723.1	Schmalband	$0,046 * \text{BSLP} + 12,653$	21,767
G.726 (16 kbit/s)	Schmalband	$0,0346 * \text{BSLP} + 15,048$	36,117
G.726 (24 kbit/s)	Schmalband	$0,0421 * \text{BSLP} + 11,652$	$-0,0028 * \text{BSLP} + 21,342$
G.726 (32 kbit/s)	Schmalband	$0,0399 * \text{BSLP} + 10,13$	$-0,0075 * \text{BSLP} + 10,118$
G.726 (40 kbit/s)	Schmalband	$0,0386 * \text{BSLP} + 9,174$	$-0,0131 * \text{BSLP} + 6,198$
G.729a	Schmalband	$0,0459 * \text{BSLP} + 11,889$	$-0,0027 * \text{BSLP} + 19,484$
GSM	Schmalband	$0,0256 * \text{BSLP} + 15,973$	$-0,0052 * \text{BSLP} + 24,54$
iLBC (20ms)	Schmalband	$0,0355 * \text{BSLP} + 11,829$	$-0,0032 * \text{BSLP} + 14,545$
iLBC (30ms)	Schmalband	$0,0271 * \text{BSLP} + 14,11$	$-0,0026 * \text{BSLP} + 16,083$
G.711.1 (R1) (64 kbit/s)	Schmalband	$0,0305 * \text{BSLP} + 9,342$	$-0,0322 * \text{BSLP} + 7,0407$
G.711.1 (R2a) (80 kbit/s)	Schmalband	$0,0305 * \text{BSLP} + 8,8336$	$-0,0313 * \text{BSLP} + 4,8645$
G.711.1 (R2b) (80 kbit/s)	Breitband	$0,0353 * \text{BSLP} + 1,3611$	$0,0189 * \text{BSLP} + 22,063$
G.711.1 (R3) (96 kbit/s)	Breitband	$0,0297 * \text{BSLP} + 1,2847$	$-0,0036 * \text{BSLP} + 0,4634$
G.722 (64 kbit/s)	Breitband	$0,0194 * \text{BSLP} + 2,3813$	$0,0088 * \text{BSLP} + 36,017$
G.722.2 (23,05 kbit/s)	Breitband	$-0,0202 * \text{BSLP} + 17,926$	$-0,0082 * \text{BSLP} + 40,202$

Das hier entwickelte EIP-Modell wurde 2010 dem deutschen Patent- und Markenamt in München [31] als Erfindung angemeldet und im Mai 2014 als Patent erteilt [22]. Inzwischen hat eine Verwendung dieses Modells in der Praxis stattgefunden. Die Firma Nextragen [103] hat das Patent erworben und das EIP-Modell in eigene Produkte implementiert (vgl. Kap. 15).

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

Bei dem im vorherigen Kapitel vorgestellten EIP-Modell handelt es sich um eine Anpassung einer bereits bestehenden und etablierten Bewertungsmethode. Hier hat sich gezeigt, dass sowohl der Beeinträchtigungsparameter Burstgröße als auch die Menge an Sprachdaten je Datenpaket (Sprachprobenlänge) einen nicht zu vernachlässigenden Einfluss auf die Dienstgüte haben. Neben der Paketverlustwahrscheinlichkeit als wichtigster Einfluss-Faktor wurde daher das *BSLP* zur Bestimmung der Parameter *Bpl* und *Ie* eingesetzt. Das Ziel dieses Kapitels ist es, auf Basis dieser Erkenntnisse das A-Modell als eine neue und eigenständige parameterbasierte Bewertungsmethode zu entwickeln.

12.1 Formulierung des A-Modells

Eine groß angelegte und in der Arbeit [92] ausführlich beschriebene Untersuchung hat gezeigt, dass in einer IP-Umgebung die Paketverluste zu den wichtigsten Beeinträchtigungsparametern gehören. Die QoS-Kurven zeigen einen eindeutig exponentiellen Charakter. Bei der Abnahme der QoS-Werte spielt, wie in dem vorherigen Kapitel beschrieben, das Produkt von Burstgröße und Sprachprobenlänge (*BSLP*) eine wesentliche Rolle. Außerdem ist die Größe des in den Endgeräten verwendeten Jitterbuffers für die QoS von entscheidender Bedeutung. All diese Faktoren müssen bei der Formulierung eines neuen parameterbasierten Modells für die Bestimmung der QoS bei VoIP unbedingt berücksichtigt werden. Abb. 12.1 zeigt das neue, allgemein geltende und parameterbasierte A-Modell für die Bestimmung der QoS bei VoIP. Die Idee für dieses A-Modell und eine erste Formulierung ist in der Arbeit [91] zu finden. Hier wird es übernommen, weiter verfeinert und verallgemeinert. Neben der Ausweitung auf eine größere Anzahl an Codecs (vgl. Tab. 12.1) wurde das Modell in dieser Anpassung um zusätzliche Parameter erweitert.

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

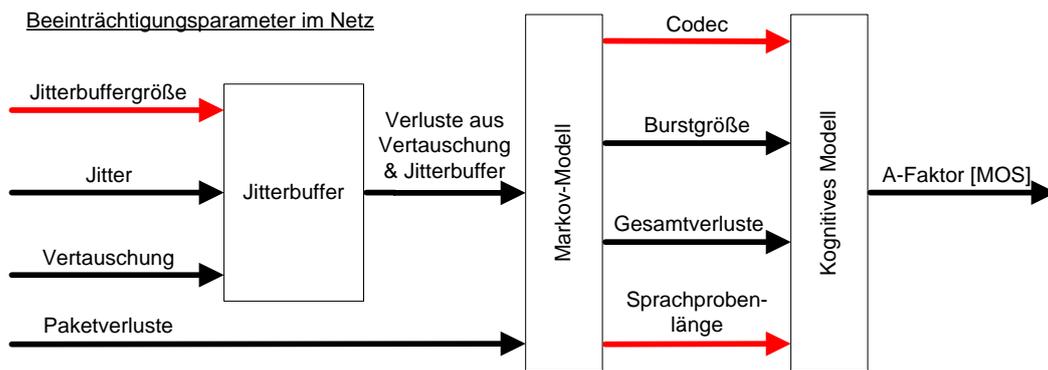


Abb. 12.1: Blockschaltbild des A-Modells [111]

Bei der Bestimmung der QoS in der Praxis wird angenommen, dass die Paketströme aus einer RTP-Session durch einen Protokollanalysator erfasst und anschließend einer geeigneten Bewertungsmethode zur Auswertung übergeben werden. Eine solche Methode ist das neue A-Modell. Es arbeitet nach folgendem Prinzip: Im ersten Block werden alle im Netz auftretenden Beeinträchtigungen erfasst und bearbeitet. Die Auswirkungen des Jitters und der Paketvertauschungen werden hier in Verluste umgewandelt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass einige Fehler mithilfe des Jitterbuffers ausgeglichen werden können. Die so in diesem Block ermittelten Werte und die Paketverluste aus dem Netz werden an den zweiten Block übergeben. Dort werden die Gesamtverluste und die Burstgröße bestimmt. Im A-Modell wird die oft in Netzbetrachtungen verwendete Markov-Eigenschaft (Gedächtnislosigkeit) angenommen. Die so berechneten Parameter werden dem dritten und letzten Block übergeben. Weitere Eingangsparameter für den dritten Block sind Daten über die verwendete Sprachprobenlänge und über den Typ des benutzten Codecs. Diese Daten werden aus der Messung der RTP-Ströme gewonnen. Nun wird in dem „kognitives Modell“ genannten Block der A-Faktor auf der MOS-Skala ermittelt. Die dazu benötigten mathematischen Abhängigkeiten werden in diesem Block in Form einer Tabelle abgelegt. Der Inhalt dieser Tabelle wird in folgenden Schritten ermittelt:

– *Schritt 1*

Ermitteln der PESQ-Kurven als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße für verschiedene Sprachprobenlängen mithilfe des Softwaretools QoSCalc(VoIP) (vgl. Kap. 8). Diese Kurven sind die Basis für weitere Berechnungen.

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

– *Schritt 2*

Approximieren der PESQ-Kurve für eine burstfreie Übertragung und der minimalen Sprachprobenlänge. Da bereits das E-Modell von einem exponentiellen Kurvenverlauf ausgeht und dies von den Werten aus Schritt 1 bestätigt wird, wird dies auch für diese Approximation angenommen (vgl. Formel (12.1)).

$$\text{A-Faktor} = A_1 \cdot e^{-0,015 \cdot \alpha} + A_2 \cdot e^{-0,45 \cdot \alpha} + A_3 \quad (12.1)$$

Die Konstante A_1 ist verantwortlich für den Verlauf der QoS-Kurve bei großen und die Konstante A_2 bei kleinen Paketverlusten. Durch die Konstante A_3 wird sichergestellt, dass der maximale QoS-Wert für den betrachteten Sprachcodec erhalten bleibt (z.B. der Wert 4,4 MOS bei G.711). Die Koeffizienten $-0,015$ und $-0,45$ in den Exponenten der Formel (12.1) wurden iterativ als bestmögliche Größe ermittelt. Die Veränderliche α steht an dieser Stelle für die Paketverlustwahrscheinlichkeit.

– *Schritt 3*

Bestimmen des Korrekturfaktors K . Die QoS-Kurve muss so manipuliert werden können, dass die jeweiligen Kurvensteigungen aus unterschiedlichen Messszenarien (zum Beispiel durch unterschiedliche Burstgrößen) zu erreichen sind. Diese Manipulation wird durch die Veränderliche α vorgenommen. α wird aus der Verlustwahrscheinlichkeit P_{pl} und dem Korrekturfaktor K berechnet. Formel (12.2) zeigt den Zusammenhang:

$$\alpha = \frac{P_{pl}}{\text{K-Faktor}} \quad (12.2)$$

Der *K-Faktor* wird durch die lineare Approximation der normierten QoS-Werte als Funktion des Produktes *BSLP* und der Paketverluste gebildet. Für jeden betrachteten Paketverlust wird eine Normierung vorgenommen. Als Bezugsgrößen werden hier jeweils die entsprechenden QoS-Werte für den minimalen *BSLP*-Wert für den jeweils betrachteten Codec angenommen. Ergeben sich während der Normierung bei einem

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

betrachteten Paketverlust für gleiche *BSLP* mehrere QoS-Werte, werden diese zuvor gemittelt. Das Ergebnis ist eine allgemein gültige Gleichung für den K-Faktor (vgl. Formel (12.3)).

$$\text{K-Faktor} = a \cdot \beta \cdot \text{BSLP} \cdot b \quad (12.3)$$

Die drei Koeffizienten der Formel (12.3) a , b und β sind von dem untersuchten Sprachcodec abhängig. a und b sind Koeffizienten, die durch die lineare Approximation ermittelt werden. Mit dem Skalierungsparameter β wird dafür gesorgt, dass mithilfe des K-Faktors die QoS-Kurven sowohl bei kleinen als auch bei großen *BSLP*-Werten gleich gut nachgebildet werden.

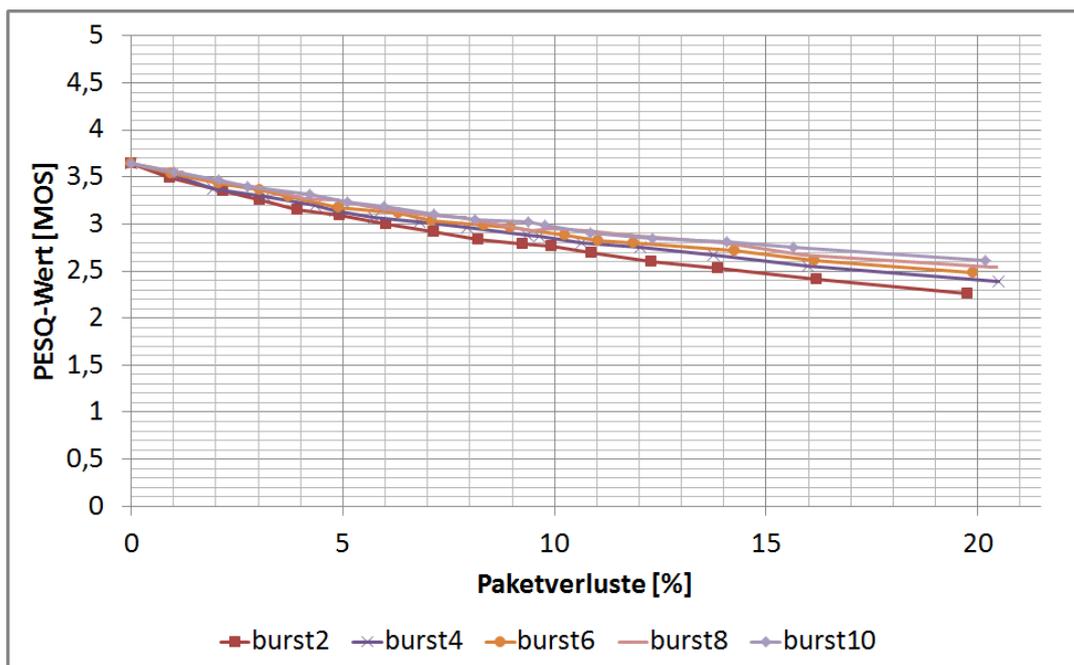


Abb. 12.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 20 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an [111])

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

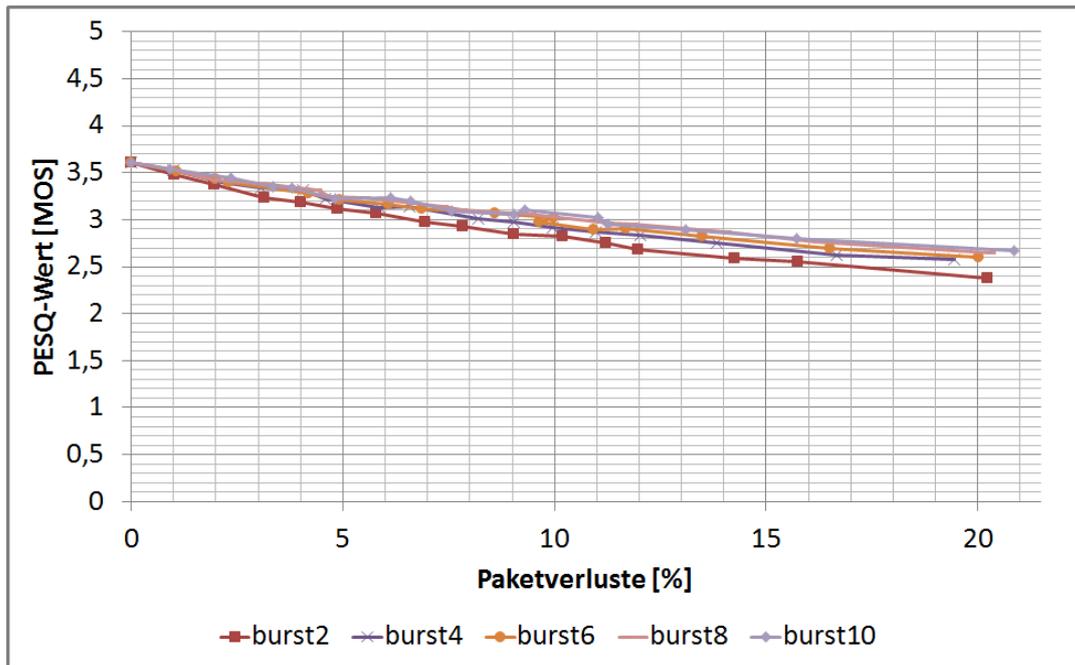


Abb. 12.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 40 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an [111])

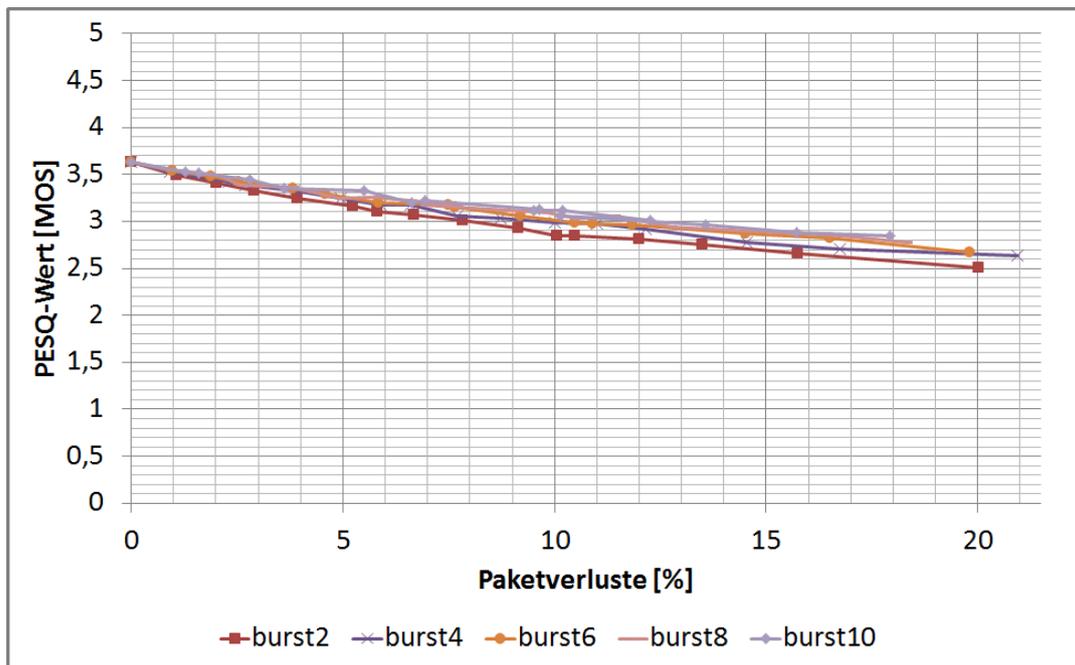


Abb. 12.4: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgrößen bei einer Sprachprobenlänge von 60 ms für den Codec GSM (in Anlehnung an [111])

Die hier dargestellten Schritte sollen nun am Beispiel des Sprachcodecs GSM veranschaulicht werden. In dieser Betrachtung werden als Sprachprobenlängen folgende Werte angenommen:

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

20 ms, 40 ms und 60 ms. Bei den Burstgrößen handelt es sich um exponentiell um die Mittelwerte 1-10 verteilte und anschließend gerundete Werte. Die Paketverluste unterliegen einer Binomialverteilung mit der Wahrscheinlichkeit P . Je Paketverlustwert werden 31 Messungen durchgeführt. Damit werden bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von fünf Prozent Konfidenzintervalle erreicht, die kleiner als 10 Prozent der untersuchten Mittelwerte sind. Die erhaltenen Ergebnisse sind in Abb. 12.2 bis Abb. 12.4 dargestellt und zeigen, dass alle QoS-Kurven einen leicht exponentiellen Verlauf aufweisen. Dies entspricht den Erkenntnissen aus der Arbeit [92] bezogen auf den Codec G.711. Die Burstgröße hat auch hier einen wesentlichen Einfluss auf die QoS. Übertragungen, deren Verluste weitgehend burstfrei sind, liefern in allen drei Fällen die schlechteste Dienstqualität. Mit steigender Burstgröße erhöht sich die Qualität. Das häufige Auftreten kleinerer Sprachwiedergabelücken wird offensichtlich als für den Hörer unangenehmer interpretiert als das seltene Auftreten von größeren Sprachwiedergabelücken.

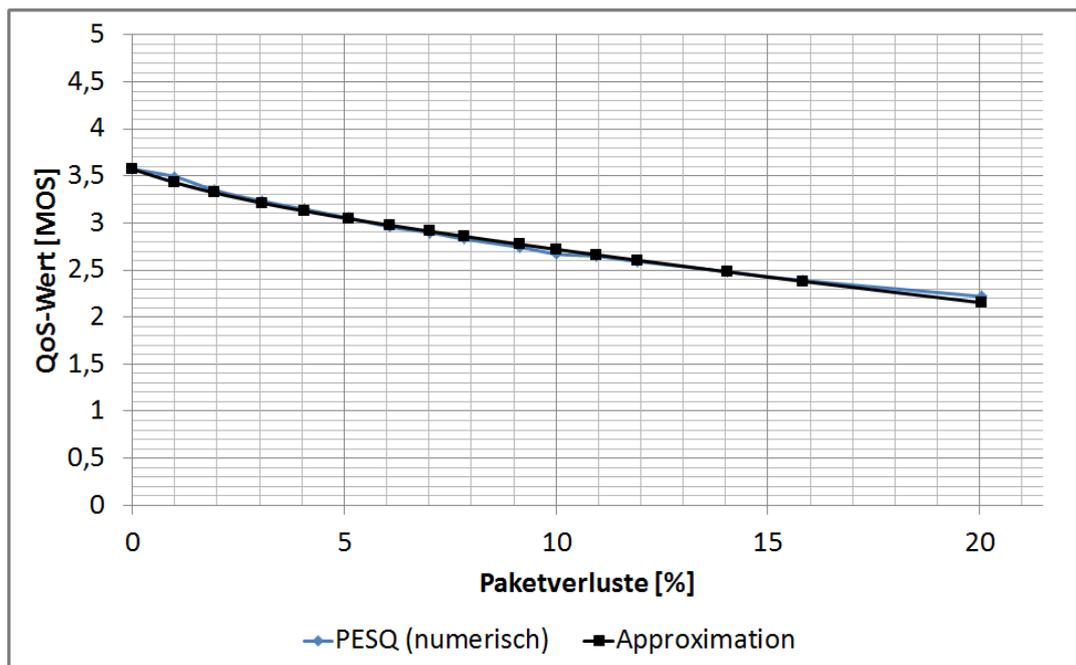


Abb. 12.5: Approximation der PESQ-Kurve für den Sprachcodec GSM [111]

Die Abb. 12.5 zeigt das Ergebnis der mit der Formel (12.1) durchgeführten Approximation der PESQ-Kurve. Mit den durch Iterationen ermittelten Werten für A_1 , A_2 und A_3 hat die Formel für den Sprachcode GSM nun folgende Form:

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

$$\text{A-Faktor} = 4,7 \cdot e^{-0,015 \cdot \alpha} + 0,2 \cdot e^{-0,45 \cdot \alpha} - 1,33 \quad (12.4)$$

Die Abb. 12.6 verdeutlicht grafisch die im Schritt 3 beschriebene Normierung der PESQ-Kurven. Wie in Schritt 3 auch gezeigt, ist der *K-Faktor* sowohl von dem Produkt aus Burstgröße und Sprachprobenlänge (*BSLP*) als auch von der Paketverlustwahrscheinlichkeit linear abhängig (vgl. Formel (12.3)). Diese Abhängigkeit ist aus der Abb. 12.6 ebenfalls zu entnehmen. Außerdem sind in der Grafik die Werte für die Koeffizienten *a* und *b* angegeben. Für den Skalierungsparameter β gilt hier der Wert von 1.

