

Effiziente Dienstqualitätsunterstützung für IP Telefonie durch selektive Paketmarkierung

Henning Sanneck, Nguyen Tuong Long Le, Georg Carle
 {sanneck,le,carle}@fokus.gmd.de
 GMD Fokus, Kaiserin-Augusta-Allee 31, D-10589 Berlin

Zusammenfassung—Mit der wachsenden Bedeutung des Internets wurde Dienstqualitätsunterstützung für multimediale Echtzeitdienste über paket-vermittelnde Netze zu einem wichtigen Forschungsgebiet. Dienstqualitätsunterstützung umfasst Ressourcenreservierung gemäß dem “Internet Integrated Services” Modell, womit sich feste Grenzen für Paketverluste und Verzögerung garantieren lassen, hierzu jedoch Statusinformationen bezüglich jedes Datenstroms an jedem Netzwerkelement benötigt werden. Hieraus ergeben sich Skalierbarkeitsprobleme, die alternative Ansätze zur Dienstqualitätsunterstützung erforderlich machen. Eine weitere Forschungsrichtung (“Differentiated Services”) stellt Mechanismen zur Markierung und differenzierten Behandlung von Paketen zur Verfügung. Da hierbei Statusinformationen und die Durchsetzung bestimmter Dienstqualitäten nur für aggregierten Datenströme erforderlich sind, wird eine bessere Skalierbarkeit gewährleistet.

Zusätzlich zur Möglichkeit der Behandlung von aggregierten Datenströmen hat eine Dienstqualitätsunterstützung per Paket auch die wünschenswerte Eigenschaft, dass eine Anwendung die eigene Dienstqualität per Paket (und somit per ADU - Application Data Unit) kontrollieren kann. Wir untersuchen das Potenzial dieser Eigenschaft für Sprachübertragung, da neuere Arbeiten gezeigt haben, dass bestimmte Segmente eines Sprachsignals essentiell für die Sprachqualität sind, während andere, im Fall eines Paketverlusts, relativ gut am Empfänger aus schon angekommenen Daten extrapoliert werden können. Das trifft insbesondere für moderne segment-basierte (“frame-based”) Sprachkodierer (ITU-T G.729 und G.723.1) zu, die einen internen Fehlerverschleierungsmechanismus (“loss concealment”) besitzen. Somit können Sender weniger konservativ in ihren Anforderungen bezüglich der Qualität des Netzwerkdienstes sein, bzw. die Anzahl der gleichzeitig akzeptierbaren Verbindungen kann gesteigert werden.

In dieser Arbeit analysieren wir zunächst den Fehlerverschleierungsmechanismus des G.729 Dekoders. Darauf aufbauend entwickeln wir Mechanismen, die selektiv Pakete auf eine höhere Netzwerkpriorität markieren und zwar abhängig von den Sprachsignaleigenschaften und der somit zu erwartenden Verschleierungsqualität. Mit objektiven Methoden zur Bestimmung der Sprachqualität (ITU-T P.861A und EMBSD) lässt sich zeigen, dass bei Markierung bzw. Bevorzugung von ca. der Hälfte der Pakete eines Datenstroms nahezu dieselbe Sprachqualität erreicht wer-

den kann wie bei vollständiger Markierung dieses Datenstroms. Die verschiedenen Paketmarkierungen werden innerhalb des Netzwerkes z.B. mit der “Differentiated Services” Architektur in unterschiedliche Behandlung der Pakete umgesetzt.