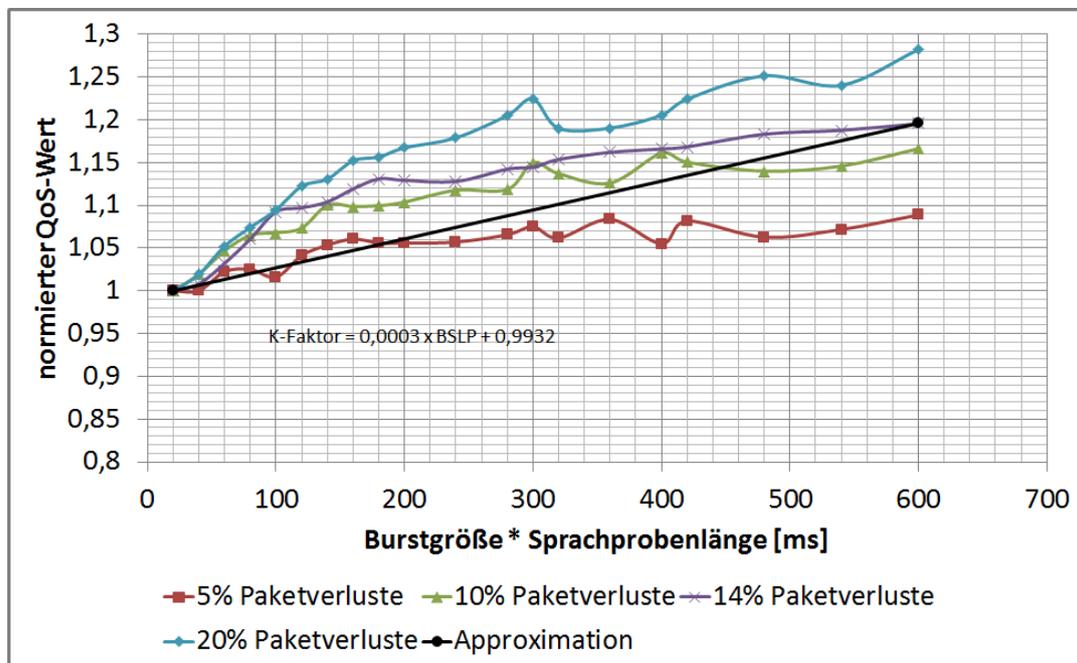


Abb. 12.6: Illustration zur Bestimmung des *K-Faktors* für den Sprachcodec GSM [111]

Nun muss noch der Skalierungsparameter β für unterschiedliche *BSLP*-Werte bestimmt werden. Dieser Parameter wird ebenfalls iterativ bestimmt und zwar so, dass die PESQ-Kurven sowohl für kleine als auch für große *BSLP*-Werte gleich gut durch den *K-Faktor* approximiert werden. Abb. 12.7 und Abb. 12.8 verdeutlichen die entsprechende Vorgehensweise.

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

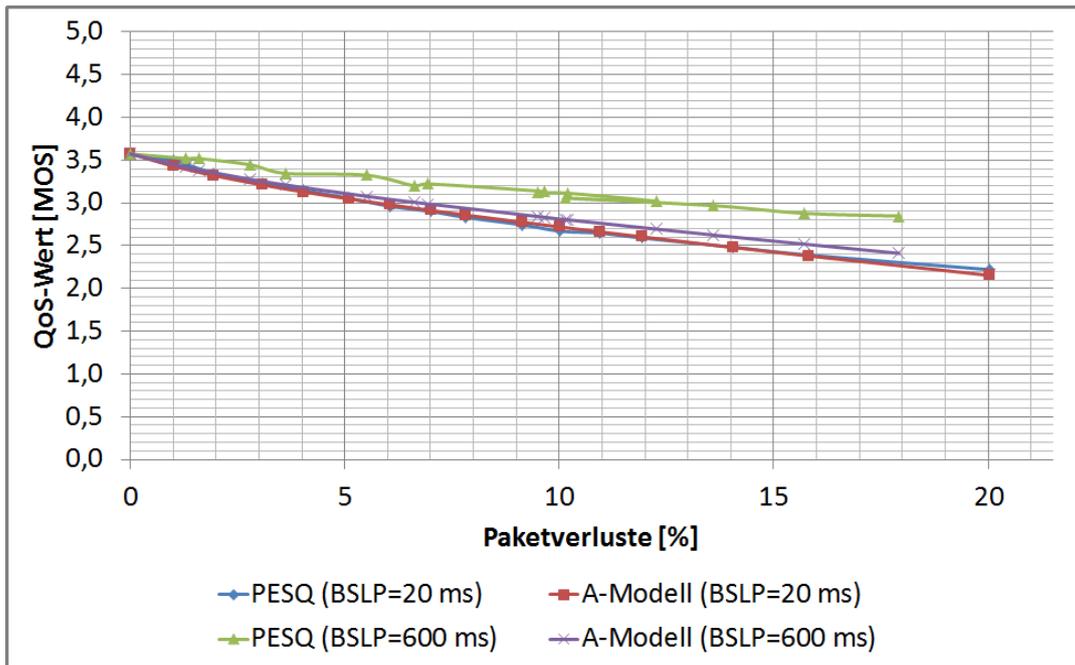


Abb. 12.7: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mit β gleich 1 [111]

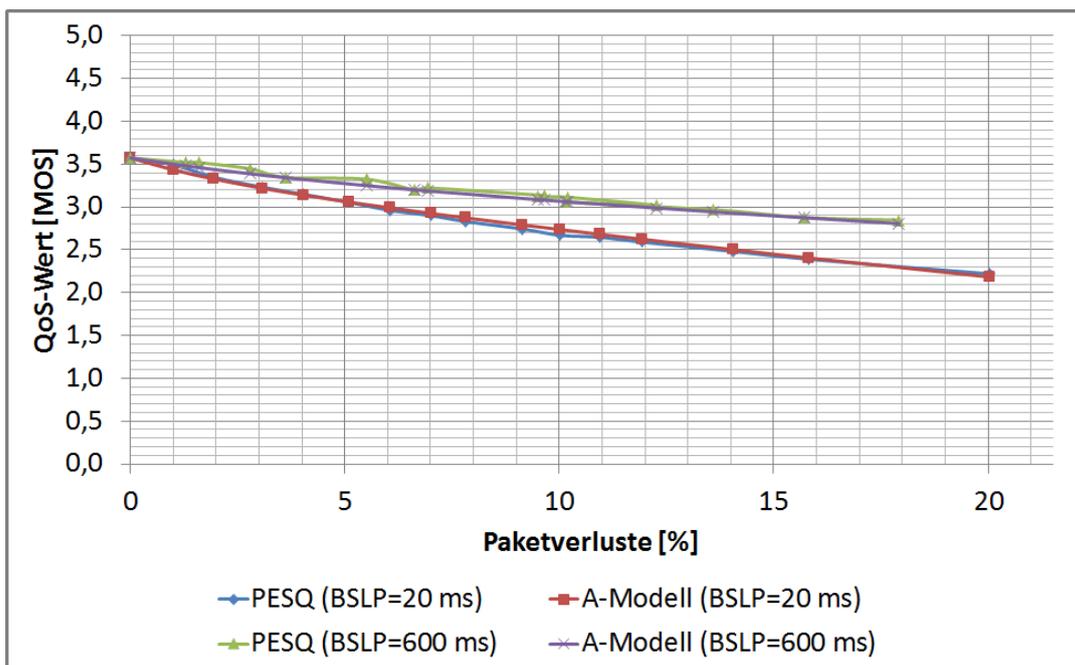


Abb. 12.8: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mit β gleich 6 [111]

Die Kurven in der Abb. 12.7 zeigen, dass es bei kleinen *BSLP*-Werten eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den PESQ-Kurven und denen gibt, die mithilfe des A-Modells berechnet werden. Bei großen *BSLP*-Werten sind die Differenzen zwischen den Kurven noch sehr groß. Hier muss der Skalierungsparameter β unbedingt angepasst werden. Das Ergebnis dieser An-

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

passung ist in Abb. 12.8 dargestellt. Der mittels einer iterativen Parameterwahl ermittelte Wert für β von 6 führt zu einer hohen Übereinstimmung zwischen den Werten des PESQ-Algorithmus und des A-Modells. Damit hat die Formel zur Berechnung des K -Faktors für den Sprachcodec GSM nun die in Gleichung (12.5) gezeigte endgültige Form:

$$\text{K-Faktor} = 0,0003 \cdot 6 \cdot \text{BSLP} + 0,9932 \quad (12.5)$$

Die Praxistauglichkeit des eben beschriebenen A-Modells wird in einer Vergleichsstudie unter Beweis gestellt.

12.2 Vergleichsstudie

Die Vergleichsstudie wird in der in dem Abschn. 11.2.2 beschriebenen realen IP-Umgebung durchgeführt. Dabei werden folgende Szenarien angenommen.

- Binomialverteilte Paketverluste von 0 bis 20% bei einer burstfreien Übertragung.
- Binomialverteilte Paketverluste von 0 bis 20% bei einer exponentialverteilten durchschnittlichen Burstgröße von 4.
- Sprachcodec GSM.
- Sprachprobenlänge 20 ms (Standard-Wert für den Sprachcodec GSM).
- 61 Messungen je Wert der verwendeten Veränderlichen (hier: Paketverluste). Damit werden Konfidenzintervalle erreicht, die kleiner als 10% der untersuchten Mittelwerte sind (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).
- Verwendung von PESQ, E-Modell und A-Modell als QoS-Bewertungsmethoden.

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

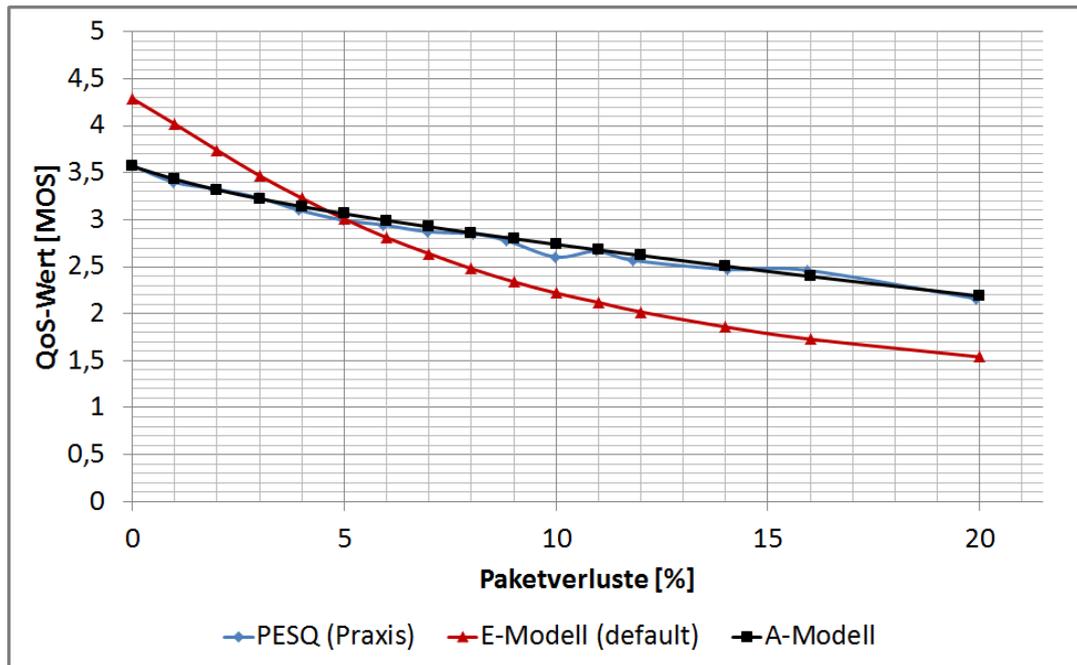


Abb. 12.9: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mittels unterschiedlicher Bewertungsmethoden für den Sprachcodec GSM bei einer burstfreien Übertragung [111]

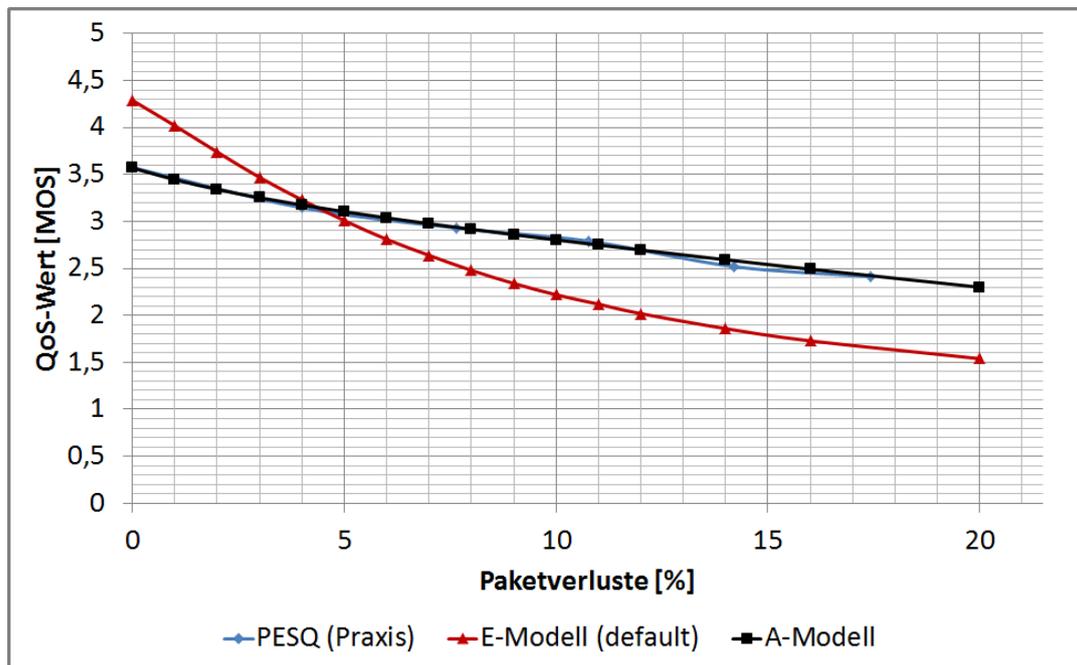


Abb. 12.10: QoS-Werte als Funktion der Paketverluste mittels unterschiedlicher Bewertungsmethoden für den Sprachcodec GSM und bei einer durchschnittlichen Burstgröße von 4 [111]

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

Die Ergebnisse der Vergleichsstudie sind in Abb. 12.9 und Abb. 12.10 grafisch dargestellt. Sie zeigen, dass die Dienstgüte mit zunehmenden Paketverlusten exponentiell abnimmt. Dies gilt für jede hier untersuchte QoS-Bewertungsmethode. Dennoch gibt es abhängig von der jeweiligen Methode große Unterschiede. Die PESQ- und die A-Modell-Kurven verlaufen sehr nah beieinander, die Kurve des E-Modells ist extrem weit von diesen beiden Kurven entfernt. Der Grund dafür liegt im E-Modell. Hier wird die Qualität des Codecs GSM bei kleinen Paketverlusten eindeutig über- und bei großen Paketverlusten unterschätzt. Wird dies berücksichtigt, so hat die Vergleichsstudie die Anwendbarkeit des A-Modells eindeutig bestätigt.

12.3 Verzögerungen

Verzögerungen während einer VoIP-Verbindung haben einen nicht unerheblichen Einfluss auf die von den Nutzern wahrgenommene Dienstgüte (vgl. Abschn. 6.2.1). Das A-Modell in seiner bisherigen Form ist nicht dazu in der Lage, diesen Umstand in die Bewertung einzurechnen. Im Folgenden wird auf Basis bereits bestehender und diesen Beeinträchtigungsparameter miteinbeziehender QoS-Bewertungsmethoden eine entsprechende Erweiterung des A-Modells entwickelt.

12.3.1 Verzögerungen im PESQ-Algorithmus

Das erste Element in dem Blockschaltbild des PESQ-Algorithmus (vgl. Abb. 7.2) sorgt dafür, dass am Anfang der Auswertung ein zeitlicher Abgleich zwischen dem Referenz- und dem verminderten Signal erfolgt. Hier stellt sich die Frage: Ist der PESQ-Algorithmus in der Lage, die Verzögerung zwischen den beiden Signalen bei der Auswertung zu berücksichtigen? Wenn ja, dann auf welche Weise? Um diese Frage zu beantworten, wurden mehrere Untersuchungen durchgeführt. Abb. 12.11 und Abb. 12.12 zeigen zwei beispielhafte Szenarien zu den durchgeführten Untersuchungen.



Abb. 12.11: Referenzsignal und zu Beginn zeitlich verschobenes Testsignal für den PESQ-Algorithmus [117]

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

Die Abb. 12.11 zeigt eine Verschiebung der beiden Eingangssignale (Referenz- und vermindertes Signal) um 500 ms zu Beginn. Der PESQ-Algorithmus ist in der Lage, diese Verzögerung korrekt zu erkennen, und gibt den entsprechenden Wert aus. Bei der Beurteilung der Dienstgüte liefert der PESQ-Algorithmus jedoch den für den verwendeten Codec idealen QoS-Wert von 4,4 MOS. Daraus folgt, dass diese Methode nicht in der Lage ist, die am Anfang auftretende Verzögerung (entspricht der Ende-zu-Ende-Verzögerung in der VoIP-Umgebung) bei dem endgültigen PESQ-Wert zu berücksichtigen.

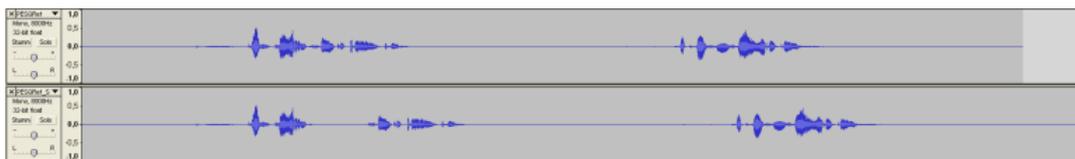


Abb. 12.12: Referenzsignal und innerhalb der ersten Sprachsequenz mit Stille versehenes Testsignal für den PESQ-Algorithmus [117]

Die Abb. 12.12 zeigt, dass die beiden Eingangssignale (Referenz- und das verminderte Signal) innerhalb der Ablaufsequenz um 500 ms zueinander verschoben sind. Der PESQ-Algorithmus erkennt diese Zeitverschiebung und berücksichtigt sie bei der Berechnung des QoS-Werts. Der hier errechnete PESQ-Wert beträgt ca. 3,2 MOS. Aus dieser Betrachtung geht hervor, dass der PESQ-Algorithmus grundsätzlich nicht in der Lage ist, die Auswirkung der Ende-zu-Ende-Verzögerung bei der Bestimmung der Dienstgüte zu berücksichtigen. Hier ist es notwendig, auf andere QoS-Bewertungsmethoden auszuweichen, welche dies ermöglichen. Dabei handelt es sich vor allem um parameterbasierte Methoden.

12.3.2 Verzögerungen im EIP-Modell

In dem E-Modell, auf dem das EIP-Modell basiert, besteht die Möglichkeit, bei der Bestimmung der QoS-Werte die Ende-zu-Ende-Verzögerung T_a miteinzubeziehen. Diese Verzögerung kann in der Praxis durch das Protokoll RTCP bestimmt werden [20]. Die Vorgehensweise ist u.a. in der Multimedia-Kommunikationsbibliothek PJSIP [118] implementiert.