I. EINFÜHRUNG

In den letzten Jahren ist das Interesse in der Öffentlichkeit sowie in der Forschungswelt an Internet-Sprachübertragung (“Voice over IP”, “Internet Telephony”) sprunghaft gestiegen. IP Telefonie hat das Potenzial, zusammen mit anderen Internet Anwendungen interaktive multimediale Dienste zu ermöglichen, die nicht (oder nur sehr schwer) im traditionellen Telefonnetz zu realisieren wären. Ausserdem kann mittlerweile die rechenaufwendige, hochkomprimierende Sprachkodierung mit allgemein verfügbarer Hardware in den Endsystemen beim Benutzer durchgeführt werden. Beispiele für solche Sprachkodierer sind die segment-orientierten (“frame-based”) Kodierer G.723.1 ([1]) und G.729 ([2]), die sehr attraktiv für den Einsatz in IP-Netzen sind, da sie die übliche Telefonqualität bei wesentlich niedrigeren Datenraten (5.3/6.3 kBit/s bzw. 8 kBit/s) als mit konventionelle PCM-Kodierung (64 kBit/s) ermöglichen. Somit können die Anforderungen an die Netzwerkressourcen stark reduziert werden.

Paket-vermittelnde Netze ohne Mechanismen zur Ressourcenreservierung wie das heutige Internet basieren auf dem “Best Effort”-Prinzip, das keine Garantien über zu erwartenden Paketverluste, bzw. Paketverzögerungen zulässt. Sprachdatenpakete können verworfen werden, wenn Router überlastet sind oder wenn sie zu spät den Empfänger erreichen (d.h. der Abspielzeitpunkt der Audiodaten ist schon vorüber). Zusätzlich (unter Berücksichtigung der rückwärtsadaptiven Sprachkodierungsalgorithmen der G.723.1 und G.729 Quellenkodierer) resultieren Paketverluste in einer Störung der Synchronisierung zwischen Koder und Dekoder. Somit treten Signalstörungen nicht nur in dem Zeitabschnitt auf, der durch das verlorengegangene Paket repräsentiert wird, sondern pflanzen sich in die folgenden Segmente solange fort, bis der Dekoder

schliesslich wieder synchron zum Koder läuft. Um dieses Problem abzumildern verfügen die beiden genannten Kodierer über einen internen (d.h. für das Kodierverfahren spezifischen) Fehlerverschleierungsalgorithmus.

In [3] haben wir ein Verfahren zur Spracheigenschaftsbasierten Vorwärtsfehlerkorrektur (Speech Property-Based Forward Error Correction, SPB-FEC) vorgestellt. Dort werden essentielle Teile des Sprachsignals durch Vorwärtsfehlerkorrektur (FEC) geschützt, wohingegen Verluste, die andere Teile des Signals betreffen, durch die interne Fehlerverschleierung behandelt werden. Dieses Verfahren ermöglicht bei gleichbleibender Sprachqualität die notwendigen zusätzlichen Daten zur Vorwärtsfehlerkorrektur zu reduzieren. Jedoch kommen auch hier die allgemeinen Probleme von FEC-Verfahren zum Tragen: die Übertragung redundanter Daten erhöht die allgemeine Netzwerklast und fördert somit das Auftreten von Stausituationen. Darüber hinaus können solche Verfahren die Wahrscheinlichkeit sehr wichtige Pakete zu verlieren nur reduzieren; sie können sie aber nicht nahezu ausschliessen. Ausserdem sind, wenn innerhalb eines Zeitintervalls keine Pakete verlorengehen, sämtliche redundanten Daten nutzlos, die innerhalb dieses Intervalls übertragen wurden.

Deshalb wenden wir in dieser Arbeit das Konzept des selektiven Schutzes einiger Pakete aufgrund von Anwendungsbedürfnissen auf die Bevorzugung von Paketen (durch Priorisierung) innerhalb des Netzwerkes an.

II. G.729 FEHLERVERSCHLEIERUNG

Der G.729 Sprachkodierer arbeitet nach dem CS-ACELP (Conjugate Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction) Prinzip bei einer Datenrate von 8 kbit/s. Das Eingabeformat ist lineare PCM (16 bit) abgetastet mit 8 kHz. Das Kodierverfahren beruht auf einer Modellierung der menschlichen Spracherzeugung. In diesem Modell werden der Hals und Mund durch einen linearen Filter (Synthesefilter) dargestellt. Sprachsignale werden produziert, indem dieses Filter durch einen Anregungsvektor angesteuert wird. Beim G.729 Koder dauert ein Sprachsegment¹ 10ms korrespondierend zu 80 PCM Abtastwerten. Für jedes Segment analysiert der G.729 Koder die Eingabedaten und extrahiert die CELP (Code Excited Linear Prediction) Modellparameter wie Filterkoeffizienten der linearen Prädiktion und Anregungsvektoren. Der Ansatz zur Bestimmung der Filterkoeffizienten wird als "Analyse durch Synthese" bezeichnet. Der Koder durchsucht den Bereich möglicher Parameter; bei jeder Suche wird eine Dekodierung durchgeführt und der dekodierte Signalabschnitt

¹Wir verwenden den Begriff "Segment" ("frame") für die Einheit des Kodier-/Dekodierprozesses und "Paket" für die Einheit der Übertragung. Ein Paket beinhaltet üblicherweise mehrere Segmente.

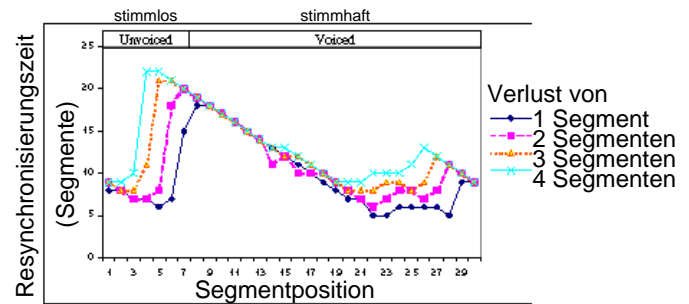


Abbildung 1. Resynchronisierungszeit (in Segmenten) des G.729 Dekoders nach Verlust von k aufeinanderfolgenden Segmenten ($k \in [1, 4]$) in Abhängigkeit der Segmentposition.

mit dem originalen Signalabschnitt verglichen. Der Parametersatz, bei dem sich originales und synthetisiertes Signal am ähnlichsten sind, wird verwendet, kodiert und zum Empfänger übertragen. Beim Empfänger wird dieser Parametersatz verwendet, um das ursprüngliche Sprachsignal wieder herzustellen.

In [4] untersuchte Rosenberg das Verhalten des G.729 Dekoders in Bezug auf Segmentverluste mit Hilfe der benötigten Resynchronisierungszeit zwischen Koder und Dekoder. Als Ergebnis wurde festgehalten, dass die Energie des Fehlersignals bei einem Verlust von zwei aufeinanderfolgenden Segmenten stark ansteigt und die subjektive Sprachqualität stark fällt. Bei Verlust von weiteren Segmenten findet eine weitere, aber nicht so drastische, Verschlechterung der Sprachqualität statt. Daraus wurde gefolgert, dass nur isolierte Segmentverluste gut durch den G.729 Dekoder verschleiert werden können.

Wir führen nun folgendes Experiment durch: die Resynchronisierungszeit zwischen Dekoder und Koder nach Verlust von k aufeinanderfolgenden Segmenten wird gemessen. Eine Resynchronisierung wird angenommen, wenn die Energie des Fehlersignals unterhalb ein Prozent der Energie des dekodierten Signals ohne Segmentverluste fällt (das ist äquivalent zu einer Schwelle des Signal-Rausch-Verhältnisses (SNR) von $20dB$). Die Fehlersignalenergie (und somit das SNR) wird pro Segment berechnet. Abbildung 1 zeigt die Resynchronisierungszeit (ausgedrückt in der Anzahl benötigter Segmente zur Überschreitung der Schwelle) in Abhängigkeit der Position des Verlustes für verschiedene Werte von k . Das verwendete Sprachbeispiel stammt von einem männlichen Sprecher, wobei innerhalb des achten Segments ein Übergang von stimmloser zu stimmhafter Sprache (unvoiced/voiced: uv) stattfindet.