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

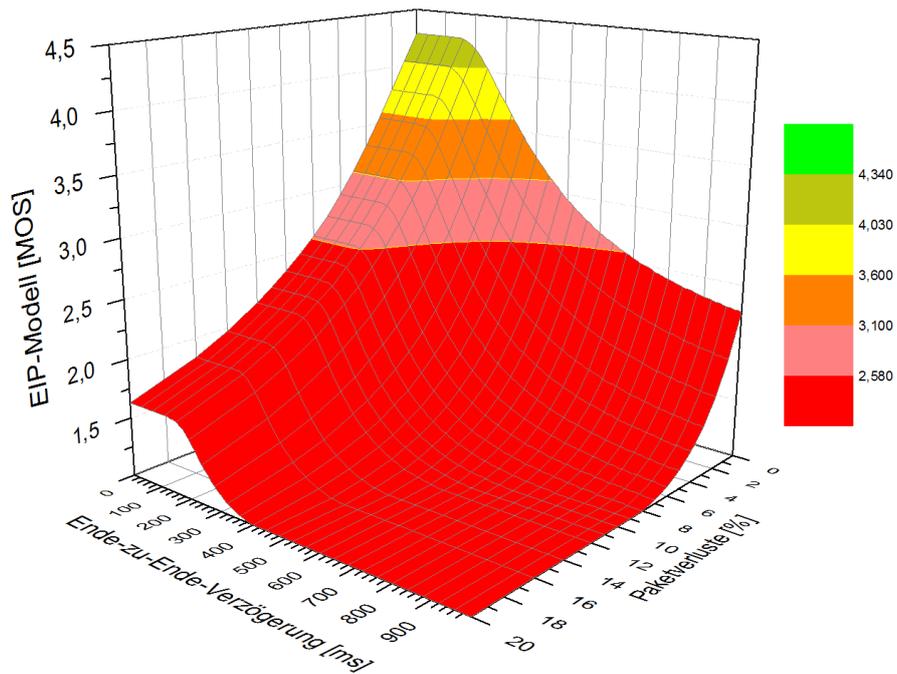


Abb. 12.13: EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung für den Codec G.711 [117]

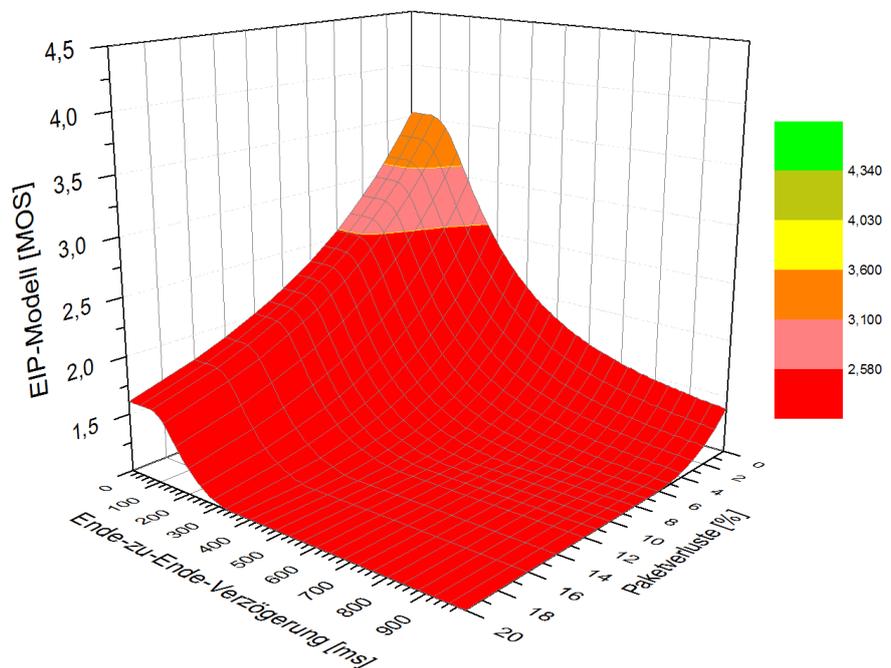


Abb. 12.14: EIP-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung für den Codec GSM [117]

Anhand des numerischen Tools QoSCalc(VoIP) wurden Untersuchungen mit dem Ziel gestartet, den Einfluss unterschiedlicher Beeinträchtigungsfaktoren in einer VoIP-Umgebung auf

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

das EIP-Modell zu untersuchen. Die erhaltenen Ergebnisse verdeutlichen Abb. 12.13 und Abb. 12.14 anhand der Sprachcodecs G.711 und GSM. Sie zeigen, dass alle QoS-Kurven einen exponentiellen Verlauf aufweisen. Die daraus resultierenden QoS-Flächen fallen sehr schnell mit steigenden Werten der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung ab. Die Diagramme zeigen, dass die Verzögerung erst ab Werten größer als ca. 150 ms (GSM) bzw. ca. 200 ms (G.711) einen wesentlichen Einfluss auf die QoS-Werte hat. Vorher ist der Einfluss der Verzögerung zu vernachlässigen. Das passt zu den Vorgaben von ITU-T für die Festnetze, in denen gesagt wird, dass die Ende-zu-Ende-Verzögerung kleiner als 150 ms sein sollte [66]. Die Ende-zu-Ende-Verzögerung setzt sich aus der Netzverzögerung, der verwendeten Jitterbuffer-Größe und der Kodierungs- bzw. Dekodierungszeit zusammen. Hier kann eine Regel abgeleitet werden: In einer VoIP-Umgebung sollte die Ende-zu-Ende-Verzögerung den Wert von ca. 200 ms nicht übersteigen. Ansonsten muss mit einer sehr schnellen Abnahme der Dienstgüte gerechnet werden.

12.3.3 Verzögerungen im A-Modell

Das in diesem Kapitel vorgestellte A-Modell ist nicht in der Lage, die Ende-zu-Ende-Verzögerung zu berücksichtigen. Um dies in dem Modell zu erreichen, ist es notwendig, mittels der Korrektur ΔA eine Anpassung des A-Faktors in Abhängigkeit der Ende-zu-Ende-Verzögerung vorzunehmen. Da das A-Modell mit den gleichen Veränderlichen arbeitet, die auch von dem EIP-Modell benutzt werden, bietet es sich an, das EIP-Modell zur Bestimmung der Korrektur ΔA zu verwenden. Die mithilfe des EIP-Modells ermittelte Verminderung der Dienstgüte als Funktion der Verzögerung Ta ergibt den Wert der gesuchten Korrektur ΔA für das A-Modell (vgl. Formeln (12.6) bis (12.8)). Die auf diese Weise modifizierte Formel (12.1) führt zu den folgenden Gleichungen:

$$a = \text{EIP-QoS-Wert mit } Ta \quad (12.6)$$

$$b = \text{EIP-QoS-Wert ohne } Ta \quad (12.7)$$

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

$$\Delta A = \frac{a}{b} \quad (12.8)$$

$$\text{A-Faktor} = (A_1 \cdot e^{-0,015 \cdot \alpha} + A_2 \cdot e^{-0,45 \cdot \alpha} + A_3) \cdot \Delta A \quad (12.9)$$

Abb. 12.15 und Abb. 12.16 zeigen die Untersuchungsergebnisse aus der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten numerischen Umgebung, in der das modifizierte A-Modell wirksam ist. Hier zeigt sich, dass die QoS-Flächen einen mit dem EIP-Modell (vgl. Abb. 12.13 und Abb. 12.14) vergleichbaren Verlauf besitzen. In der Praxis ist es also möglich, beide Modelle äquivalent zu verwenden.

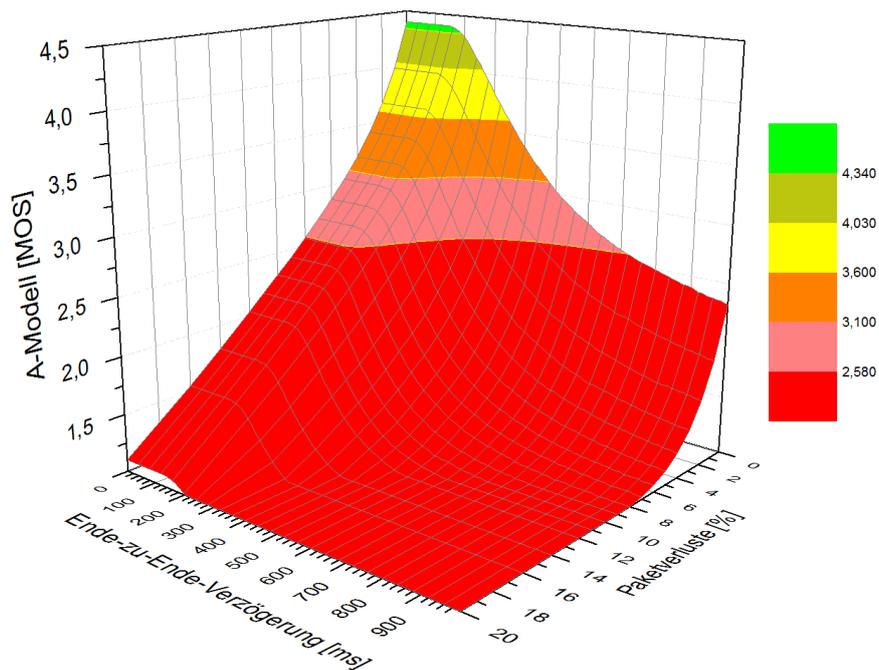


Abb. 12.15: A-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung für den Codec G.711 [117]

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

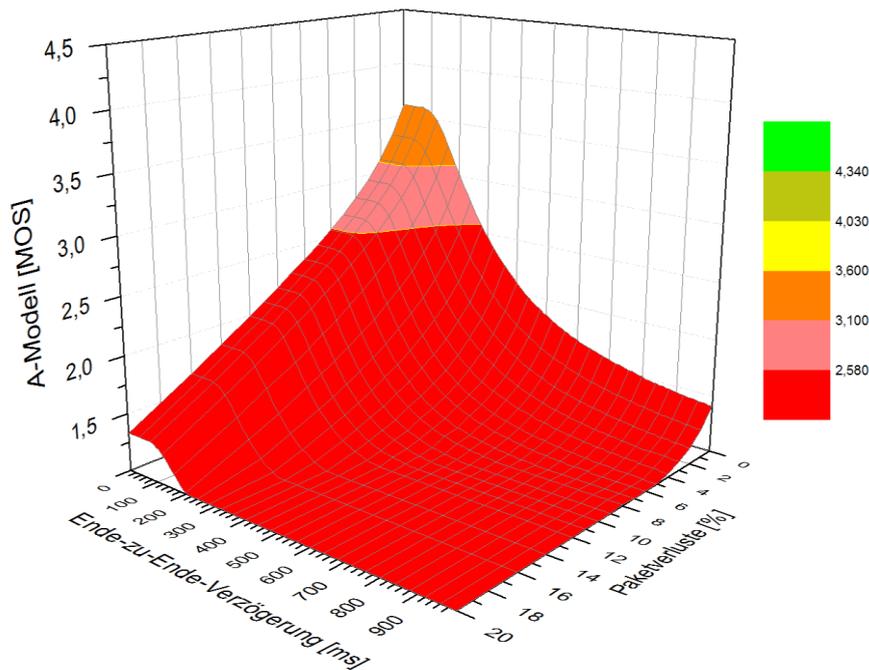


Abb. 12.16: A-Modell-Werte als Funktion der Paketverluste und der Ende-zu-Ende-Verzögerung für den Codec GSM [117]

Im Rahmen dieser Studie wurde gezeigt, wie die gängigen QoS-Bewertungsmethoden mit dem Beeinträchtigungsparameter Ende-zu-Ende-Verzögerung umgehen. Hier ist zu betonen, dass die signalbasierte Methode PESQ große Probleme mit diesem Parameter hat. Hier sind die parameterbasierten Methoden von Vorteil. Sowohl das EIP- als auch das angepasste A-Modell sind in der Lage, die Ende-zu-Ende-Verzögerung bei der Bestimmung der QoS-Werte zu berücksichtigen. Wie bereits zuvor erwähnt, ist es in der Praxis möglich, diese Verzögerung auf Basis der im Netz durchgeführten Messungen zu bestimmen.

Einen wichtigen Einfluss auf die Ende-zu-Ende-Verzögerung in einer VoIP-Umgebung besitzt die verwendete Jitterbuffergröße. Hier sind folgende Fragen offen: Wie stark und auf welche Art und Weise zeigt sich der Einfluss dieser Größe auf die entsprechenden QoS-Werte? Wie sollte die Arbeitsweise eines Jitterbuffers aussehen, sodass dieser effizient den Ausgleich der Auswirkung von Netzbeeinträchtigungen (u.a. Jitter und Vertauschung der Paketreihenfolge) erreichen kann? Kap. 14 beschäftigt sich mit dem Einfluss des Jitterbuffers auf die Dienstgüte.

12.4 Das A-Modell in der Praxis

Die in dem vorherigen Abschnitt aufgezeigten positiven Ergebnisse des A-Modells führten dazu, dass die einzelnen Parameter des A-Modells (vgl. Formel (12.10)) inzwischen für die gängigsten Sprachcodecs bestimmt wurden (vgl. Tab. 12.1). Die Diskrepanzen bezüglich der für den GSM-Codec aufgelisteten Parameter und der in dem Abschn. 12.1 hergeleiteten Werte liegt in der Tatsache begründet, dass in der Folgezeit Anpassungen aufgrund der Verwendung neuer Referenzsignale [108] erfolgt sind.

$$A - \text{Faktor} = P \cdot e^{\frac{-0,015 \cdot P_{pl}}{b+m \cdot \beta \cdot BSLP}} + Q \cdot e^{\frac{-0,45 \cdot P_{pl}}{b+m \cdot \beta \cdot BSLP}} + C \quad (12.10)$$

Tab. 12.1: Parameter des A-Modells für die gängigen Sprachcodecs

Sprachcodec	Bandbreite	P	Q	C	b	m	β
G.711 a-Law	Schmalband	9,5	0,7	-5,8	0,9086	0,0011	2,5
G.711 μ -Law	Schmalband	8,5	0,9	-4,91	0,9086	0,0011	2,5
G.721	Schmalband	7,3	0,85	-3,93	0,9252	0,0015	2,5
G.723.1	Schmalband	7	0,6	-3,92	0,9903	0,001	3,5
G.726 (16 kbit/s)	Schmalband	5	0,5	-2,53	0,9124	0,0008	4
G.726 (24 kbit/s)	Schmalband	6,7	0,75	-3,71	0,9172	0,0013	3
G.726 (32 kbit/s)	Schmalband	7,2	0,9	-3,88	0,9172	0,0013	3
G.726 (40 kbit/s)	Schmalband	9	0,85	-5,47	0,9034	0,0017	2,5
G.729a	Schmalband	7	0,7	-3,91	0,9266	0,0013	3
GSM	Schmalband	6,8	0,45	-3,65	0,9262	0,0007	2,5
iLBC (20ms)	Schmalband	7,5	0,72	-4,19	1,0121	0,0009	3
iLBC (30ms)	Schmalband	7	0,7	-3,74	1,0364	0,0007	3
G.711.1 (R1) (64 kbit/s)	Schmalband	6,7	1,1	-3,42	0,9133	0,0013	5
G.711.1 (R2a) (80 kbit/s)	Schmalband	6	1,3	-2,81	0,9026	0,0015	4
G.711.1 (R2b) (80 kbit/s)	Breitband	1,5	2	0,579	1,0462	0,0048	3,5
G.711.1 (R3) (96 kbit/s)	Breitband	5	1,9	-2,39	1,0577	0,0045	3
G.722 (64 kbit/s)	Breitband	5	1,1	-2,34	1,0759	0,0012	9
G.722.2 (23,05 kbit/s)	Breitband	2	0,4	1,39	1,02	0	0

Bekanntgegeben wurde das A-Modell erstmals auf der KSTiT im September 2012 in Warschau. Erste Implementierungen fanden in dem Produkt TraceView der Firma Nextragen [103] statt (vgl. Kap.15). Der Einsatz in der Industrie zeigt den praktischen Nutzen des A-Modells. Der erfolgreiche Ansatz bei der Entwicklung des A-Modells soll im Folgenden auf

12 Das A-Modell (Audio-Modell)

die Übertragung von MP3-codierten Sprachsignalen in IP-Umgebungen angewendet werden. Ziel ist es hier, ein geeignetes MP3-Modell zu definieren und dessen Tauglichkeit zu untersuchen. Dies bildet den Inhalt des folgenden Kapitels.

13 Das MP3-Modell

13.1 Der MP3-Codec

Der von dem Fraunhofer Institut entwickelte Audiocodec MP3 (MPEG Audio Layer III) ist Bestandteil der MPEG (Motion Pictures Expert Group)-Standards und aktuell ein Standard der verlustbehafteten Audio-Kompression [57]. MPEG spezifiziert 3 Klassen der Audio-Kompression, die als Layer I, II und III bekannt sind. Höhere Layer besitzen sowohl eine höhere Kompressions-Effektivität als auch -Komplexität. Die Kompression basiert auf psychoakustischen Modellen, in denen die Exaktheit der Audioanteile verringert wird, die für das menschliche Gehör weniger stark wahrnehmbar sind. In der Tab. 13.1 werden die unterschiedlichen MP3-Versionen aufgelistet: Als Bestandteil der MPEG-1-Standards, als Bestandteil der MPEG-2-Standards und als proprietäre Lösung (MPEG-2.5). Im Rahmen dieses Kapitels werden Breitband-Referenzsignale (16 kHz Abtastfrequenz) und die MPEG-2 Audio Layer III-Version des MP3-Codecs verwendet.

Tab. 13.1: MPEG Audio Layer III-Versionen [57]

Version	internationaler Standard	unterstützte Abtastfrequenz
MPEG-1 Audio Layer III	ISO/IEC 11172-3 (MPEG-1 Part 3)	32000 Hz / 44100 Hz / 48000 Hz
MPEG-2 Audio Layer III	ISO/IEC 13818-3 (MPEG-2 Part 3)	16000 Hz / 22050 Hz / 24000 Hz
MPEG-2.5 Audio Layer III	kein Standard, proprietär	8000 Hz / 11025 Hz / 12000 Hz

Der Kodierprozess setzt sich aus den folgenden 4 Schritten zusammen: Zunächst wird das Audiosignal in Frames mit jeweils 1152 Abtastwerten aufgeteilt, gefiltert und mittels einer modifizierten diskreten Kosinustransformation (MDCT) aus dem Zeit- (Samples) in den Frequenzbereich transformiert. Parallel dazu findet eine psychoakustische Analyse statt, die wiederum Eingangsparameter für die MDCT bereitstellt. Anschließend wird das Signal quanti-

13 Das MP3-Modell

siert und von dem Huffman-Algorithmus kodiert. Zuletzt wird der ausgehende Bitstrom aufbereitet und gegebenenfalls noch einem Cycling Redundancy Check (CRC) unterzogen.

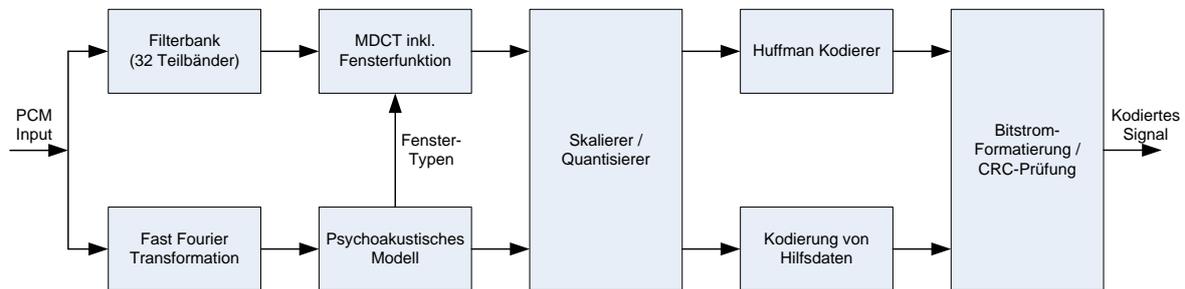


Abb. 13.1: Blockdiagramm des MP3-Kodierers (in Anlehnung an [122])

13.2 Untersuchungsumgebung und -ergebnisse

Die Funktionsweise des hier eingesetzten numerischen Software-Tools zur Bestimmung der QoS bei MP3-kodierten Audioströmen in einer IP-Umgebung (vgl. Kap. 8) zeigt Abb. 8.1. Die folgende Liste zeigt die einzelnen Programmsequenzen des Tools, die einen Vergleich der realen Umgebung mit dem Mess-Tool ermöglichen:

- Das Referenzfile wird geladen.
- Das Audiosignal wird anhand des MP3-Codecs kodiert.
- Der kodierte Datenstrom wird in einzelne, 1152 Samples umfassende, Frames aufgeteilt und gemäß [25] in RTP-Pakete gekapselt.
- Der Fehler-Block generiert den gewünschten Grad der Signal-Beeinträchtigung innerhalb des Netzwerkes.
- Die empfangenen Pakete werden zunächst in dem Jitterbuffer zwischengespeichert und anschließend gemäß dem implementierten Ablauf-Algorithmus weiterverarbeitet (hier: Silent Insertion im Falle eines Paketverlustes (vgl. Abschn. 5.5)).
- Die paketierte Sprach-Samples werden anhand des MP3-Codecs dekodiert.
- Der dekodierte und beeinträchtigte Audiostrom wird zusammen mit der Referenzdatei dem PESQ-Algorithmus übergeben. Dieser berechnet daraufhin den PESQ-Wert auf der MOS-Skala.

Für die Analyse werden folgende Parameter angenommen:

13 Das MP3-Modell

- Nicht-deterministisch (Binomialverteilung) verteilte Paketverluste zwischen 0 % und 10 %.
- Nicht-deterministisch (Exponentialverteilung) um die Mittelwerte 1-5 verteilte und anschließend gerundete Burstgröße.
- Referenzsignal: “p564_speech_ukf1_wb.bin”, “p564_speech_spm2_wb.bin”, “p564_speech_jpf2_wb.bin” and “p564_speech_dem1_wb.bin” als 16-kHz (Breitband) Referenzsignale gemäß der Empfehlung [108]. Die Signale sind unter [74] zu finden.
- MP3-Codec mit einer konstanten Kodierungsrate von 80 kbit/s und 1, 2 oder 3 Frame(s) je RTP-Paket.
- 61 Messungen je Wert der verwendeten Veränderlichen (hier: Paketverluste). Damit werden Konfidenzintervalle erreicht, die kleiner als 10% der untersuchten Mittelwerte sind (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).
- PESQ auf der MOS-LQO-Skala als resultierende QoE-Werte.
- Silent Insertion im Falle eines Paketverlustes (vgl. Abschn. 5.5).

Im Weiteren werden beispielhaft Messergebnisse aus der verwendeten Messumgebung präsentiert. Die Kurven in Abb. 13.2 und Abb. 13.3 weisen im Gegensatz zu den zuvor untersuchten Sprachcodecs einen beinahe linearen Verlauf mit leicht erhöhten QoS-Werten für steigende Burstgrößen auf. Werden mehrere Frames in einem RTP-Paket gekapselt (vgl. Abb. 13.3), verringert sich die Qualität mit steigender Verlustrate weniger stark als es bei nur einem Frame je Paket der Fall ist. Es zeigt sich, dass sowohl größere Burstgrößen als auch erhöhte Mengen an Frames je Paket einen positiven Einfluss auf die Robustheit gegenüber Paketverlusten haben. Analog zu dem *BSLP* des EIP- bzw. A-Modells wurde daher hier das Burst Frame Product (*BFP*) eingeführt. Dabei handelt es sich um das Produkt aus der durchschnittlichen Burstgröße und der Anzahl an Frames je RTP-Paket.

13 Das MP3-Modell

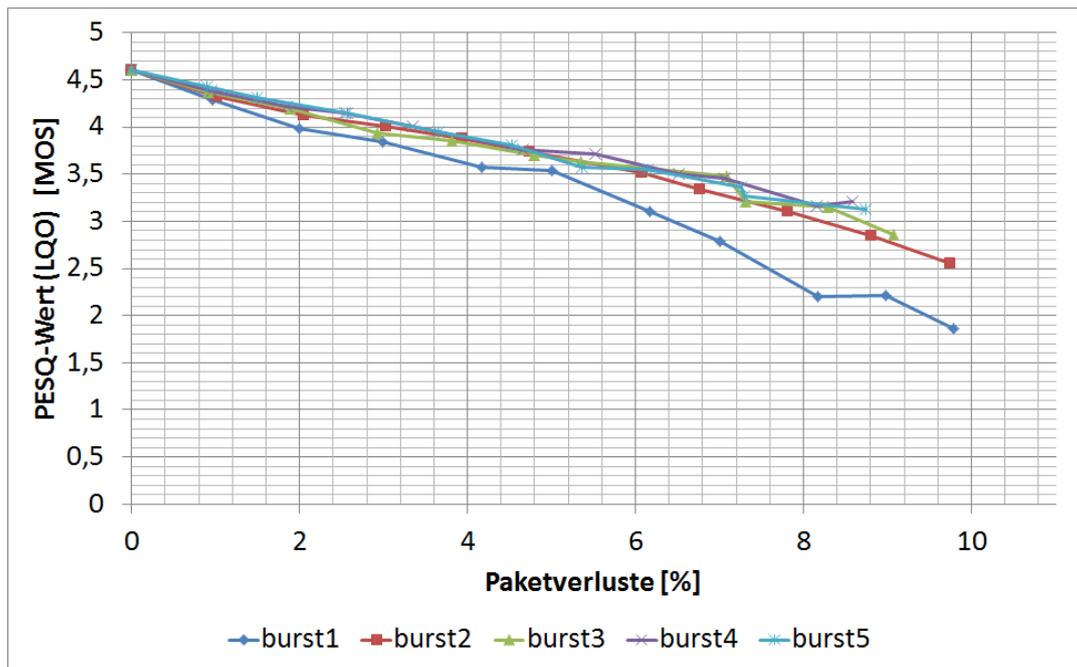


Abb. 13.2: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße bei einem Frame je RTP-Paket für den Codec MP3 (80 kbit/s)

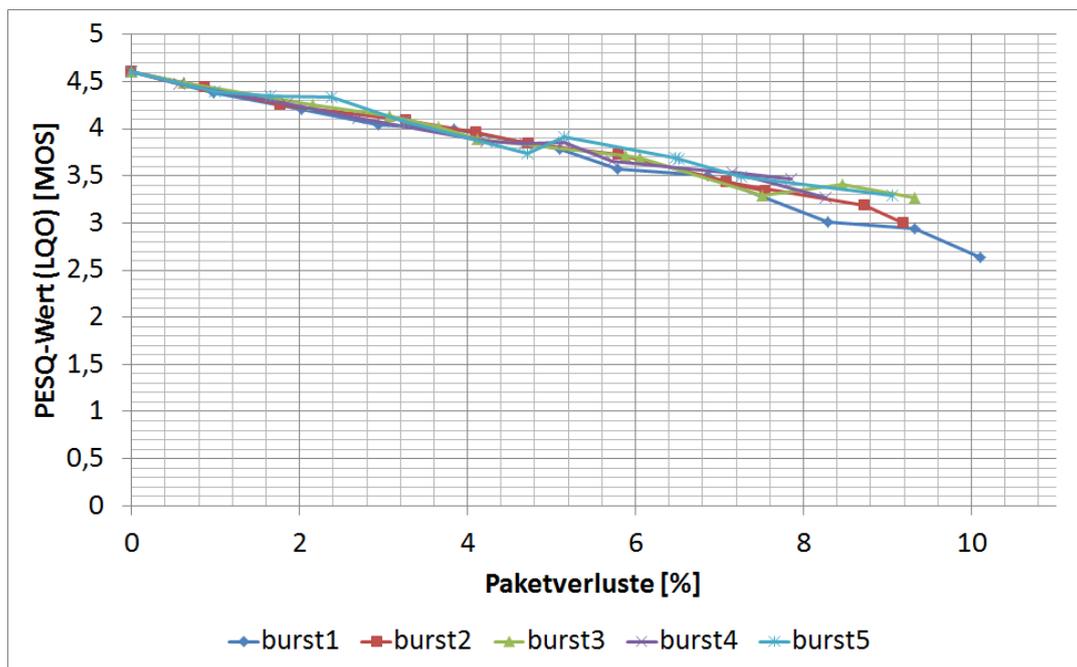


Abb. 13.3: PESQ-Werte als Funktion der Paketverluste und der Burstgröße bei 3 Frames je RTP-Paket für den Codec MP3 (80 kbit/s)

13.3 Formulierung des MP3-Modells

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass der Parameter Paketverluste einer der wichtigsten Beeinträchtigungs-Faktoren in IP-Umgebungen darstellt. Die entsprechenden Kurvenverläufe der QoS-Werte weisen dabei einen ausgesprochen linearen Verlauf auf. Weitere die Dienstgüte beeinflussende Parameter sind: Die Anzahl der Frames je RTP-Paket, die Kodierungsrate und die durchschnittliche Burstgröße. Die Dimensionierung und Art der Implementierung des verwendeten Jitterbuffers hat ebenfalls einen erheblichen Einfluss auf die resultierende Qualität. Kleinere Jitter oder in vertauschter Reihenfolge empfangene Pakete können in einem Jitterbuffer ausgeglichen werden. Sobald allerdings diese Beeinträchtigungen die Größe des Buffers übersteigen, werden die entsprechenden Pakete verworfen und als Verluste in dem MP3-Modell registriert. Dies sind alle Faktoren, die bei der Entwicklung eines parameterbasierten Modells zur Bestimmung der Sprachqualität bei dem Dienst VoIP in Betracht gezogen werden müssen. Die Abb. 13.4 zeigt das Blockdiagramm des hier entwickelten parameterbasierten MP3-Modells für die Bestimmung der Qualität von mit dem MP3-Codec kodierten Audioströmen in einer IP-Umgebung (auf Basis des A-Modells (vgl. Kap. 12)).

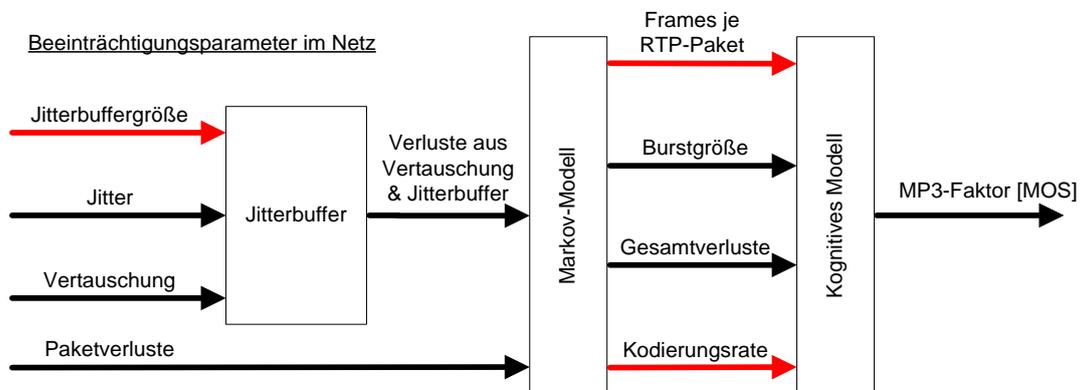


Abb. 13.4: Blockdiagramm des MP3-Modells

In der Praxis wird angenommen, dass während der Bestimmung der QoS die Paketströme einer RTP-Session mittels eines Protokoll-Analyse-Tools gesammelt und anschließend an ein geeignetes Beurteilungs-Tool weitergereicht werden. Bei dem MP3-Modell handelt es sich um ein solches Bewertungs-Tool. Es arbeitet nach den folgenden Prinzipien: Alle Netzwerk-Beeinträchtigungen werden in dem 1. Prozess-Block gesammelt und verarbeitet. Hier werden die Effekte des Jitters und in nicht sequenzieller Reihenfolge ankommender Pakete in Verluste umgerechnet, wobei auch die Kompensation dieser Beeinträchtigung durch den Jitterbuffer

13 Das MP3-Modell

mit einbezogen wird. Mit den in diesem Prozess-Block erlangten Werten und Paketverlusten werden in dem folgenden Prozess-Block die Gesamt-Paketverluste und die Burstgröße errechnet. Im Rahmen der Entwicklung des MP3-Modells wird das Markov-Merkmal Gedächtnislosigkeit angenommen, einer häufig bei der Analyse von IP-Netzwerken als Grundlage dienende Eigenschaft. Die in diesem Schritt neu berechneten Parameter werden anschließend an den dritten und letzten Prozess-Block weitergereicht. Weitere in diesem Prozess-Block benötigte Informationen, die sich aus der Analyse des RTP-Stromes ergeben, sind die Anzahl der Frames in einem RTP-Paket und die verwendete Kodierungsrate. In dem, „Kognitives Modell“ genannten, Prozess-Block wird als letzter Schritt der MP3-Faktor auf der MOS_{LQO} -Skala berechnet. Die für diesen Vorgang benötigten mathematischen Zusammenhänge sind in dem Block in tabellarischer Form abgelegt. Die Daten dieser Tabelle wurden anhand folgender Schritte ermittelt:

– *Schritt 1*

Ermittlung der PESQ-Kurven als Funktionen der Paketverluste, Burstgröße und Anzahl von Frames je RTP-Paket mittels eines geeigneten numerischen Software-Tools (vgl. Kap. 8). Diese dienen als Basis für weitere Berechnungen. Diese Herangehensweise ersetzt die Alternative, Gruppen von Probanden in speziellen Tonstudios Bewertungen von Audiosignalen durchführen zu lassen. Auf diese Weise wird während der Entwicklung von parameterbasierten QoS-Modellen sowohl Zeit als auch Geld eingespart.

– *Schritt 2*

Zeichne die PESQ-Werte in Abhängigkeit zu dem Produkt aus der Anzahl an Frames je RTP-Paket und der Burstgröße (BFP , vgl. Abschn. 13.2) für Paketverluste von 1 %, 3 %, 5 %, 7 % und 10 %. Approximiere die Kurven unter Verwendung der Formel (13.1) als lineare Funktionen (Methode der kleinsten Quadrate).

$$\text{MP3-Faktor} = \alpha \cdot BFP + \beta \quad (13.1)$$

Der Koeffizient α drückt die Steigung des Kurvenverlaufs aus. Der Koeffizient β entspricht dem Wert für ein fiktives BFP von 0.

13 Das MP3-Modell

– Schritt 3

Zeichne die Werte für die Koeffizienten α und β in Abhängigkeit von den Paketverlusten. Als Basis dienen hier die in Schritt 1 ermittelten linearen Gleichungen. Approximiere die Kurven unter Verwendung der Formeln (13.2) und (13.3). Auch hier wurde die Methode der kleinsten Quadrate verwendet. Formel (13.4) zeigt das Resultat aus den Formeln (13.1) bis (13.3).

$$\alpha = a \cdot P_{pl}^2 + b \cdot P_{pl} + c \quad (13.2)$$

$$\beta = d \cdot P_{pl} + e \quad (13.3)$$

$$\text{MP3-Faktor} = (a \cdot P_{pl}^2 + b \cdot P_{pl} + c) \cdot \text{BFP} + d \cdot P_{pl} + e \quad (13.4)$$

Alle fünf Koeffizienten a , b , c , d und e der Formel (13.4) stehen in Abhängigkeit zu der Kodierungsrate.

Tab. 13.2: Koeffizienten des MP3-Faktors

Koeffizient	Bedeutung
α	Steigung für die lineare Gleichung des MP3-Faktors
β	Ordinatenabschnitt für die lineare Gleichung des MP3-Faktors (BFP = 0)
a	Koeffizient von P_{pl}^2 in dem Polynom für die Steigung von α
b	Koeffizient von P_{pl} in dem Polynom für die Steigung von α
c	Absolutglied in dem Polynom für die Steigung von α
d	Steigung für die lineare Gleichung von β
e	Ordinatenabschnitt für die lineare Gleichung von β
BFP	Produkt aus durchschnittlicher Burstgröße und Anzahl an Frames je RTP-Paket
P_{pl}	Verlustwahrscheinlichkeit

13 Das MP3-Modell

Die Schritte 2 und 3 werden im Folgenden am Beispiel der Kodierungsrate von 80 kbit/s illustriert.

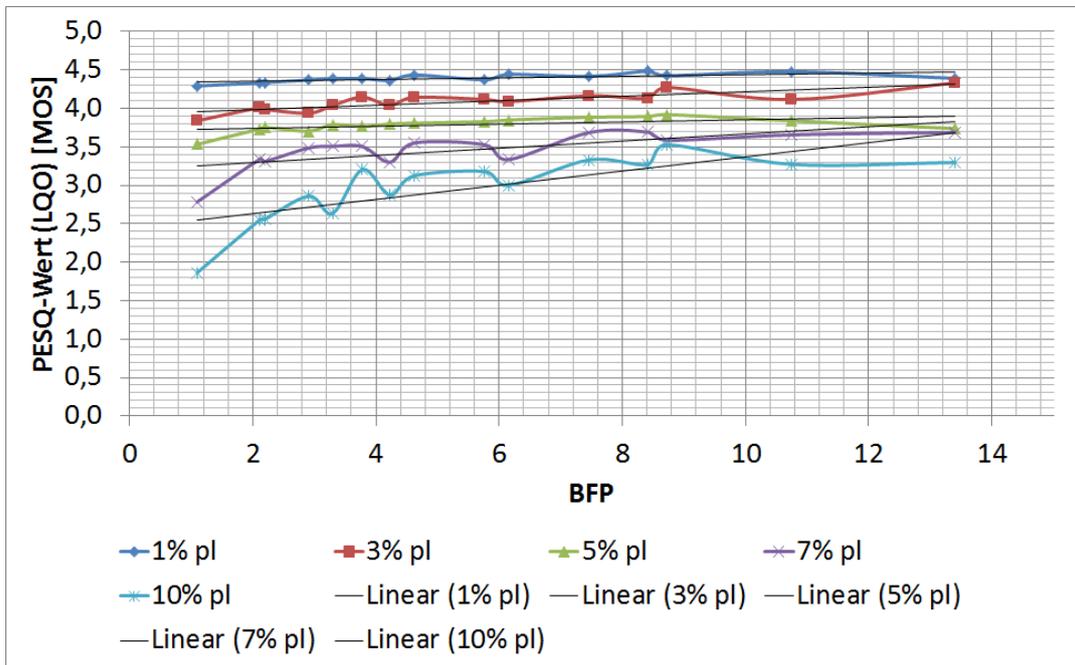


Abb. 13.5: Approximation der PESQ-Werte als Funktion des *BFP* für ausgewählte Paketverluste und eine Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 2)

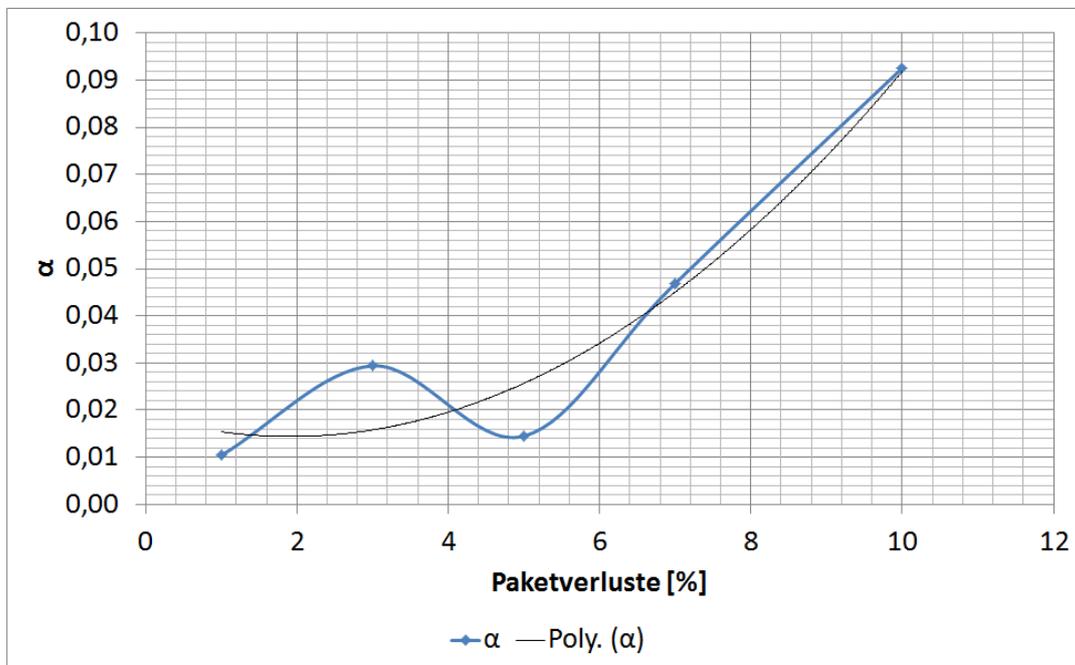


Abb. 13.6: Approximation des Parameters α als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit bei einer Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 3)

13 Das MP3-Modell

In der Abb. 13.5 werden die mittels der Formel (13.1) für einige ausgewählte Paketverluste approximierten Kurvenverläufe aufgezeigt. Steigende Verluste führen zu höheren Werten für den Koeffizienten α und zum anderen zu sinkenden Werten für den Koeffizienten β . Abb. 13.6 zeigt sowohl die in Schritt 1 bestimmten Werte (vgl. Abb. 13.5) für die Steigung α als auch den mittels der Formel (13.2) approximierten Kurvenverlauf. Die sich hieraus ergebenden konkreten Werte für die Koeffizienten a , b und c zeigen die Formeln (13.5) bis (13.7). Die resultierende Gleichung für α wird in Formel (13.8) dargestellt.

$$a = 0,0012 \quad (13.5)$$

$$b = -0,0045 \quad (13.6)$$

$$c = 0,0187 \quad (13.7)$$

$$\alpha = 0,0012 \cdot P_{pl}^2 - 0,0045 \cdot P_{pl} + 0,0187 \quad (13.8)$$

Die Werte für den Koeffizienten β aus Schritt 1 (vgl. Abb. 13.5) und den mittels der Formel (13.3) approximierten Kurvenverlauf zeigt die Abb. 13.7. Die konkreten Werte der Koeffizienten d und e werden in den Formeln (13.9) und (13.10) dargestellt. Aus diesen ergibt sich die resultierende Gleichung für β (vgl. Formel (13.11)).