Aus Abbildung 1 ersieht man, dass die Position eines Segmentverlustes einen großen Einfluss auf die Ver-

schlechterung des Signals hat², wohingegen die Verschlechterung nicht sehr von der Anzahl der an dieser Stelle verlorengegangenen Segmente k abhängig ist. Der Verlust von stimmlosen Abschnitten scheint nur geringe Auswirkungen zu haben. Verluste von stimmhaften Segmenten haben einen grösseren Einfluss auf die Signalqualität und der Dekoder braucht somit mehr Zeit, um sich zu resynchronisieren. Jedoch verursacht der Verlust von Segmenten an einem stimmlos/stimmhaft-Übergang eine extreme Verschlechterung des Signals. Das Experiment wurde mit ähnlichen Ergebnissen für verschiedenes Sprachmaterial (von männlichen und weiblichen Sprechern) durchgeführt.

Unter Berücksichtigung des benutzten Kodiervorgangs kann der obige Effekt wie folgt erklärt werden: Da stimmhafte Laute eine höhere Signalenergie haben als stimmlose führt der Verlust von stimmhaften Lauten entsprechend zu einer grösseren Verschlechterung. Allerdings kann der Dekoder durch den periodischen Signalverlauf bei stimmhaften Lauten den Fehler relativ gut verschleiern, sobald er über genügend Statusinformationen verfügt. Der Dekoder versagt bei der Verschleierung von stimmhaften Lauten unmittelbar nach einem stimmlos / stimmhaft-Übergang, da er diese Verschleierung mit Filterkoeffizienten und Anregungsvektoren für einen stimmlosen Laut durchführt. Zusätzlich ist es ausserdem so, dass der G.729 Koder für die Prädiktion der Line Spectral Pairs (LSP) einen Tiefpassfilter benutzt und nur die Differenz zwischen den echten und den Prädiktor-Werten überträgt. Das führt dazu, dass eine sehr lange Zeit benötigt wird den Dekoder zu resynchronisieren, sobald er einmal nicht in der Lage war einen angemessenen Filter der linearen Prädiktion zu berechnen.

III. SPRACHEIGENSCHAFTSBASIERTE SELEKTIVE PAKETMARKIERUNG

Das Ergebnis über die Fähigkeit des G.729 Dekoders Paketverluste zu verschleiern wird nun verwendet um einen Algorithmus zur selektiven Paketmarkierung zu entwickeln: Speech Property-Based Selective Packet Marking (SPB-MARK, [5]). Das SPB-MARK-Verfahren konzentriert die Pakete mit höherer Priorität auf die Sprachsegmente, die essentiell für die Sprachsignalqualität sind und verlässt sich auf die Fehlerverschleierung des Dekoders für andere Signalabschnitte.

Abbildung 2 zeigt den einfachen (Pseudo Code) Algorithmus, der verwendet wird, um einen stimmlos /

²Obwohl SNR -Werte oft nicht gut mit subjektiver Sprachqualität korrelieren weisen die starken Unterschiede der SNR -basierten Resynchronisierungszeitmessung auf einen signifikanten Einfluss auf die Qualität hin.

```

protect = 0
foreach (k frames)
    classify = analysis(k frames)
    if (protect > 0)
        if (classify == unvoiced)
            protect = 0
            send(k frames, "0")
        else
            send(k frames, "+1")
            protect = protect - k
        endif
    else
        if (classify == uv_transition)
            send(k frames, "+1")
            protect = N - k
        else
            send(k frames, "0")
        endif
    endif
endfor

```

Abbildung 2. SPB-MARK Pseudo Code

stimmhaft-Übergang (“*uv* transition”) zu erkennen und die stimmhaften Segmente nach diesem Übergang besonders zu schützen. Die Prozedur *analysis()* wird eingesetzt, um einen Block aus k Segmenten als stimmhaft, stimmlos oder *uv* zu klassifizieren. Die Prozedur *send()* sendet einen Block von k Segmenten als ein Paket mit der entsprechenden Netzwerkpriorität (entweder “+1” oder “0”). N ist ein vordefinierter Wert, der festlegt, wieviele Abschnitte bei Beginn eines stimmhaften Signals geschützt werden. Unsere Simulationen haben gezeigt, dass der Bereich von 10 bis 20 für N angemessen ist. In der Simulation, die in Abschnitt IV vorgestellt wird, haben wir $k = 2$ als einen typischen Wert für interaktive Sprachübertragung im Internet (20ms Audiodaten pro Paket) angenommen. Ein höherer k -Wert würde den relativen Paket-Headeroverhead reduzieren, gleichzeitig aber auch die Verzögerung durch die Paketisierung erhöhen sowie die Klassifizierung am Sender und die Verschleierung am Empfänger im Falle eines Paketverlustes schwieriger machen (da die Länge der Lücke im Signal grösser wird).

IV. EVALUIERUNG DES SPRACHEIGENSCHAFTSBASIERTEN MARKIERUNGSVERFAHRENS

Wir verwenden ein einfaches Markov-Modell mit einem Zustand (Bernoulli-Modell), um das Verhalten des Netzwerks in Bezug auf jede Prioritätsklasse zu beschrei-

ben. “Best effort” Pakete (gekennzeichnet durch “0” in Abbildung 3) werden mit einer Wahrscheinlichkeit p (“NO MARK” in Abbildung 3) verworfen. Ist ein Datenstrom vollständig geschützt (alle Pakete sind als “+1” markiert) dann ist die Wahrscheinlichkeit des Verwerfens gleich Null. Pakete eines Datenstromes, der das SPB-MARK-Verfahren benutzt, sehen entweder keinen Verlust (“+1”, Abb. 2) oder die Verlustwahrscheinlichkeit p (“0”, Abb. 2). Zum Vergleich führen wir einen Markierungsalgorithmus “ALT-MARK” ein, der Pakete alternierend als “0” bzw. “+1” markiert. Das resultierende Gesamtsystem könnte nun auch mit einem Markov-Modell beschrieben werden (z.B. ein Gilbert-Modell mit zwei Zuständen). Da jedoch die verschiedenen Markierungsmechanismen einige Parameter dieses Modells verändern³, wird nur der interne Systemparameter p zum Vergleich der verschiedenen Ansätze verwendet. Schliesslich werden auch Resultate für Mechanismen, die wir als “differentielles” Markieren bezeichnen, vorgestellt. Differentiell bedeutet hier, dass jedes Paket, welches mit einer höheren Priorität versendet wird, durch ein Paket mit einer Priorität (“-1”) niedriger als “best effort” (“0”) kompensiert werden muss. Wir vergleichen zwei Varianten dieses Ansatzes: bei der ersten Methode (“ALT-DIFFMARK”) werden Pakete alternierend als “-1”, bzw. “+1” markiert. Die zweite Variante (“SPB-DIFFMARK”) verwendet auch den SPB Markierungsalgorithmus, jedoch wird nach einer Folge von “+1”-Paketen unmittelbar eine entsprechend lange Folge von “-1”-Paketen gesendet⁴. Die Wahrscheinlichkeit des Verwerfens eines “-1”-Paketes ist $2p$. Somit wird die Verlustwahrscheinlichkeit gesehen über Zeitintervalle, die lang im Vergleich zu der Dauer einer “+1”-Folge sind, sich nicht von der des “best effort”-Datenverkehrs unterscheiden. Warteschlangenkontrollalgorithmen die solch ein Netzwerkverhalten realisieren, werden in [6] beschrieben.

Es war sinnvoll eine segment-orientierte SNR -Berechnung ([7]) in Abschnitt II zu verwenden, da dort ein System (G.729 ohne zusätzlichen Schutz) unter verschiedenen Verlustsituationen untersucht wurde. Nun jedoch werden wir mehrere Systeme (G.729 mit permanenten und verschiedenen temporären Schutzmechanismen) unter gleichen Verlustsituationen untersuchen. Das System mit permanenter Priorisierung wird das Signal ohne jede Verschlechterung

³Bei der “ALT-MARK”-Methode ist z.B. die bedingte Verlustwahrscheinlichkeit gleich Null.

⁴Eine Variable, die die Anzahl der noch zu sendenden “-1”-Pakete angibt, wird verwendet für den Fall, dass der SPB-Algorithmus die nächste “+1”-Folge bestimmt, bevor alle zur Kompensation nötigen “-1”-Pakete gesendet wurden.