$$d = -0,2067 \quad (13.9)$$

$$e = 4,5975 \quad (13.10)$$

$$\beta = -0,2067 \cdot P_{pl} + 4,5975 \quad (13.11)$$

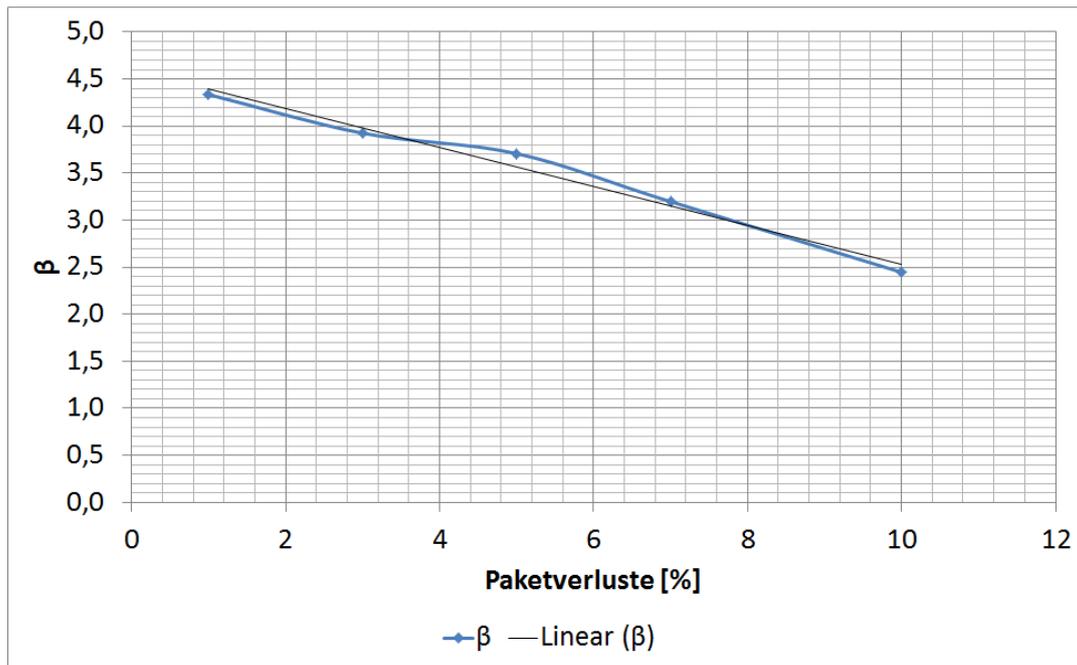


Abb. 13.7: Approximation des Parameters β als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit bei einer Kodierungsrate von 80 kbit/s (Schritt 3)

Aus den Formeln (13.1), (13.8) und (13.11) ergibt sich der MP3-Faktor in Abhängigkeit der Verlustwahrscheinlichkeit und des *BFP* für eine Bitrate von 80 kbit/s:

$$\text{MP3-Faktor} = (0,0012 \cdot P_{pl}^2 - 0,0045 \cdot P_{pl} + 0,0187) \cdot BFP - 0,2067 \cdot P_{pl} + 4,5975 \quad (13.12)$$

13.4 Vergleichsstudie

Im Folgenden soll die Tauglichkeit des neu entwickelten MP3-Modells unter Beweis gestellt werden. Zu diesem Zweck werden Szenarien formuliert, die einen Vergleich zwischen einer signalbasierten Bewertungsmethode (hier: PESQ) und dem MP3-Modell ermöglichen. Die Vergleichsstudie erfolgt in einer realen IP-Umgebung (vgl. Abb. 11.7 in Abschn. 11.2.2). Die folgenden Eigenschaften werden angenommen:

- Binomialverteilte Paketverluste zwischen 0 % und 10 %, burstfreie Übertragung und 1 Frame je RTP-Paket.
- Binomialverteilte Paketverluste zwischen 0 % und 10 %, burstfreie Übertragung und 3 Frames je RTP-Paket.

13 Das MP3-Modell

- Binomialverteilte Paketverluste zwischen 0 % und 10 %, exponentialverteilte Burstgröße von 3 (gerundet nach DIN 1333) und 1 Frame je RTP-Paket.
- Binomialverteilte Paketverluste zwischen 0 % und 10 %, exponentialverteilte Burstgröße von 3 (gerundet nach DIN 1333) und 3 Frames je RTP-Paket.
- Audiocodec MP3 (MPEG-2 Audio Layer III) mit einer Kodierungsrate von 80 kbit/s.
- 61 Messungen je Wert der verwendeten Veränderlichen (hier: Paketverluste). Damit werden Konfidenzintervalle erreicht, die kleiner als 10% der untersuchten Mittelwerte sind (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%).
- PESQ-Algorithmus (Wideband-Version) und MP3-Modell als QoS-Bewertungsmethoden.

Die Ergebnisse der Vergleichsstudie sind in Abb. 13.8 bis Abb. 13.11 illustriert. Die zum Teil starken Schwankungen der PESQ-Kurvenverläufe resultieren aus den sich unterscheidenden Bedeutungen der verloren gegangenen Pakete für die Sprachqualität. Die Größe des Sprachanteils hat einen erheblichen Einfluss auf die QoS und aufgrund der Verteilung der Verluste einen zufälligen Charakter.

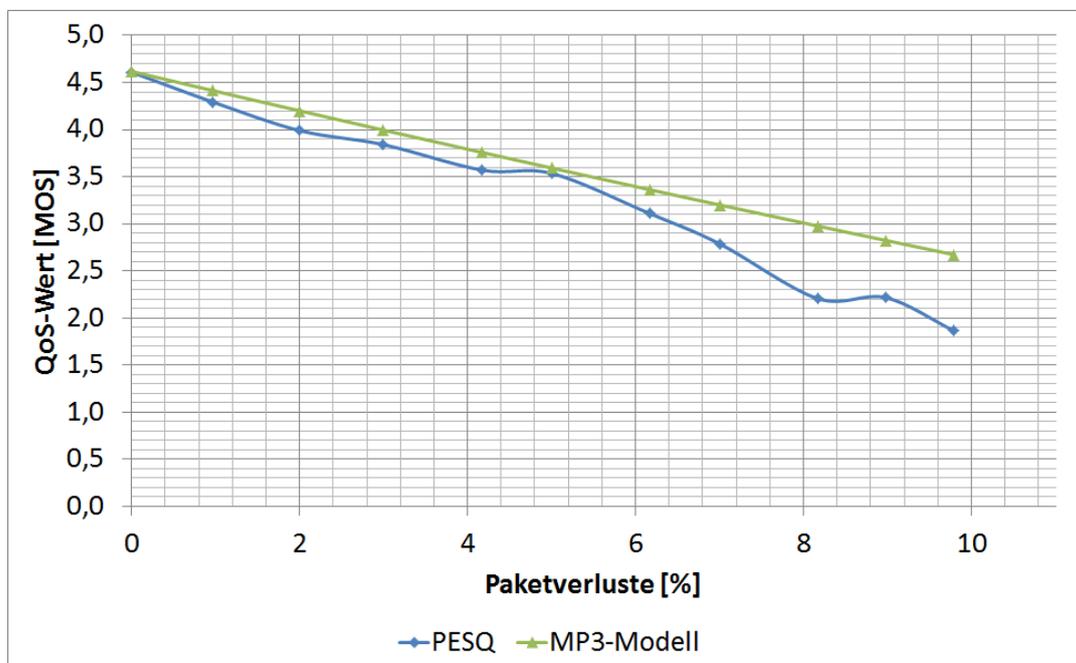


Abb. 13.8: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; burstfreie Übertragung; 1 Frame je RTP-Paket)

13 Das MP3-Modell

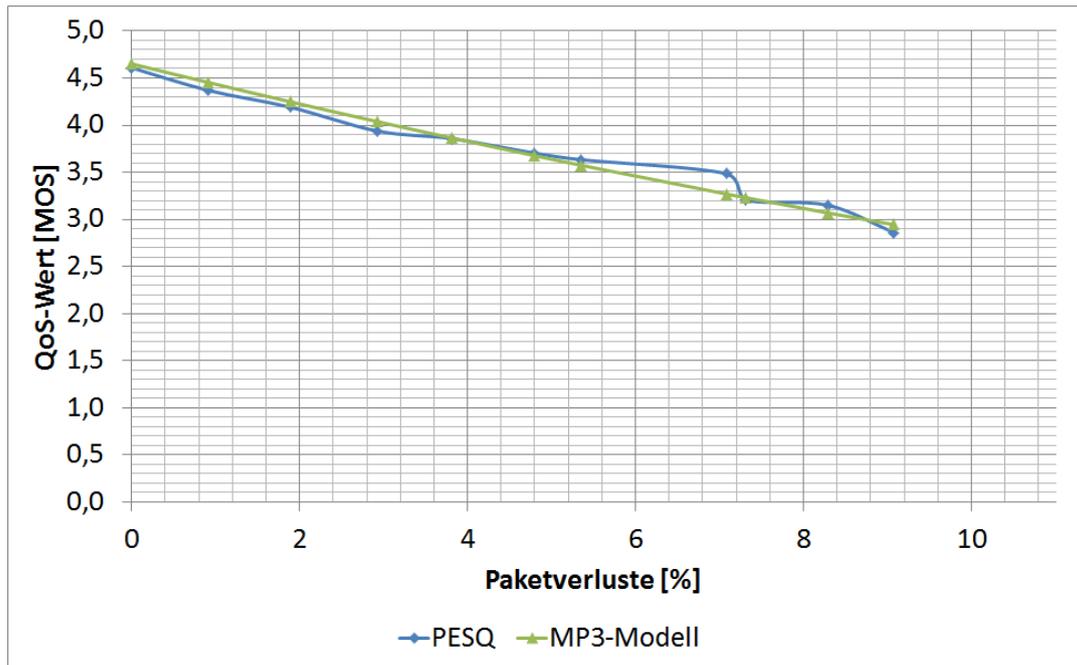


Abb. 13.9: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; durchschnittlichen Burstgröße von 3; 1 Frame je RTP-Paket)

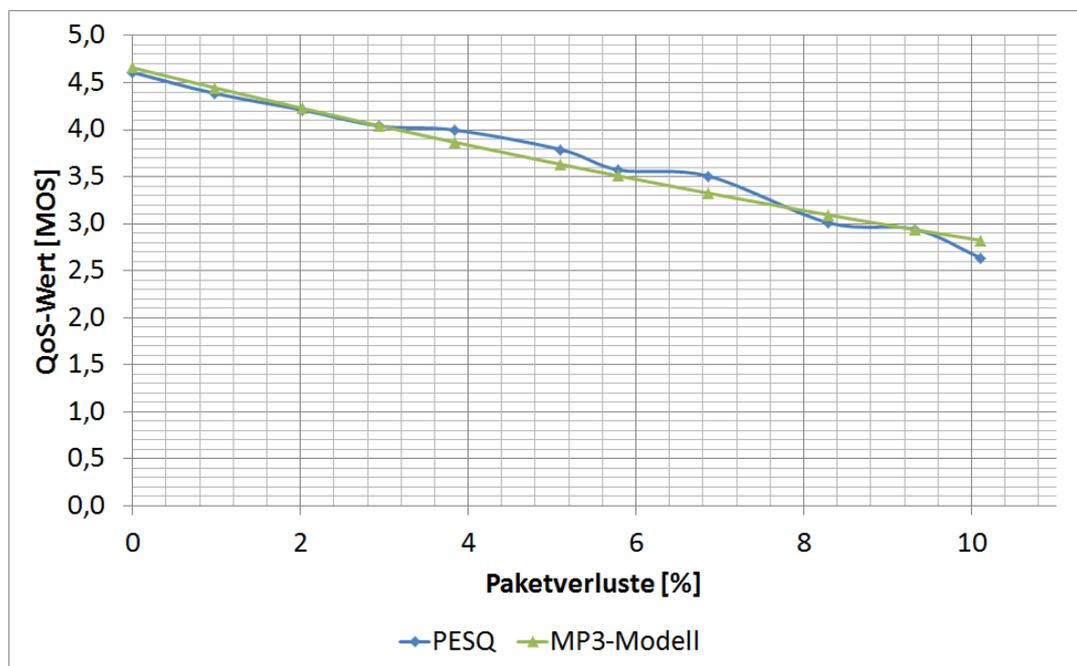


Abb. 13.10: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s); burstfreie Übertragung; 3 Frames je RTP-Paket)

13 Das MP3-Modell

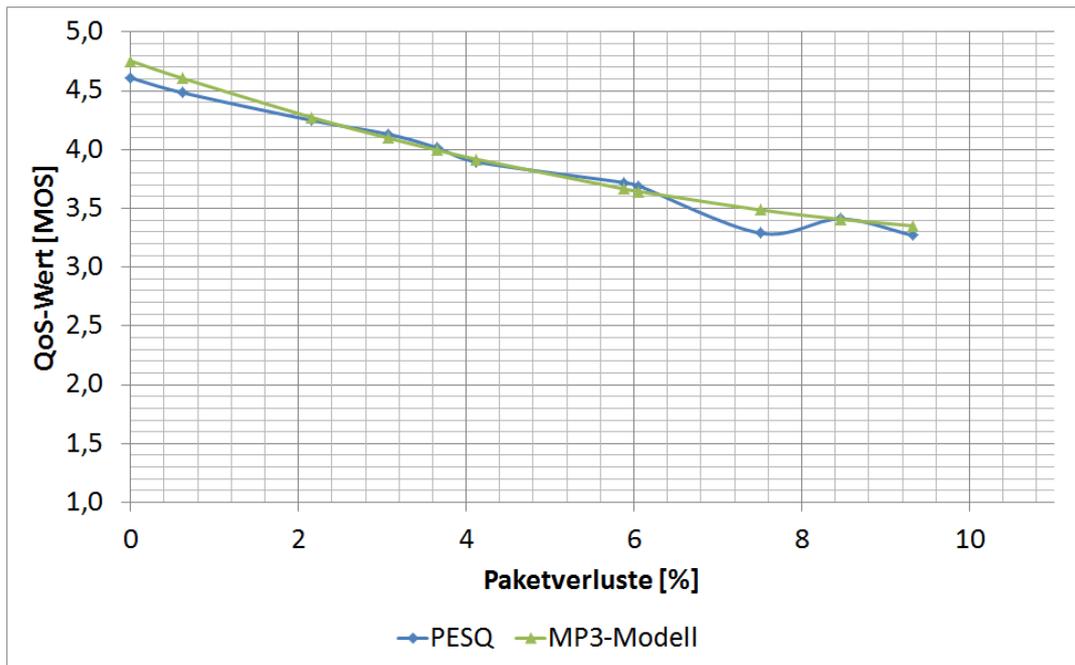


Abb. 13.11: QoS-Werte als Funktion der Verlustwahrscheinlichkeit unter Verwendung sowohl des PESQ-Algorithmus als auch des MP3-Modells für den Audiocodec MP3 (80 kbit/s; durchschnittliche Burstgröße von 3; 3 Frames je RTP-Paket)

Die Abbildungen Abb. 13.8 bis Abb. 13.11 zeigen, dass die Kurven für den PESQ-Algorithmus und des MP3-Modells sehr ähnliche Verläufe aufweisen. Dies bestätigt die Brauchbarkeit des MP3-Modells für die Praxis. Die folgende Tab. 13.3 zeigt die Parameter des MP3-Modells für einige ausgewählte Bitraten.

Tab. 13.3: Parameter des MP3-Modells für einige ausgewählte Bitraten

Sprachcodec	a	b	c	d	e
MP3 (64 kbit/s)	0,0015	-0,0054	0,0167	-0,2151	4,5812
MP3 (80 kbit/s)	0,0012	-0,0045	0,0187	-0,2067	4,5975
MP3 (96 kbit/s)	0,0011	-0,0052	0,0186	-0,2103	4,591

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

14.1 Arten von Jitterbuffer

Im Rahmen dieses Kapitels werden zwei unterschiedliche Implementierungen eines Jitterbuffers untersucht. Bei der ersten Implementierung handelt es sich um einen passiven FIFO-Jitterbuffer. Dieser erkennt anhand der Sequenznummer, ob es sich um ein altes, das zu erwartende oder ein zukünftiges Paket handelt. Im ersten Fall wird das Paket von dem FIFO-Buffer ignoriert. Im zweiten und dritten Fall findet eine Analyse des entsprechenden Jitters statt. Ist dieser höher als die eingestellte Jitterbuffergröße, wird die Differenz zwischen diesen Werten als Stille vor dem Paket eingefügt. Handelt es sich um ein Paket, dessen Sequenznummer höher als erwartet ist, wird für jedes fehlende Paket zusätzliche Stille entsprechend der verwendeten Sprachprobenlänge eingefügt. Für die Bestimmung der durchschnittlichen Jittergröße einer Messung wird aber der Jitter eines jeden ankommenden Paketes untersucht.

Bei der zweiten Implementierung handelt es sich um einen aktiven PJSIP-Jitterbuffer, der eine Teilfunktionalität des Medien-Stacks PJMEDIA darstellt. Dieser befindet sich in dem Open Source SIP-Stack PJSIP [118] und stellt Funktionen bereit, die die Entwicklung von SIP-Anwendungen (Softphones, Hardphones, Gateways, u.a.) ermöglichen. Der in diesen Bibliotheken verwendete Jitterbuffer verarbeitet die einzelnen RTP-Pakete in Echtzeit, ändert bei einer Vertauschung die Reihenfolge und gibt diese anschließend wieder an das aufrufende Programm zurück. Für die hier verwendeten Standard-Einstellungen dieses Buffers gilt ein sogenannter Prefetch von 80%. Dies bedeutet, dass der Buffer zu Beginn und nach einem Leerlaufen erst dann Pakete ausgibt, wenn dieser zu 80 % gefüllt ist. Dabei wird grundsätzlich auf ganzzahlige Paketgrößen abgerundet und die Größe eines Paketes wird niemals unterschritten. Durch diese Echtzeitverarbeitung entsteht eine verzögerte Audioausgabe innerhalb des Abspielgerätes, die der Größe dieses Prefetches entspricht. Dies liegt darin begründet, dass die RTP-Pakete innerhalb des Jitterbuffers zunächst verarbeitet und anschließend zur Ausgabe geleitet werden. Es ist hier zu vermerken, dass im Falle eines Jitterbuffer-Überlaufes

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

bei der Ankunft eines neuen Paketes automatisch das in der Sequenz älteste Paket aus dem Buffer verworfen wird. In der Konsequenz können hier im Gegensatz zu dem passiven FIFO-Buffer, in welchem ein zu hoher Jitter nie zu einem Paketverlust führt, zusätzliche Verluste entstehen.

Die beiden Jitterbuffer werden in ein QoS-Messsystem integriert und anschließend der Untersuchung unterzogen. Die dazu verwendete Untersuchungsumgebung wird im folgenden Abschnitt beschrieben.

14.2 Vergleichsstudie und Ergebnisse

Die Versuchsumgebung entspricht der realen IP-Umgebung aus Abschn. 11.2.2. Das Trace-View_Sim-Tool, das die gespiegelten RTP-Pakete empfängt, ist mit zwei unterschiedlichen Jitterbuffern, einem passiven FIFO- und einem aktiven PJSIP-Buffer, ausgestattet und unterstützt u.a. das E-Modell und den PESQ-Algorithmus.

In dieser Untersuchungsumgebung werden folgende Szenarien definiert und ausgeführt:

- Passiver FIFO-Jitterbuffer; Codec G.711 (PCM); 20 ms Sprachprobenlänge; zufälliger Jitter mit Mittelwerten von 0 ms bis 100 ms
- Aktiver PJSIP-Jitterbuffer; Codec G.711 (PCM); 20 ms Sprachprobenlänge; zufälliger Jitter mit Mittelwerten von 0 ms bis 100 ms
- Passiver FIFO-Jitterbuffer; Codec GSM (CELP); 20 ms Sprachprobenlänge; zufälliger Jitter mit Mittelwerten von 0 ms bis 100 ms
- Aktiver PJSIP-Jitterbuffer; Codec GSM (CELP); 20 ms Sprachprobenlänge; zufälliger Jitter mit Mittelwerten von 0 ms bis 100 ms

In allen in der Studie verwendeten Szenarien wurden so viele Messungen durchgeführt, sodass die Konfidenzintervalle kleiner als 10% der ermittelten Mittelwerte sind (bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5%). Die im 1. und 2. Szenario erhaltenen Ergebnisse verdeutlichen Abb. 14.1 und Abb. 14.2.

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

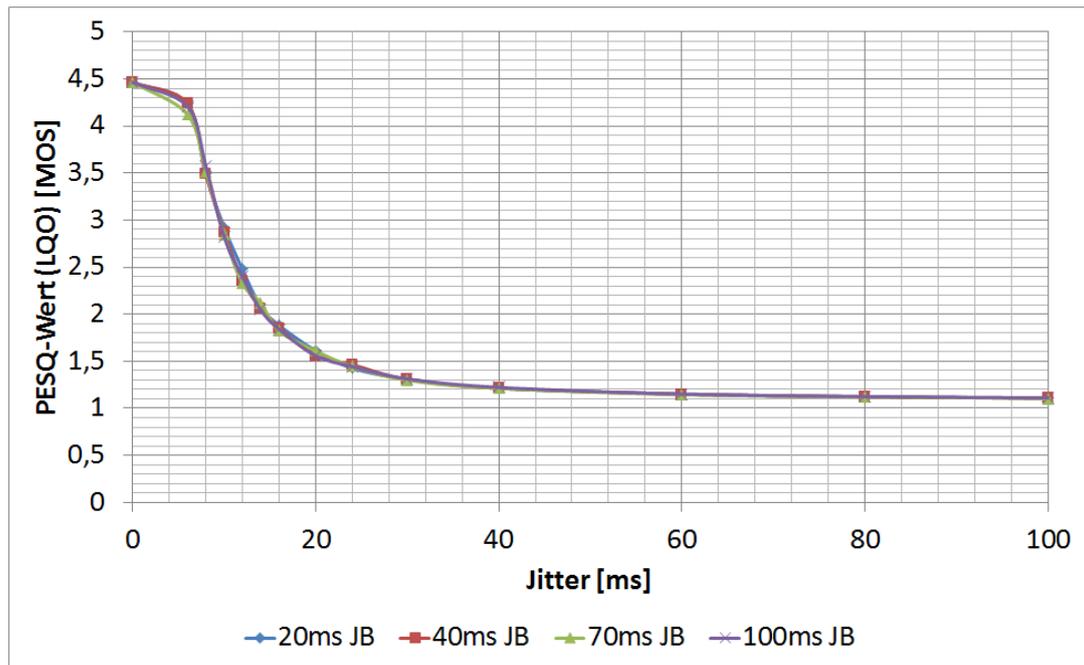


Abb. 14.1: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec G.711 unter Verwendung eines FIFO-Buffers [106]

Bei nicht vorhandenem Jitter ergibt sich für den VoIP-Dienst unter Verwendung des Codecs G.711 eine sehr gute Qualität von ca. 4,5 MOS. Bei dem Einsatz eines FIFO-Buffers nehmen die QoS-Werte mit steigendem Jitter sehr schnell ab. Es ist auch zu erkennen, dass die Jitterbuffergröße hier fast keinen Einfluss auf die QoS-Werte hat. Dies ist damit zu begründen, dass es bei steigendem Jitter sehr schnell zu vielen Vertauschungen in der Reihenfolge der Pakete kommt. Daraus resultiert, dass in dem Jitterbuffer sehr häufig Stille an den Stellen eingeblendet wird, an denen ein Paket nicht in der korrekten Reihenfolge eintrifft. Auch durch großzügig dimensionierte Jitterbuffer ist es nicht möglich, diesen ausgeprägten Effekt der Vertauschung zu kompensieren. Die Arbeitsweise ist bei dem passiven Jitterbuffer zwar einfach, jedoch aus der praktischen Sicht nicht annehmbar. Hier müssen komplexere Verfahren in dem Jitterbuffer implementiert werden (siehe PJSIP-Puffer).

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

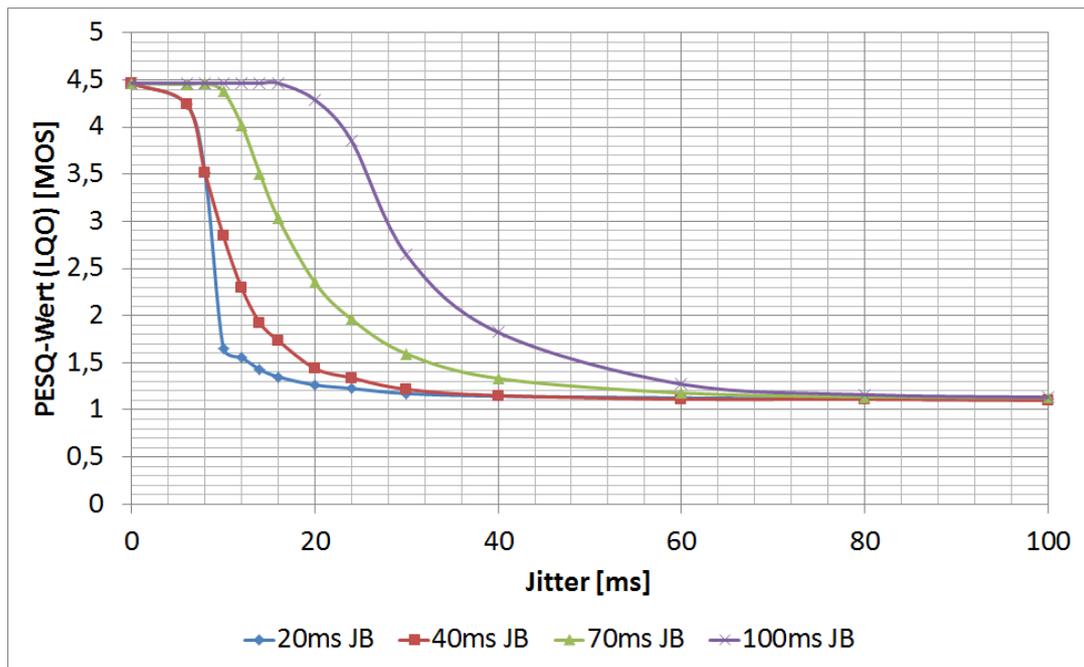


Abb. 14.2: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec G.711 unter Verwendung eines PJSIP-Buffers [106]

Die Kurven aus der Abb. 14.2 verdeutlichen bei steigendem Jitter im Vergleich zu dem FIFO-Buffer eine wesentliche Verbesserung der QoS-Werte. Im Gegensatz zu dem vorherigen Szenario hat hier die Jitterbuffergröße einen sehr großen Einfluss auf die Dienstgüte. Außerdem zeigt sich, dass die Verwendung eines zu klein dimensionierten aktiven Jitterbuffers (1 Paket) zu einer geringeren Dienstgüte führt, als dies bei einem passiven Buffer der Fall ist. Dies liegt darin begründet, dass in einem solchen Fall bereits geringfügig verfrüht eintreffende Pakete aufgrund der geringen Buffergröße verworfen werden. Im Fall, dass zwei Pakete in dem Buffer Platz finden, weisen beide Buffer vergleichbare Qualität auf. Bei der Verwendung von großzügig dimensionierten Jitterbuffers (größer als 40 ms) ist der aktive Buffer von Vorteil.

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

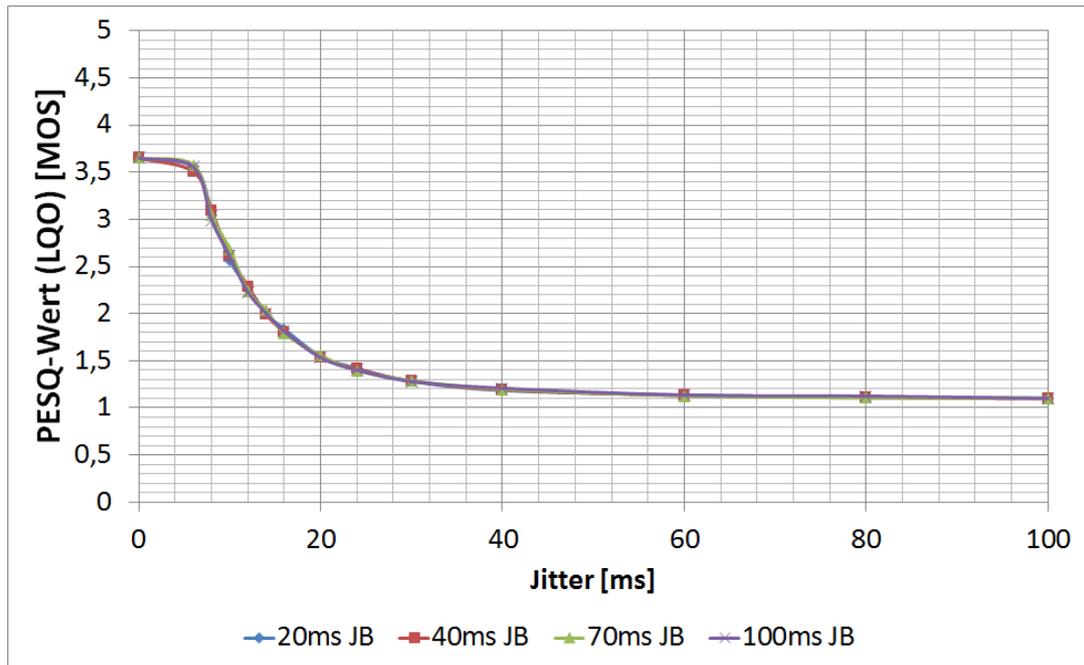


Abb. 14.3: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec GSM unter Verwendung eines FIFO-Buffers [106]

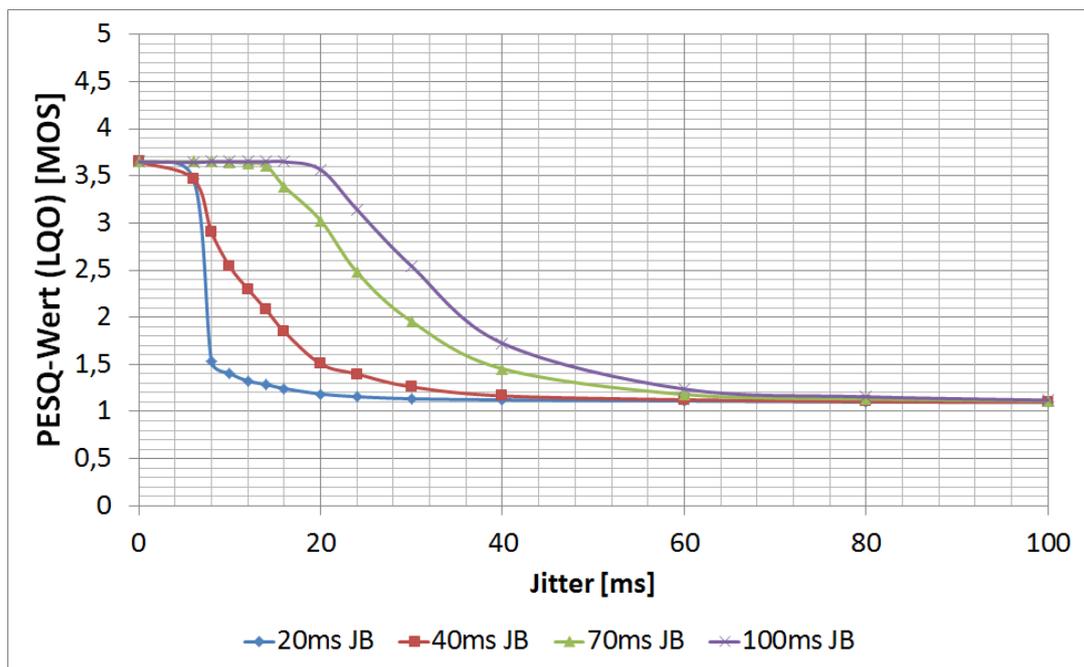


Abb. 14.4: PESQ-Werte als Funktion des Jitters und der Sprachprobenlänge für den Sprachcodec GSM unter Verwendung eines PJSIP-Buffers [106]

Die Ergebnisse aus dem dritten und vierten Szenario sind in Abb. 14.3 und Abb. 14.4 grafisch dargestellt. Die Kurvenverläufe weisen zu dem ersten und zweiten Szenario sehr ähnliche

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

Charakteristiken auf, mit dem Unterschied, dass die QoS-Werte generell deutlich niedriger sind. Dies liegt in dem bei dem Codec GSM verwendeten Codierungsverfahren (CELP) begründet. Auch hier zeigt sich, dass es sich lohnt, mit einem aktiven, großzügig dimensionierten Jitterbuffer zu arbeiten.

Auch weitere aus Platzgründen hier nicht gezeigte Untersuchungsergebnisse bestätigen den oben beschriebenen Verlauf der QoS-Charakteristiken in der VoIP-Umgebung mit weiteren Codecs, z.B. iLBC, G.722 u.a.. Damit lässt sich sagen, dass die im Rahmen dieser Untersuchungsstudie erzielten Ergebnisse und Erkenntnisse eine allgemeine Gültigkeit haben.

14.3 Hinweis für die Praxis

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurde gezeigt, dass es sich lohnt, mit großzügig dimensionierten aktiven Jitterbuffern zu arbeiten. Jedoch muss hier eine Tatsache unterstrichen werden. Vergrößert sich die Jitterbuffergröße, so steigt auch die Ende-zu-Ende-Verzögerung bei einer VoIP-Verbindung. Diese Verzögerung setzt sich im Allgemeinen aus der Netzverzögerung (durch RTCP bestimmbar), der Jitterbuffergröße (beeinflusst die zu erwartende Verzögerung durch den Jitterbuffer) und der Kodierungs- bzw. Dekodierungszeit (für jeden Codec-Typ bekannt) zusammen. Die Abb. 14.5 veranschaulicht den Einfluss der Ende-zu-Ende-Verzögerung auf die QoS-Werte (hier: E-Modell). Die Kurven zeigen, dass die Ende-zu-Ende-Verzögerung bis zu einem Wert von ca. 200 ms einen sehr großen Einfluss auf die Dienstgüte hat. Die Abnahme der Dienstgüte ist mit steigender Verzögerung jedoch sehr rasant. Daraus resultiert, dass man sehr vorsichtig bei der Dimensionierung des Jitterbuffers sein muss. Hier lässt sich eine praktische Regel ableiten. Die Jitterbuffergröße sollte so gewählt werden, dass die Ende-zu-Ende-Verzögerung während einer VoIP-Verbindung den Wert von ca. 200 ms nicht übersteigt.

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

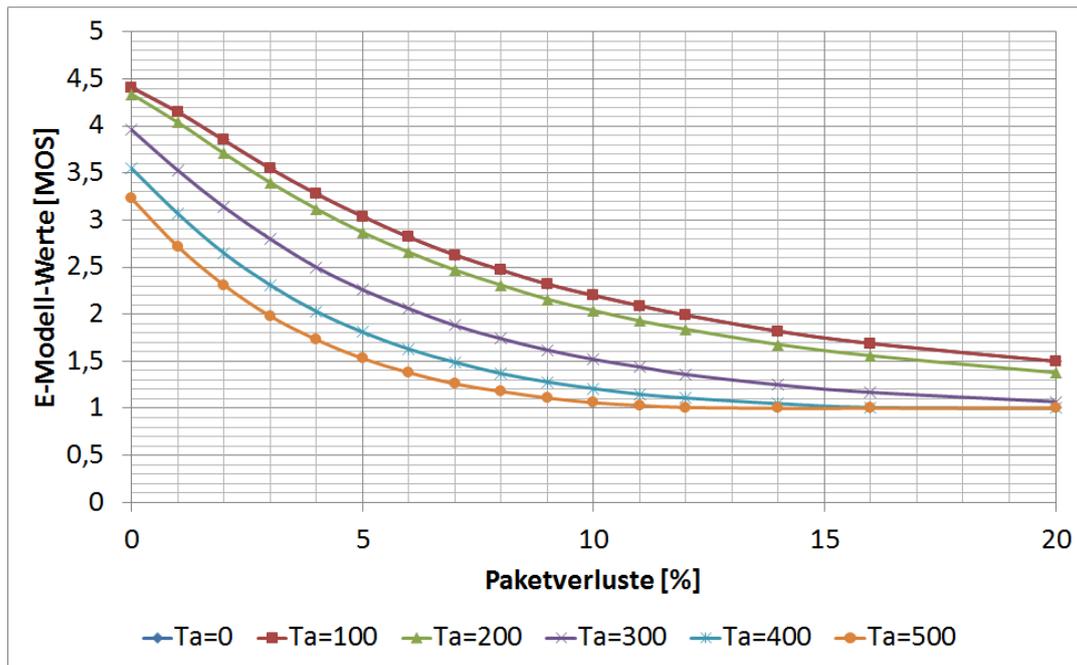


Abb. 14.5: QoS-Werte (E-Modell) als Funktion der Ende-zu-Ende-Verzögerung und der Paketverluste für VoIP-Verbindungen unter Verwendung des Sprachcodecs G.711 [106]

Neben den auf relativ simple Art und Weise implementierten adaptiven Jitterbuffern, wie dies bei dem PJSIP-Buffer der Fall ist, existieren auch komplexere Versionen, die u.a. in Echtzeit die momentane QoS bestimmen und entsprechend reagieren können. So wird unter [13] ein solcher Jitterbuffer vorgestellt, im welchem mittels des E-Modells und einer Klassifizierung der einzelnen Sprachpakete innerhalb des Dekoders auf Probleme bei der Datenübertragung durch Dimensionsanpassungen reagiert und so eine Erhöhung der Dienstgüte erreicht wird.

14 Jitterbuffer und sein Einfluss auf die Qualität des Dienstes VoIP

15 Integration der neuen QoS-Modelle in ein Messsystem

Die Firma Nextragen [103] bietet Dienstleistungen und Software-Lösungen in den Bereichen QoE und QoS für die Dienste VoIP, Videotelefonie und IPTV. Eines der Kernprodukte der Firma ist der VoIP/Video Traffic Simulator *TraceSim*, ein Werkzeug zur aktiven Netzwerküberwachung mittels Generierung und Empfang von Gesprächsdaten bzw. Videoströmen. Im Rahmen dieses Kapitels soll die Integration der in dieser Arbeit entwickelten parameterbasierten Bewertungsmethoden EIP- und A-Modell in dieses Software-Tool beschrieben werden.

15.1 Funktionsumfang des Messsystems

TraceSim erlaubt Bewertungen der Ende-zu-Ende-Qualität anhand von verschiedenen standardisierten Bewertungsmethoden, die Durchführung von geplanten Messungen und die Generierung von Alarmmeldungen bei Performance-Engpässen. Die gemessenen Netzparameter können sowohl tabellarisch als auch grafisch ausgegeben und anschließend archiviert werden. Als Bewertungsmethoden stehen u.a. PESQ, POLQA und das E-Modell zur Verfügung. Einige der ermittelten Netzparameter sind: DeltaT (Zeitdifferenzen zwischen den empfangenen Paketen), Jitter, Paketverluste, Paketvertauschungen und doppelte Pakete.

15 Integration der neuen QoS-Modelle in ein Messsystem

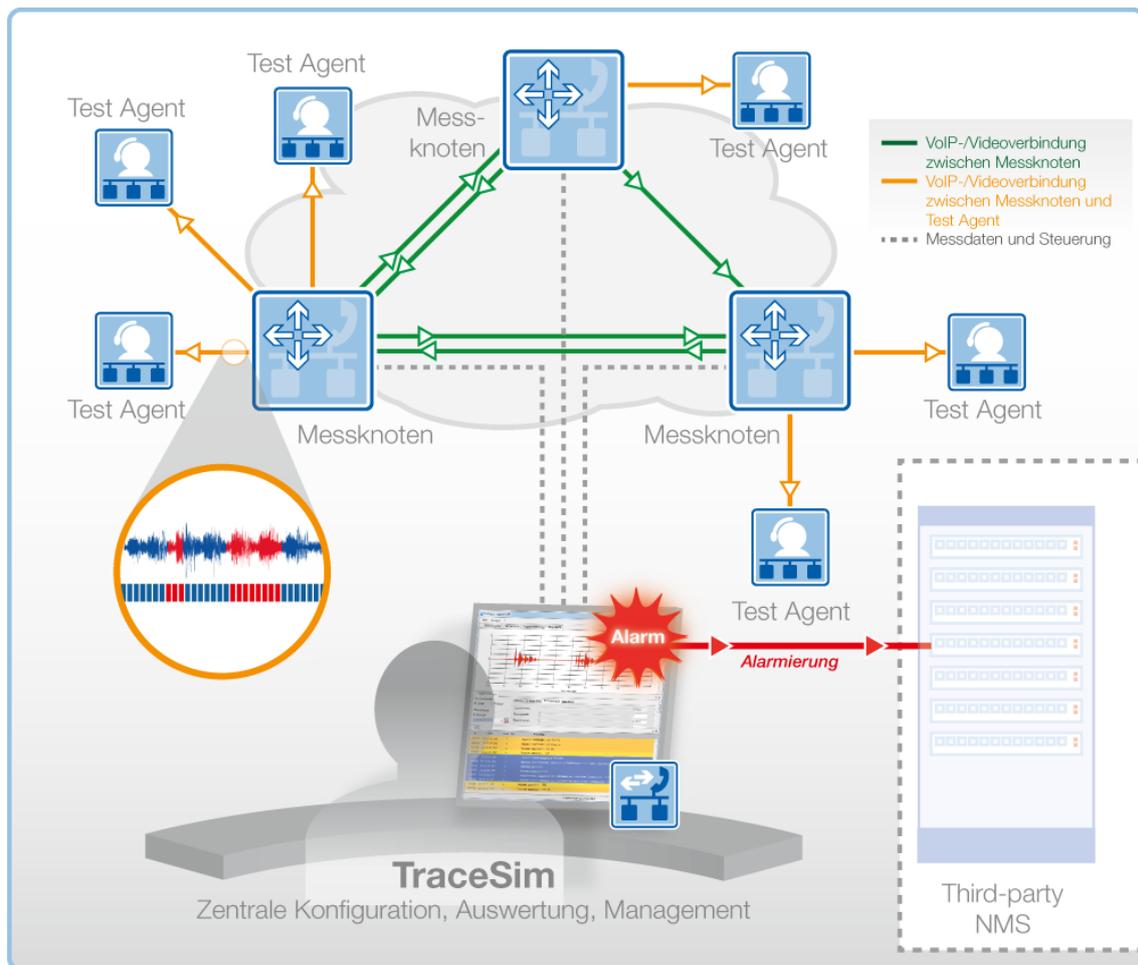


Abb. 15.1: Funktionsumfang und Anwendungsgebiete des Messtools TraceSim [103]

Die Abb. 15.1 zeigt den generellen Aufbau eines Messsystems, in dem *TraceSim* sowohl für die Kontrolle als auch die Auswertung der QoS von Audio- und Video-Streaming-Diensten verwendet wird. Referenzsignale werden zwischen den einzelnen Endgeräten (Test Agents) versendet und durchlaufen dabei Messknoten. Diese werden durch das *TraceSim*-Tool kontrolliert, das wiederum die entstehenden Messdaten von den einzelnen Knoten erhält. Auf diese Art und Weise ist es möglich, bis zu 300 parallele VoIP-Gespräche zwischen dem Tool und den Test Agents zu generieren, zu kontrollieren und zu bewerten. Sollten zuvor festgelegte Grenzwerte unter- bzw. überschritten werden, können entsprechende Meldungen mittels eMails oder auch einer direkten Anbindung an ein Network Management Station (NMS) erzeugt werden.