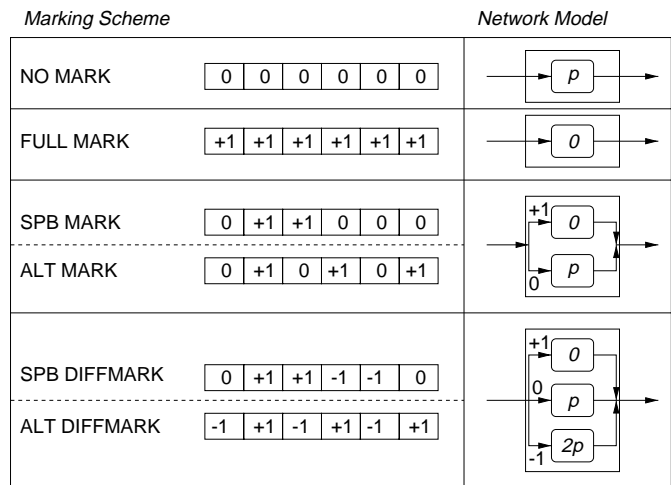


Abbildung 3. Markierungsmethoden / Netzwerkmodelle.

reproduzieren (unter der Annahme, dass kein Verlust eines Paketes mit hoher Priorität auftritt) wohingegen die anderen Systeme teilweise den internen Fehlerverschleierungsmechanismus des G.729 Dekoders einsetzen. Dieser ist in der Lage eine geringe Verschlechterung des Signals unter den in Abschnitt II genannten Voraussetzungen zu gewährleisten. Allerdings kann die Relation der resultierenden Sprachqualitäten nicht angemessen durch einen SNR -Wert dargestellt werden. Zum Beispiel wird die Sprachqualität durch das graduelle Absenken der Verstärkungskoeffizienten des letzten korrekt empfangenen Segmentes bei der Fehlerverschleierung verbessert. Dieses bringt aber eine starke mathematische Abweichung des wiederhergestellten Signals vom Originalsignal mit sich.

Im Gegensatz zu SNR -Ansätzen versuchen neuartige Methoden der objektiven Sprachqualitätsmessung durch Modellierung des menschlichen Gehörs die subjektive Qualität zu schätzen. In unserer Evaluierung verwenden wir zwei objektive Qualitätsmessmethoden: “Enhanced Modified Bark Spectral Distortion” (EMBSD, [8]) und “Measuring Normalizing Blocks” (MNB, [9]), welches im Appendix II des ITU-T Standards P.861 ([10]) beschrieben wird. In der Literatur wird von einer sehr hohen Korrelation dieser objektiven Qualitätsmaße mit subjektiven Tests gesprochen. Die objektiven Messwerte können mittels einfacher Transformationen in mit den Ergebniswerten solcher Tests (MOS - Mean Opinion Score) vergleichbare Werte überführt werden. Die Messmethoden gelten als für den Einsatz in Bezug auf durch Bitfehler und Segmentverluste gestörte Sprache geeignet ([8], [10]).

Bei MNB wird der Unterschied in der Wahrnehmung zwischen dem Test- und dem Referenzsignal in verschiedenen Zeit- und Frequenzabschnitten gemessen. Der Wahr-

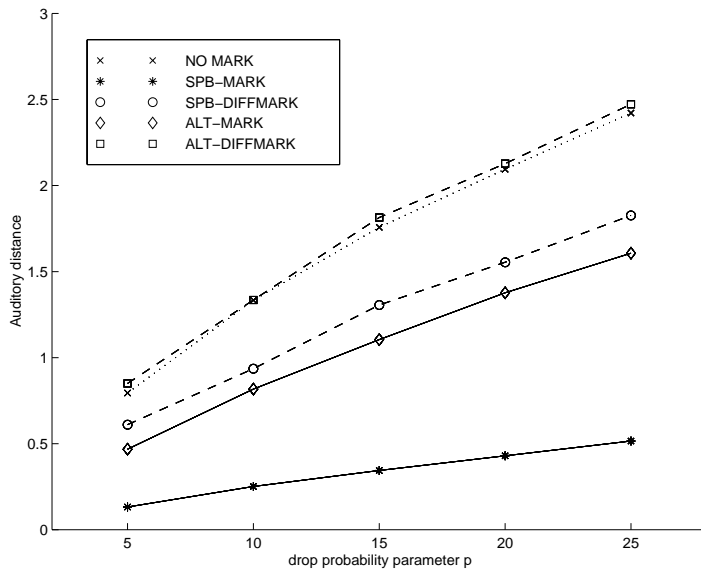


Abbildung 4. Wahrnehmungsunterschied (“Auditory Distance”) der Markierungsmethoden evaluiert durch MNB.

Wahrnehmungsunterschied, als “Auditory Distance (AD)” bezeichnet, zwischen den genannten Signalen ist eine Linearkombination dieser Messergebnisse, wobei die Gewichtungsfaktoren die Eigenschaften des Gehörs modellieren. Je höher der AD-Wert, desto unterschiedlicher ist die Wahrnehmung der zwei Signale und umso schlechter ist die Sprachqualität des Testsignals. Abbildung 4 zeigt die “Auditory Distance”⁵.

Die Ergebnisse für die ungeschützten Datenströme (“NO MARK”) zeigen, dass mit steigendem p im Netzwerkmodell (und somit steigender Paketverlustrate und Verlustkorrelation) der AD-Wert monoton ansteigt, d.h. die Sprachqualität des dekodierten Signals sinkt. Wenn die “NO MARK”-Resultate mit den Kurven der Markierungsmethoden verglichen werden, sieht man, dass das dekodierte Sprachsignal ohne Markierung den höchsten “Auditory Distance”-Wert und somit die schlechteste Sprachqualität hat. Die “ALT-MARK”-Methode (50% der Pakete sind markiert) verbessert die Qualität. Der AD-Wert des SPB-MARK Verfahrens (mit 40,4% markierten Paketen⁶) ist erheblich geringer und liegt sogar nahe der Qualität des verlustfreien dekodierten Signals ($AD = 0$). Dies zeigt auch, dass durch den Schutz des gesamten Datenstroms also nur eine geringe Verbesserung erzielt wird. Das differentielle Markierungsverfahren “SPB-DIFFMARK” lie-

⁵Für das EMBSD Verfahren wurden ähnliche Ergebnisse erzielt, die in der erweiterten Version dieser Arbeit ([11]) enthalten sind.

⁶Wir haben mit anderem Sprachmaterial ähnliche Ergebnisse erzielt.

fert eine verbesserte Sprachqualität, obwohl nur ein Netzwerkdienst verwendet wird, der über längere Zeiträume gesehen mit einem “best effort”-Dienst gleichzusetzen ist. Die “ALT-DIFFMARK”-Methode unterscheidet sich hingegen nicht von dem “best effort”-Fall. Diese Ergebnisse bestätigen den Ansatz der spracheigenschaftenbasierten Markierung, der nicht alle Pakete mit einer höheren Priorität versieht, sondern eine kleinere Anzahl von Segmenten, die essentiell für die Sprachqualität sind, schützt.