15 Integration der neuen QoS-Modelle in ein Messsystem

The screenshot displays the TraceSim VoIP - ONLINE interface. The top section, titled 'VoIP-Ready', contains a table with the following data:

CallGroup	Anzahl durchgeführter Verbindungen	Anzahl paralleler Verbindungen	Anzahl möglicher Verbindungen	Jitter Avg ms				Jitter Max ms				Packet Loss % (Total)			Str. Ab.
				Min	Avg	Max	Std. Abw.	Min	Avg	Max	Std. Abw.	Min	Avg	Max	
CG3 (G.711 µ-Law)	3	3	3	0,180	0,386	0,674	0,210	166	265	315	69,7	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.711 a-Law)	3	3	3	0,181	0,396	0,717	0,231	176	267	319	65,1	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.721)	2	2	2	0,221	0,357	0,494	0,136	171	239	308	68,7	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.722)	2	2	2	0,247	0,369	0,491	0,122	193	257	321	64,4	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.723.1)	2	2	0	0,744	1,05	1,35	0,302	171	173	175	1,94	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.726/16)	2	2	0	0,213	0,377	0,541	0,164	171	238	305	66,9	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.726/24)	2	2	2	0,259	0,442	0,625	0,183	175	243	312	68,3	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.726/32)	2	2	2	0,283	0,431	0,579	0,148	167	243	319	75,7	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.726/40)	2	2	2	0,314	0,476	0,638	0,162	171	242	313	71,2	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (G.729a)	2	2	2	0,220	0,329	0,437	0,109	172	245	319	73,2	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0
CG3 (GSM)	3	3	0	0,193	0,446	0,769	0,240	172	224	318	66,7	0,00 (0)	0,00 (0)	0,00 (0)	0,0

The bottom section, titled 'Log', shows a list of events:

Nr.	Zeit	Verb. Nr.	Ereignis
548608	14:07:24.591	75040	Request empfangen: 180 Ringing
548609	14:07:24.592	75040	Request empfangen: 200 OK
548610	14:07:24.594	75040	Request gesendet: ACK
548611	14:07:24.683	74739	Request gesendet: BYE
548612	14:07:24.683	74739	Request empfangen: 200 OK
548613	14:07:25.613	75041	Request gesendet: INVITE
548614	14:07:25.614	75041	Request empfangen: 100 Trying
548615	14:07:25.621	75041	Request empfangen: 180 Ringing
548616	14:07:25.621	75041	Request empfangen: 200 OK
548617	14:07:25.623	75041	Request gesendet: ACK
548618	14:07:25.685	74739	Request gesendet: BYE
548619	14:07:25.686	74739	Request empfangen: 200 OK

Abb. 15.2: Benutzeroberfläche des Messtools *TraceSim* [103]

Die in Abb. 15.2 gezeigte Benutzeroberfläche des *TraceSim*-Tools gliedert sich in zwei Teilbereiche auf. Die VoIP-Ready-Ansicht in dem oberen Bereich listet die empfangenen Pakete gruppiert nach den eingesetzten Sprachcodecs auf, während das Log-Fenster des unteren Bereichs die einzelnen Prozessschritte der eingesetzten Protokolle zeigt (Aufbau, Halten bzw. Abbau von Verbindungen).

15.2 Implementierung des EIP- und A-Modells

Eine weitere Ansicht in dem Messtool *TraceSim* ist die Verbindungsliste, die eine Auflistung aller in der Vergangenheit hergestellten und aktuellen VoIP-Verbindungen darstellt. Hier werden u.a. die IP-Adresse der Quelle bzw. des Ziels, die Verbindungsdauer, der eingesetzte Codec und die auf der Übertragungsstrecke aufgetretenen Beeinträchtigungsparameter aufgelistet. Außerdem werden die gemessenen Parameter an eine Anzahl an Bewertungsmethoden übergeben und die entsprechenden QoS-Werte ebenfalls ausgegeben. Abb. 15.3 zeigt eine solche Verbindungsliste, die als Bewertungen in diesem Fall ausschließlich die neuen parameterbasierten Methoden EIP- und A-Modell ausgibt.

15 Integration der neuen QoS-Modelle in ein Messsystem

Messereinstellungen mm		Verbindungsliste		Globale Filter														
Nr.	Quelle	Ziel	Modus	Start	Dauer	Ende	Status	Codec	PL In	PL In [Z]	MOS(E)P	MOS(A)In	RTT [ms]	Jitter [ms]	Jitter [ms]	Jitter [ms]	Jitter [ms]	
3	10.0.1.9	10.0.1.14.5061	[Icon]	15:36:20	0:00:32	15:36:52	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
4	10.0.1.9	10.0.1.14.5061	[Icon]	15:37:13	0:00:32	15:37:45	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
5	10.0.1.9	10.0.1.14.5061	[Icon]	15:38:05	0:01:02	15:39:07	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	0	0.00%	4.514	4.41	3.417 / 7.113 / 17.562	0.0	0.0	3.6	387.9	3.8
6	10.0.1.9	10.0.1.14.5061	[Icon]	15:47:26	0:02:11	15:49:37	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	1	0.02%	4.223	4.18	2.975 / 12.146 / 36.4	0.0	0.0	3.3	401.3	3.8
7	10.0.1.9	10.0.1.14.5061	[Icon]	15:48:27	0:01:10	15:49:37	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	3	0.09%	4.514	4.41	2.656 / 5.122 / 13.626	0.0	0.0	2.7	386.2	3.8
8	192.168.89.125	192.168.89.125.5061	[Icon]	11:21:57	0:00:22	11:22:19	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
9	192.168.89.125	192.168.89.125.5061	[Icon]	11:21:58	0:00:21	11:22:19	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
10	192.168.89.125	192.168.89.125.5061	[Icon]	11:21:59	0:00:20	11:22:19	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
11	192.168.89.125	192.168.89.125.5061	[Icon]	11:22:00	0:00:19	11:22:19	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
12	192.168.89.125	192.168.89.125.5061	[Icon]	11:22:01	0:00:18	11:22:19	beendet	K.A.	0	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.	K.A.
13	10.0.2.15	10.0.2.15	[Icon]	09:22:16	0:00:31	09:22:47	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	0	0.00%	4.514	4.41	30.944 / 83.315 / 15.	0.0	0.0	0.8	3.8	3.8
14	10.0.2.15	10.0.2.15	[Icon]	09:22:16	0:00:31	09:22:47	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	0	0.00%	4.514	4.41	0.091 / 0.303 / 0.546	0.0	0.0	0.7	3.8	3.8
15	192.168.2.10	192.168.2.100	[Icon]	07:55:11	0:00:35	07:55:45	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	15	0.88%	3.878	3.92	185.000 / 194.571 / ..	0.0	0.0	7.7	32.4	32.4
16	192.168.2.10	192.168.2.100	[Icon]	12:11:10	0:00:35	12:11:46	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	16	0.92%	3.320	3.39	188.000 / 198.000 / ..	0.0	0.0	7.5	31.0	31.0
17	192.168.2.10	192.168.2.100	[Icon]	15:31:28	0:00:31	15:31:59	beendet	G.711 a-Law; RFC2833	0	0.00%	4.514	4.41	0.000 / 0.000 / 0.000	0.0	0.0	0.7	16.7	16.7

Abb. 15.3: Verbindungsliste des Messtools TraceSim [103]

16 Zusammenfassung und Ausblick

Thema dieser Dissertation war die ausführliche Auseinandersetzung mit der Dienstgüte in modernen Kommunikationsnetzen und -systemen. An erster Stelle stand die Definition und Bedeutung der Dienstgüte aus Sicht internationaler Standardisierungsorganisationen und des Europäischen Parlaments. Ein Ergebnis dieser Arbeit ist die Erkenntnis, dass die Themen QoS/QoE immer wichtigere Aspekte der Kommunikation darstellen und aktuelle Themen für den IT-Markt sind. Inzwischen haben dies auch die Regulierungsbehörden in vielen EU-Ländern erkannt und entsprechende Maßnahmen ergriffen. So hat u.a. die BNetzAgentur in Deutschland im Januar 2015 einen Auftrag (nach Ausschreibung im Juni 2014) für die Erstellung eines QoS-Messsystems zur Bestimmung von Beeinträchtigungsparametern an dem Internet-Zugangsknoten vergeben. Planmäßig ist die Inbetriebnahme für Ende 2015 angedacht. Ziel dieser, auf Anraten der EU initiierten, Entwicklung ist die Sicherstellung der Netzneutralität sowie der Netztransparenz auf dem Telekommunikationsmarkt. Um die Effizienz dieser QoS/QoE-Messsysteme zu gewährleisten, ist die Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden notwendig. Für einige Kommunikationsdienste stehen diese bereits heute zur Verfügung, sind jedoch häufig hochkomplex und kostenintensiv. Die Motivation dieser Dissertation ist der Mangel an effizienten Bewertungsmethoden für den zeitreuen VoIP-Dienst.

Zunächst wurden die wesentlichen Begriffe, Definitionen und Standards bezüglich des Dienstes VoIP vorgestellt. Es folgte die Beschreibung der Beeinträchtigungsparameter in digitalen Netzen gemäß der Spezifikationen nach ITU-T und ETSI und die Klassifizierung existierender QoS-Bewertungsmethoden im Allgemeinen sowie im Detail für den VoIP-Dienst. Im Weiteren wurde das neu entwickelte numerische Untersuchungstool QoSCalc(VoIP) vorgestellt, das die Hauptuntersuchungsumgebung für mehrere der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Studien bereitstellt. Unter Zuhilfenahme dieses Tools wurden zunächst Referenzsignale für den PESQ-Algorithmus untersucht. Es zeigte sich hier, dass die Verwendung von längeren Signalen neben dem verringerten Messaufwand auch die Erzeugung von aussagekräftigeren QoS-Werten mittels des PESQ-Algorithmus ermöglicht. Außerdem stellte sich heraus, dass der Algorithmus hohe Anforderungen bezüglich Aufbau, Beschaffenheit und

Länge des Signals stellt. Daher sollte auch bei der Interpretation von Messergebnissen in einer realen Umgebung die starke Sensibilität der Bewertungsmethode hinsichtlich der übertragenen Sprache berücksichtigt werden. Die hier erzielten Erkenntnisse wurden in weiteren Analysen berücksichtigt. In einer weiteren groß angelegten Studie wurden die bereits existierenden und standardisierten QoS-Bewertungsmethoden (E-Modell, PESQ, POLQA) untersucht und deren resultierende QoS-Werte miteinander verglichen. Es zeigten sich hier zum Teil erhebliche Diskrepanzen. Besonders starke Abweichungen ergab der Vergleich der Beurteilungen mittels des parameterbasierten E-Modells und des signalbasierten PESQ-Algorithmus. Aus diesem Grund wurden Anpassungen des Modells für IP-Umgebungen vorgenommen. Auf Basis dieser Anpassungen entstand das neue EIP-Modell, welches auf internationalen Konferenzen vorgestellt und im Juni 2014 zum Patent angemeldet worden ist. Die Basis dieser Anpassungen bildet das Ersetzen der konstanten Werte für die Parameter B_{pl} (Robustheit des Sprachcodecs gegenüber Paketverlusten) und I_e (Beeinträchtigung des Sprachcodecs) durch jeweils eine lineare Gleichung mit dem Produkt der Burstgröße und der Sprachprobenlänge (BSLP) als Parameter. Neben einer Reihe von Schmalbandcodecs wurde das EIP-Modell auch für einige Breitbandmodi der Sprachcodecs G.711.1, G.722, G.722.2 hergeleitet.

Die im Zuge dieser Entwicklung gewonnenen Erkenntnisse bildeten die Grundlage für die Herleitung des neuen A-Modells. Im Folgenden wurde das Modell detailliert beschrieben und dessen Praxistauglichkeit unter Beweis gestellt. Auch hier wird der bereits bei dem EIP-Modell verwendete Parameter BSLP eingesetzt. Bei der Zielfunktion handelt es sich um eine Exponentialfunktion, dessen Exponenten u.a. die Netzparameter (Paketverluste und BSLP) enthalten. Um den Einfluss von Ende-zu-Ende-Verzögerungen zu berücksichtigen, wurde außerdem der Korrekturfaktor ΔA eingeführt. Als Basis für diesen Faktor diente der in dem E- und dem EIP-Modell bereits vorhandene Parameter T_a . Das A-Modell unterstützt inzwischen eine große Anzahl an gängigen Sprachcodecs und lässt sich auf einfache Art und Weise in bestehende QoS-Messsysteme integrieren. Die Firma Nextragen hat dies bereits realisiert und setzt sowohl das EIP- als auch das A-Modell in einem ihrer Produkte ein. Es zeigt sich damit, dass es sich bei beiden Modellen um preiswerte und praxisnahe QoS-Bewertungsmethoden handelt. Auch das A-Modell wurde auf mehreren Konferenzen mit Erfolg vorgestellt und in Fachzeitschriften veröffentlicht.

Der Erfolg des A-Modells war Ansporn, auch für die Übertragung von MP3-codierten Sprachsignalen eine parameterbasierte QoS-Bewertungsmethode zu entwickeln. Das entsprechende MP3-Modell wurde ebenfalls im Rahmen dieser Arbeit entwickelt. Auch dieses Mo-

dell wurde im Weiteren detailliert erläutert und dessen Funktionalität mithilfe einer groß angelegten Studie unter Beweis gestellt. Damit wurde eine Lücke auf dem Gebiet QoS für Audio-Streaming-Dienste geschlossen. Die abschließende Studie befasste sich mit dem Jitterbuffer als Error Concealment-Technik. Hier wurde untersucht, welche Auswirkungen die konkrete Umsetzung und die Dimensionierung des Jitterbuffers auf dessen Effektivität in Bezug auf die Fehlerverdeckung haben. Der positive Einfluss von komplex implementierten Buffer-Versionen, die sich adaptiv den momentanen Gegebenheiten anpassen, auf die QoS wurde anhand des in dem SIP-Stack PJSIP eingesetzten Buffers nachgewiesen. Außerdem wurde aufgezeigt, dass großzügig dimensionierte Jitterbuffer zu einer Erhöhung der Dienstgüte führen. Da diese zusätzlich zu einer Verstärkung der Verzögerung beitragen, sollte hier grundsätzlich vermieden werden, dass die Dimensionierung des Buffers zu einer Ende-zu-Ende-Verzögerung führt, die einen Wert von 200 ms überschreitet.

Der technische Fortschritt im Bereich der Dienste in IP-basierten Netzen zeigt sich u.a. bei der starken Verbreitung der Videodienste (Videotelefonie, IPTV, Video on Demand u.a.). Auch hier besteht der Bedarf, die Dienstgüte zu bestimmen. Zu diesem Zeitpunkt stehen allerdings nur wenige QoS/QoE-Bewertungsmethoden zur Verfügung. Dieser Mangel zeigt sich vor allen Dingen bei den parameterbasierten Modellen. Die in dieser Arbeit formulierten Vorgehensweisen bei der Entwicklung von QoS-Modellen für den VoIP-Dienst könnten ohne Weiteres auf die entsprechenden QoS-Werte der Videodienste übertragen werden. Dies würde es ermöglichen, in kurzer Zeit neue parameterbasierte QoS-Bewertungsmethoden für diese Dienste zu erarbeiten.

Der Begriff Triple-Play fasst zusätzlich zu den Audio- und Videodiensten die reine Datenübertragung zu einem Kommunikations- und Informationsangebot zusammen. [29] zeigt einen aktuellen Überblick über die Methoden zur Beurteilung der QoS und QoE für diese Dienste. Außerdem wird in dieser Arbeit eine parameterbasierte QoS-Bewertungsmethode vorgestellt, die eine Reihe von dienstspezifischen Methoden kombiniert und so eine Bewertung des vom Anbieter bereitgestellten Breitbandzugangs ermöglicht. Die Erfahrungen, die im Rahmen dieser Dissertation bei der Entwicklung neuer QoS-Modelle für den VoIP-Dienst gesammelt wurden, könnten bei der Herleitung von Modellen angewendet werden, mit deren Hilfe eine Beurteilung der Gesamtqualität von solchen konvergierenden Multimediadiensten möglich ist.

16 Zusammenfassung und Ausblick

Die Herangehensweise, die zu den Entwicklungen des EIP-, des A- und des MP3-Modells führte, zählt zu den sogenannten Data-Mining-Methoden. Hier werden durch die systematische Anwendung statistischer Methoden große Datenmengen auf Zusammenhänge hin analysiert. In [133] wurden Bewertungen, die zuvor mittels des PESQ-Algorithmus (vgl. Abschnitt 7.2.1) und des E-Modells (vgl. Abschnitt 7.2.3) generiert wurden, anhand von unterschiedlichen Data-Mining-Methoden analysiert und entsprechende Bewertungsmethoden entwickelt. Es zeigte sich hier, dass die Verwendung von künstlichen neuronalen Netzen (KNN) zu den präzisesten Vorhersagen führt. Die Herleitung und konkrete Formulierung von QoS-Bewertungsmethoden, die mittels des Einsatzes eines KNN entwickelt wurden, könnten die Basis für zukünftige Arbeiten in diesem Bereich sein.

Ein weiteres Thema, das eine immer größer werdende Relevanz darstellt, ist der Einsatz des VoIP-Dienstes in WLAN-Netzen. Übertragungen führen hier im Vergleich zu kabelgebundenen Netzen neben sicherheitsrelevanten Problemen häufig zu einer Verringerung der QoS beim VoIP-Dienst. Diese Qualitätseinbrüche resultieren u.a. aus der Mobilität aufgrund der Bewegungen der Gesprächsteilnehmer während einer VoIP-Verbindung. Außerdem muss sich die WLAN-Technik ihr Frequenzspektrum mit weiteren Funktechniken teilen, wodurch die Bandbreite eingeschränkt werden kann. Diese verringert sich ebenfalls mit zunehmender Entfernung zu dem Zugangspunkt, da diese Technik nur eine verhältnismäßig geringe Reichweite bietet. Diese systembedingten negativen Einflüsse können mittels QoS-Techniken (vgl. [54]) so weit verringert werden, dass optimierte Übertragungseigenschaften möglich sind. Zu diesen Techniken zählen u.a. verbesserte Zugriffsverfahren, eine Erhöhung der Effizienz in der Nutzung der zur Verfügung gestellten Bandbreite und die Priorisierung von Datenpaketen. Untersuchungen bezüglich des Einflusses dieser Verfahren auf die QoS des VoIP-Dienstes könnten wichtige Erkenntnisse bereitstellen. Diese Themen können im Rahmen weiterer Dissertationen bearbeitet werden.

17 Literaturverzeichnis

- [1] F. Ahmed, M.M. Alam, and M.Y. Arafat, "SIP-Based QoS in IP Telephony", *Journal of Networks*, vol. 9, no. 12, pp. 3415-3426, 2014.
- [2] M.A. Ali, A.A. Khan, and I. Rashid, "Selection of VoIP CODECs for Different Networks based on QoS Analysis", *International Journal of Computer Applications*, vol. 84, no. 5, pp. 38-44, 2013.
- [3] P. Almquist, *IETF RFC 1349: "Type of Service in the Internet Protocol Suite"*, 1992.
- [4] Asynchronous Transfer Mode Switching Tutorial.
http://docwiki.cisco.com/wiki/Asynchronous_Transfer_Mode_Switching (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [5] F. Baker, D. Black, S. Blake, and K. Nichols, *IETF RFC 2474: "Definition of the Differentiated Services Field (DS Field) in the IPv4 and IPv6 Headers"*, 1998.
- [6] T. Berners-Lee et al., *IETF RFC 2616: "Hypertext Transfer Protocol -- HTTP/1.1"*, 1999.
- [7] S. Berson, R. Braden, S. Herzog, S. Jasmin, and L. Zhang, *IETF RFC 2205: "Resource ReSerVation Protocol (RSVP)"*, 1997.
- [8] D. Black et al., *IETF RFC 2475: "An Architecture for Differentiated Services"*, 1998.
- [9] D. Black, S. Floyd, and K. Ramakrishnan, *IETF RFC 3168: "The Addition of Explicit Congestion Notification (ECN) to IP"*, 2001.
- [10] U.D. Black and M. Franz, *Voice over IP*: Prentice Hall PTR, 1999.
- [11] J. Blauert, *Communication Acoustics (Signals and Communication Technology)*: Springer, 2005.
- [12] J.C. Bolot et al., *IETF RFC 2198: "RTP Payload for Redundant Audio Data"*, 1997.
- [13] L. Böszörményi and L. Pang, "Adaptive Jitter Buffer based on Quality Optimization under Bursty Packet Loss", *International Journal on Advances in Telecommunications*, vol. 5, no. 1 & 2, pp. 1-10, 2012.

17 Literaturverzeichnis

- [14] R. Braden, *IETF RFC 1122: "Requirements for Internet Hosts -- Communication Layers"*, 1989.
- [15] R. Braden, D. Clark, and S. Shenker, *IETF RFC 1633: "Integrated Services in the Internet Architecture: an Overview"*, 1994.
- [16] P.D. Bricker and R.M. Krauss, "Effects of Transmission Delay and Access Delay on the Efficiency of Verbal Communication", *Journal of The Acoustical Society*, pp. 286-292, 1966.
- [17] R. Callon, E. Rosen, and A. Viswanathan, *IETF RFC 3031: "Multiprotocol Label Switching Architecture"*, 2001.
- [18] G. Carle, N. Long Lee, H. Sanneck, and A. Wolisz, *Intraflow Loss Recovery and Control for VoIP: MULTIMEDIA '01 Proceedings of the 9th ACM international conference on Multimedia*, 2001.
- [19] G. Carmarillo et al., *IETF RFC 3261: "SIP: Session Initiation Protocol"*, 2002.
- [20] S. Casner, R. Frederick, V. Jacobsen, and H. Schulzrinne, *IETF RFC 3550: "RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications"*, 2003.
- [21] *CEPT ECC Report 195: "Minimum Set of Quality of Service Parameters and Measurement Methods for Retail Internet Access Services"*, 2013.
- [22] D. Christiansen, S. Paulsen, and T. Uhl, "EIP-Modell für den VoIP-Dienst", Patent DE102010044727 B4, Mai 15, 2014.
- [23] D. Christiansen and T. Uhl, *VoIP Kernqualifikationen*: Christiani, Paul, 2006.
- [24] J.M. Cioffi, P.J. Silverman, M. Sorbara, and T. Starr, *DSL Advances*: Prentice Hall, 2003.
- [25] M. Civanlar, G. Fernando, V. Goyal, and D. Hoffman, *IETF RFC 2250: "RTP Payload Format for MPEG1/MPEG2 Video"*, 1998.
- [26] A. Clark, "Demystifying QoS - Measurement: Monitoring, MOS scores and R factors", in *INTERNET TELEPHONY® Conference & Expo*, Fort Lauderdale, 2006.
- [27] A. Clark, "Modeling the effects of Burst Packet Loss and Recency on Subjective Voice Quality", in *Internet Telephony Workshop (IPtel)*, New York, 2001.
- [28] D. Collins, *Carrier Grade Voice Over IP*: McGraw-Hill Professional, 2.Auflage, 2002.

- [29] P. de La Cruz Ramos, "Contribution to Models and Methodologies for Estimation of User Perceived Quality (QoE) from Network/Service Quality Parameters (QoS) in Convergent Multimedia Services (Triple-Play)", Polytechnische Universität Madrid, Dissertation 2013.
- [30] M. Decina and E. Scace, "CCITT Recommendations on the ISDN: A Review", *Journal on Selected Areas in Communications (IEEE)*, vol. 4, no. 3, pp. 320-325, Mai 1986.
- [31] Deutsches Patent- und Markenamt in München. <http://dpma.de/amt/kontakt/muenchen/index.html> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [32] N.N. Devi, P. Lamabam, S. Nandi, T. Sinam, and I.T. Singh, "A technique for classification of VoIP flows in UDP media streams using VoIP signalling traffic", in *Advance Computing Conference*, Gurgaon, 2014, pp. 354-359.
- [33] T. Dierks and E. Rescorla, *IETF RFC 5246: "The Transport Layer Security (TLS) Protocol Version 1.2"*, 2008.
- [34] *DIN EN ISO 8402: "Qualitätsmanagement – Begriffe"*, 2008.
- [35] *DIN EN ISO 9000: "Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe"*, 2005.
- [36] M. Ellis, T. Kypraios, C. Perkins, and D.P. Pazaros, "A two-level Markov model for packet loss in UDP/IP-based real-time video applications targeting residential users", *Computer Networks: The International Journal of Computer and Telecommunications Networking*, no. 40, pp. 384-399, September 2014.
- [37] *ETSI Guide EG 201 013: "Human Factors (HF); Definitions, abbreviations and symbols"*, 1997.
- [38] *ETSI TS 101 329-5 Annex E: "Method for determining an equipment impairment factor using passive monitoring"*, 2001.
- [39] N. Färber, B. Girod, and Y. Liang, "Adaptive playout scheduling and loss concealment for voice communication over IP networks", *Transactions on Multimedia*, vol. 5, no. 4, pp. 532-543, Dezember 2003.
- [40] J. Fischer, *VoIP-Praxisleitfaden: IP-Kommunikation für Sprache, Daten und Video planen, implementieren und betreiben*: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2008.
- [41] Frame Relay Tutorial. [Online]. http://docwiki.cisco.com/wiki/Frame_Relay (letzter Zugriff: Oktober 2015).

- [42] A. Freier, P. Karlton, and P. Kocher, *IETF RFC 6101: "The Secure Sockets Layer (SSL) Protocol Version 3.0"*, 2011.
- [43] I.A. Gerson and M.A. Jasiuk, *Vector sum excited linear prediction (VSELP) speech coding at 8 kbps*. Albuquerque: International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, ICASSP-90, 1990.
- [44] A. Gholamhosseinian, A. Khalifeh, and N. Zare Hajibagher, *QoS For Multimedia Applications with Emphasize on Video Conferencing*, 2011, Master Project, Halmstad University.
- [45] R. Guerin, C. Partridge, and S. Shenker, *IETF RFC 2212: "Specification of Guaranteed Quality of Service"*, 1997.
- [46] K. Hafner and M. Lyon, *Where Wizards Stay Up Late: The Origins Of The Internet*: Simon & Schuster, 1998.
- [47] F. Hammer, G. Kubin, T. Nordström, and P. Reichl, *Corrupted speech data considered useful*, Akademie Mont-Cenis, Herne: 1st ISCA Tutorial and Research Workshop on "Auditory Quality of Systems", 2003.
- [48] M. Handley, V. Jacobsen, and C. Perkins, *IETF RFC 4566: "SDP: Session Description Protocol"*, 2006.
- [49] Hangouts / Google-Talk. <http://www.google.com/hangouts> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [50] D. Hardman, "Noise and Voice Quality inVoIP Environments", in *Noise Reduction in Speech Applications*: CRC Press, 2002, pp. 277-304.
- [51] G. Hasslinger, "The Gilbert-Elliott Model for Packet Loss in Real Time Services on the Internet", in *Measuring, Modelling and Evaluation of Computer and Communication Systems (MMB)*, Dortmund, 2008, pp. 1-15.
- [52] K. Heidtmann, J. Kerse, T. Suchanek, B.E. Wolfinger, and M. Zaddach, "Fehlertolerante Videokommunikation über verlustbehaftete Paketvermittlungsnetze", in *12. GI-Fachtagung "Kommunikation in verteilten Systemen" (KiVS)*, Hamburg, 2001.
- [53] M.P. Hollier and A.W. Rix, "The perceptual analysis measurement system for robust end-to-end speech quality assessment", *2000 IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 2000. ICASSP '00. Proceedings*, vol. 3, pp. 1515-1518, Juni 2000.

17 Literaturverzeichnis

- [54] IEEE, Ed., 802.11-2007: *"IEEE Standard for Local and metropolitan area networks - Specific Requirements - Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications"*, 2007.
- [55] IEEE, Ed., 802.1Q: *"IEEE Standard for Local and metropolitan area networks-- Bridges and Bridged Networks"*, 2014.
- [56] Information Sciences Institute, University of Southern California, 4676 Admiralty Way, Marina del Rey, California 90291, *IETF RFC 791: "Internet Protocol - Darpa Internet Program Protocol Specification"*, 1981.
- [57] *ISO/IEC 13818-3: "Coding of Moving Pictures and Associated Audio Information"*, 2nd ed., 2009.
- [58] K. Itoh and N. Kitawaki, *Delay effect assessment taking into account of human factors in telecommunications*. Turin: 13th International Symposium on Human Factors in Telecommunications, 1990.
- [59] K. Itoh and N. Kitawaki, "Pure delay effects on speech quality in telecommunications", *Journal on Selected Areas in Communications (IEEE)*, vol. 9, no. 4, pp. 586-593, Mai 1991.
- [60] *ITU-T Delayed Contribution D.197: "Definition of Quality of Experience"*, 2004.
- [61] *ITU-T Rec. E.800: "Definitions of terms related to quality of service"*, 2008.
- [62] *ITU-T Rec. G.107 Appendix II: "Provisional impairment factor framework for wideband speech transmission"*, 2006.
- [63] *ITU-T Rec. G.107: "The E-model: a computational model for use in transmission planning"*, 2014.
- [64] *ITU-T Rec. G.113 Appendix I: "Provisional planning values for the equipment impairment factor I_e and packet-loss robustness factor B_{pl} "*, 2007.
- [65] *ITU-T Rec. G.113: "Transmission impairments due to speech processing"*, 2007.
- [66] *ITU-T Rec. G.114: "One-way transmission time"*, 2003.
- [67] *ITU-T Rec. G.711.1: "Wideband embedded extension for ITU-T G.711 pulse code modulation"*, 2012.
- [68] *ITU-T Rec. G.711: "Pulse code modulation (PCM) of voice frequencies"*, 1988.
- [69] *ITU-T Rec. G.722.2: "Wideband coding of speech at around 16 kbit/s using adaptive multi-rate wideband (AMR-WB)"*, 2002.

- [70] *ITU-T Rec. G.729: "Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear prediction (CS-ACELP)", 2012.*
- [71] *ITU-T Rec. G.821: "Error performance of an international digital connection operating at a bit rate below the primary rate and forming part of an Integrated Services Digital Network", 2002.*
- [72] *ITU-T Rec. H.323: "Packet-based multimedia communications systems", 2009.*
- [73] *ITU-T Rec. P.10/G.100 Amendment 3: "New definitions for inclusion in Recommendation ITU-T P.10/G.100", 2011.*
- [74] *ITU-T Rec. P.564: "Conformance testing for voice over IP transmission quality assessment models", 2007.*
- [75] *ITU-T Rec. P.833: "Methodology for derivation of equipment impairment factors from subjective listening-only tests", 2001.*
- [76] *ITU-T Rec. P.861: "Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs", 1996.*
- [77] *ITU-T Rec. P.862 Annex A: "Reference implementations and conformance testing for ITU-T Recs P.862, P.862.1 and P.862.2", 2005.*
- [78] *ITU-T Rec. P.862.1: "Mapping function for transforming P.862 raw result scores to MOS-LQO", 2003.*
- [79] *ITU-T Rec. P.862.2: "Wideband extension to Recommendation P.862 for the assessment of wideband telephone networks and speech codecs", 2007.*
- [80] *ITU-T Rec. P.862: "Perceptual evaluation of speech quality (PESQ): An objective method for end-to-end speech quality assessment of narrow-band telephone networks and speech codecs", 2001.*
- [81] *ITU-T Rec. P.863: "Perceptual objective listening quality assessment", 2014.*
- [82] *ITU-T Rec. Q.931: "ISDN user-network interface layer 3 specification for basic call control", 1998.*
- [83] *ITU-T Rec. Y.2001: "General overview of NGN", 2004.*
- [84] T. Janevski, *NGN Architectures, Protocols and Services*: John Wiley & Sons, 2014.
- [85] Y. Jani and G. Thomsen, "Internet telephony: going like crazy", *Spectrum (IEEE)*, vol. 37, no. 5, pp. 52-58, Mai 2000.

- [86] W. Jiang and H. Schulzrinne, *Comparison and Optimization of Packet Loss Repair Methods on VoIP Perceived Quality Under Bursty Loss: NOSSDAV '02 Proceedings of the 12th international workshop on Network and operating systems support for digital audio and video*, 2002.
- [87] M.J. Karam, A.P. Markopoulou, and F.A. Tobagi, "Assessing the Quality of Voice Communications Over Internet Backbones", *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 11, no. 5, pp. 747-760, Oktober 2003.
- [88] S. Kent and K. Seo, *IETF RFC 4301: "Security Architecture for the Internet Protocol"*, 2005.
- [89] J. Klensin, *IETF RFC 2821: "Simple Mail Transfer Protocol"*, 2001.
- [90] A. Koch, *Gesetzessammlung zum Telekommunikationsrecht der Europäischen Union (1.Auflage)*: epubli GmbH, 2014.
- [91] B. Kolbe and T. Uhl, "A new, parameterized model for QoS of VoIP", in *5. Workshop MMBnet*, Hamburg, 2009, pp. 44-47.
- [92] B. Kolbe and T. Uhl, "Messung und quantitative Bewertung der Qualität des Dienstes VoIP", *PIK - Praxis der Informationsverarbeitung und Kommunikation*, vol. 32, no. 3, pp. 183-187, Januar 2009.
- [93] C. M. Kozierek, *The TCP/IP Guide: A Comprehensive, Illustrated Internet Protocols Reference*: No Starch Press, 2005.
- [94] W. Krebber, *Sprachübertragungsqualität von Fernsprech-Handapparaten*: VDI Verlag, 1995.
- [95] J. Kurose, R. Ramjee, H. Schulzrinne, and D. Towsley, "Adaptive playout mechanisms for packetized audio applications in wide-area networks", *INFOCOM '94, Networking for Global Communications, 13th Proceedings IEEE*, pp. 680-688, Juni 1994.
- [96] A. Lazzez, "Securing VoIP Systems: A QoS-Oriented Approach", *International Journal of Computer Science Issues*, vol. 11, no. 2, pp. 99-108, November 2014.
- [97] M.J. Lipka, *An Analysis of Error Handling Techniques in Voice over IP*, Perth: 21st Annual Computer Science Conference, 2005.
- [98] J.W. McGowan, "Burst ratio: a measure of bursty loss on packet-based networks", US Patent 6,931,017, 2005.
- [99] P. Mockapetris, *IETF RFC 1034: "Domain Names – Concepts and facilities"*, 1987.

17 Literaturverzeichnis

- [100] M. Mockapetris, *IETF RFC 1534: "Domain Names – Implementation and specification"*, 1987.
- [101] S. Möller, A. Raake, I. Tucker, and M. Wältermann, "Extension of the E-model towards super-wideband speech transmission", in *Acoustics Speech and Signal Processing (ICASSP)*, Dallas, 2010, pp. 4654-4657.
- [102] S. Möller and N.G. Ward, *Quality of Telephone-Based Spoken Dialogue Systems*: Springer, 2010.
- [103] Nextragen Homepage. <http://www.nextragen.de> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [104] Nextragen GmbH, *White Paper: "Einsatz von PESQ und POLQA in VoIP-Umgebungen: Ein Vergleich"*, 2011.
- [105] H.Q. Ngo, J. Srivastava, and S. Varadarajan, "Error Spreading: A Perception-Driven Approach to Handling Error in Continuous Media Streaming", *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, pp. 139-152, Februar 2002.
- [106] K. Nowicki, S. Paulsen, and T. Uhl, "Influence of the Jitter Buffer on the Quality of Service VoIP", in *International Congress on Ultra Modern Telecommunications and Control Systems (ICUMT)*, Budapest, 2011, pp. 1-5.
- [107] K. Nowicki, S. Paulsen, and T. Uhl, "New Tool for Examining QoS in the VToIP Service", *Journal of Telecommunications and Information Technology*, no. 1, p. 1652, 2014.
- [108] Opticom. <http://www.opticom.de> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [109] D. Pascal, *Comparative performances of two subjective methods for improving the fidelity of speech signals*, Paris: 84th Audio Engineering Society (AES) Convention, 1988.
- [110] S. Paulsen and T. Uhl, "Adjustments for QoS of VoIP in the E-Model", in *World Telecommunications Congress (WTC)*, Wien, 2010, pp. 69-74.
- [111] S. Paulsen and T. Uhl, "Das neue, parametrisierte A-Modell für QoS beim Dienst VoIP", *PIK - Praxis Informationsverarbeitung und Kommunikation*, vol. 34, no. 1, pp. 23-30, 2011.
- [112] S. Paulsen and T. Uhl, "Numerisches Tool zur Untersuchung der QoS bei VoIP", in *MMBnet - Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen*, Hamburg, 2013, pp. 85-90.

17 Literaturverzeichnis

- [113] S. Paulsen and T. Uhl, "PESQ-Algorithm in the Narrowband and Wideband VoIP Environment: Comparison Study", in *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki (KSTiT)*, Breslau, 2010, pp. 1288-1298.
- [114] S. Paulsen and T. Uhl, "Quantifying the Suitability of Reference Signals for the PESQ Algorithm", in *Communication Theory, Reliability, and Quality of Service (CTRQ)*, Athen, 2010, pp. 110-115.
- [115] S. Paulsen and T. Uhl, "The Codec G.711.1 in a VoIP Environment", in *1st European Teletraffic Seminar (ETS)*, Posen, 2011, pp. 93-97.
- [116] S. Paulsen and T. Uhl, "The new, parametrised VS Model for Determining the Quality of Video Streams in the Video-telephony Service", in *Krajowe Sympozjum Telekomunikacji i Teleinformatyki (KSTiT)*, Warschau, 2012, pp. 1155-1166.
- [117] S. Paulsen and T. Uhl, "Umgang mit Verzögerungen in QoS-Messmethoden beim Dienst VoIP", in *MMBnet - Leistungs-, Zuverlässigkeits- und Verlässlichkeitsbewertung von Kommunikationsnetzen und verteilten Systemen*, Hamburg, 2011, pp. 61-66.
- [118] PJSIP Homepage. <http://www.pjsip.org> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [119] J. Postel, *IETF RFC 768: "User Datagram Protocol"*, 1980.
- [120] J. Postel, *IETF RFC 801: "NCP/TCP Transition Plan"*, 1981.
- [121] A. Raake, *Speech Quality of VoIP: Assessment and Prediction*: John Wiley & Sons, 2006.
- [122] R. Raissi, *The Theory Behind Mp3*, Technical Report, MP3' Tech, 2002.
- [123] E. Rescorla, *IETF RFC 2818: "HTTP Over TLS"*, 2000.
- [124] *Richtlinie 2009/136/EG des Europäischen Parlaments und des Rates*, 2009.
- [125] J. Rosenberg and H. Schulzrinne, *IETF RFC 2733: "An RTP Payload Format for Generic Forward Error Correction"*, 1999.
- [126] H. Sathu and M.A. Shah, "Performance Comparison of VoIP Codecs on Multiple Operating Systems using IPv4 and IPv6", *International Journal of e-Education*, vol. 2, no. 2, 2012.
- [127] Skype Homepage. <http://www.skype.com> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [128] R. Swale, *Voice Over IP: Systems and Solutions*: Institution of Engineering & Technology, 2002.

- [129] SwissQual Homepage. <http://www.swissqual.com> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [130] A.S. Tanenbaum, *Computer Networks*: Prentice Hall, 5.Auflage, 2012.
- [131] Teamspeak Homepage. <http://www.teamspeak.de> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [132] TNO Homepage. <http://www.tno.nl> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [133] S. Valaisathien and V. Vanijja, "Objective Non-intrusive Conversational VoIP Quality Prediction using Data mining methods", in: *Information Science and Applications*, Springer, 2015, pp. 135-142.
- [134] M. Vilermo and Y. Wang, *A Compressed Domain Beat Detector Using MP3 Audio Bitstreams*: MULTIMEDIA '01 Proceedings of the 9th ACM international conference on Multimedia, 2001.
- [135] VQmon Algorithm Description. https://www.telchemy.com/accuracy_perf.php (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [136] Z. Wang, *Internet QoS: Architectures and Mechanisms for Quality of Service*: Morgan Kaufman Publ Inc, 2001.
- [137] WANulator - The WAN/Network Simulator Homepage. <http://wanulator.de> (letzter Zugriff: Oktober 2015).
- [138] M. Weik, *Computer Science and Communications Dictionary*: Springer, 2001.
- [139] M. Werner, *Nachrichtentechnik - Eine Einführung für alle Studiengänge*: Vieweg+Teubner Verlag, 7.Auflage, 2010.
- [140] B.E. Wolfinger, "On the Potential of FEC Algorithms in Building Fault-tolerant Distributed Applications to Support High QoS Video Communication", in *ACM Symp. on Principles of Distributed Computing (PODC)*, Santa Barbara, 1997.
- [141] J. Wroclawski, *IETF RFC 2211: "Specification of the Controlled-Load Network Element Service"*, 1997.
- [142] K. Zeilenga, *IETF RFC 4510: "Lightweight Directory Access Protocol (LDAP): Technical Specification Road Map"*, 2006.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg, den 01.12.2015