V. SCHLUSSBEMERKUNGEN

In dieser Arbeit wurden die Auswirkungen von Segmentverlusten in verschiedenen Bereichen eines Sprachsignals auf die Sprachqualität untersucht: der Verlust von stimmhaften Segmenten nach einem stimmlos / stimmhaft-Übergang führt zu einer erheblichen Beeinträchtigung der Sprachqualität, wohingegen der Verlust von anderen Segmenten relativ gut durch den Fehlerverschleierungsmechanismus des G.729 Dekoders behandelt werden kann. Daraufhin wurde ein spracheigenschaftenbasiertes Paketmarkierungsverfahren (SPB-MARK) entwickelt, das einerseits stimmhafte Segmente, die essentiell für die Sprachqualität sind, durch Markierung mit einer höheren Priorität schützt und andererseits die Fehlerverschleierung des Dekoders für nicht markierte Segmente einsetzt. Die Evaluierung von Simulationen mit einem einfachen Netzwerkmodell unter Verwendung von objektiven Sprachqualitätsmessmethoden zeigte, dass das SPB-MARK-Verfahren nahezu das gleiche Ergebnis wie bei einem vollständigen Schutz des Datenstroms liefert, bei jedoch deutlich reduzierter Anzahl von Paketen mit höherer Priorität. Die “differentielle” Markierungsmethode SPB-DIFFMARK, bei der nur eine Kontrolle über die Verlustmuster anstatt der Verlustraten stattfindet (d.h. der Netzwerkdienst ist über längere Zeiträume gesehen einem “best effort”-Dienst gleichzusetzen), erzielt ein deutlich besseres Ergebnis als der konventionelle “best effort”-Dienst. Alle vorgestellten Markierungsverfahren können innerhalb der IETF “Differentiated Services”-Architektur ([12]) realisiert werden.

LITERATURVERZEICHNIS

- [1] International Telecommunications Union, “Dual rate speech coder for multimedia communications transmitting at 5.3 and 6.3 kbit/s,” Recommendation G.723.1, ITU-T, March 1996.
- [2] International Telecommunications Union, “Coding of speech at 8 kbit/s using conjugate-structure algebraic-code-excited linear-prediction (CS-ACELP),” Recommendation G.729, ITU-T, March 1996.
- [3] H. Sanneck and N. Le, “Speech property-based FEC for Internet Telephony applications,” in *Proceedings of the SPIE/ACM SIGMM Multimedia Computing and Networking Conference 2000 (MMCN 2000)*, San Jose, CA, January 2000, pp. 38–

- 51, <ftp://ftp.fokus.gmd.de/pub/glone/papers/Sann0001:Speech-FEC.ps.gz>.
- [4] J. Rosenberg, "G. 729 error recovery for Internet Telephony," Project report, Columbia University, 1997.
 - [5] H. Sanneck, N. Le, and A. Wolisz, "Efficient QoS support for Voice-over-IP applications using selective packet marking," in *Special Session on Error Control Techniques for Real-time Delivery of Multimedia data, First International Workshop on Intelligent Multimedia Computing (IMMCN 2000)*, Atlantic City, NJ, February 2000, pp. 553–556, <ftp://ftp.fokus.gmd.de/pub/glone/papers/Sann0002:VoIP-marking.ps.gz>.
 - [6] H. Sanneck and M. Zander, "A comparison of queue management algorithms for intra-flow loss control," in *Proceedings ICC 2000*, New Orleans, LA, June 2000, <ftp://ftp.fokus.gmd.de/pub/glone/papers/Sann0006:Intra-Flow-Comparison.ps.gz>.
 - [7] J.R. Deller, *Discrete-Time Processing of Speech Signals*, Prentice Hall, Englewood Cliffs 1993.
 - [8] W. Yang, K. Krishnamachari, and R. Yantorno, "Improvement of the MBSD objective speech quality measure using TDMA data," in *submitted to IEEE Speech Coding Workshop*, 1999.
 - [9] S. Voran, "Estimation of perceived speech quality using measuring normalizing blocks," in *Proceedings IEEE Speech Coding Workshop 1997*, Pocono Manor, 1997, pp. 83–84.
 - [10] International Telecommunications Union, "Objective quality measurement of telephone-band (300-3400 Hz) speech codecs," Recommendation P.861, ITU-T, February 1998.
 - [11] H. Sanneck, N. Le, G. Carle, and A. Wolisz, "Efficient QoS support for Voice-over-IP applications using selective packet marking," Technical Report, GMD Fokus, Berlin, Germany, February 2000.
 - [12] S. Blake, D. Black, M. Carlson, E. Davies, Z. Wang, and W. Weiss, "An Architecture for Differentiated Services," RFC 2475, IETF, December 1998, <ftp://ftp.ietf.org/rfc/rfc2475.txt>.