

# Untersuchungen eines Verfahrens zur Signalkonditionierung an Hörgeschädigten

S. WARTINI, K. SCHORN\*, B. ARNOLD\*, Fachgebiet Akustische Kommunikation, TU München, \*Universitäts-HNO-Klinik, LMU München

Die Signalverarbeitung in Hörgeräten soll die Beeinträchtigung des Hörvermögens von Gehörgeschädigten ausgleichen. Die in der Regel notwendige Verstärkung des Signals erfordert eine Dynamikreduktion, um eine weitere Schädigung des Gehörs durch die entstehenden Spitzenpegel zu vermeiden. Bei herkömmlichen Verfahren wird eine Steuerung der Signalverstärkung aus dem mittleren Amplitudenverlauf des Gesamtsignals oder einzelner Teilbänder abgeleitet. Das Teiltonzeitmuster (TTZM) hingegen stellt eine gehörgerechte Repräsentation des Signals dar, die aus einer Spektraltransformation mit anschließender Konturierung entsteht [2, 3]. Es wurden bereits verschiedene Bearbeitungsverfahren für TTZM zur Dynamikreduktion vorgestellt und mit normalhörenden Versuchspersonen überprüft [4]. In der vorliegenden Arbeit werden zwei Verfahren zur Dynamikreduktion kombiniert und mit gehörgeschädigten Versuchspersonen untersucht.

## 1. Bearbeitungsverfahren

Die Bearbeitung der Pegel einzelner Teiltöne im TTZM erlaubt es, trägeheitslos auf deren Veränderungen bzw. auf das Auftauchen neuer Teiltöne zu reagieren. Gleichzeitig wird die Verwendung nichtlinearer Kennlinien möglich, da keine zusätzlichen Teiltöne (Verzerrungsprodukte) durch nichtlineare Verzerrungen entstehen können. Das verwendete Bearbeitungsverfahren, im folgenden mit SQRT bezeichnet, verändert die Teiltonpegel gemäß einer Wurzelkennlinie:  $L_A = L_{max} \cdot \sqrt{L_E/L_{E_{max}}}$  ( $L_A$  veränderter Teiltonpegel,  $L_{max}$  Begrenzung der bearbeiteten Teiltonpegel,  $L_E$  ursprünglicher Teiltonpegel,  $L_{E_{max}}$  Bezugswert für  $L_E$ ). Dieses Verfahren erzielt bei akzeptabler Wiedergabequalität eine hohe Dynamikreduktion [4].

Für die Sprachverständlichkeitsmessungen wurde das Verfahren SQRT mit einem Verfahren (im folgenden mit LIMIT bezeichnet) kombiniert, welches die Teiltöne aus dem TTZM entfernt, deren Pegel eine vorgegebene Schwelle ( $L_{min}$ ) unterschreiten. Das Verfahren SQRT verstärkt Teiltöne niedrigen Pegels, während Teiltöne hohen Pegels bedämpft werden. Der Gesamtpegel des Signals sinkt durch die Begrenzung auf  $L_{max}$  zunächst ab und wird nach der Bearbeitung wieder auf den ursprünglichen Wert angehoben. Diese Bearbeitung führt zu einer Überbetonung geräuschhafter Sprachanteile, die hauptsächlich durch eine Vielzahl kurzer Teiltöne niedrigen Pegels repräsentiert werden. Um diese Überbetonung zu reduzieren, wurden die TTZM vor der Dynamikreduktion mit dem Verfahren LIMIT bearbeitet.

## 2. Versuchsschalle

Das verwendete Sprachmaterial stammt aus dem „Freiburger Wörtestest“ [5]. Für die Hörversuche mit Hörgeschädigten wurden acht Wortgruppen (je 20 Wörter) des Freiburger Wörtestests mit den Verfahren LIMIT und SQRT bearbeitet (Gruppe 3–7 und Gruppe 9–11). Die Pegel der Teiltöne im TTZM dieser Worte bewegen sich zwischen 1 dB und 72 dB. Für das Verfahren LIMIT wurden Schwellen ( $L_{min}$ ) zwischen 10 dB und 50 dB mit einer Schrittweite von 10 dB gewählt. Die Bearbeitung mit dem Verfahren SQRT erfolgte mit den Parametern  $L_{E_{max}} = 90$  dB und  $L_{max}$  zwischen 10 dB und 50 dB (Schrittweite 10 dB). Aufgrund von Vorversuchen, in denen Hörgeschädigte Qualität und Verständlichkeit der bearbeiteten Wörter beurteilten, wurden für das Verfahren LIMIT die Schwellen 20 dB und 30 dB und für das Verfahren SQRT die Grenzwerte 30 dB und 50 dB als Versuchsparameter festgelegt. Im folgenden werden diese Werte zur Bezeichnung der verschiedenen Bearbeitungsvarianten angegeben. Nach der Bearbeitung wurden die TTZM durch Fouriersynthese resynthetisiert und Pegelunterschiede zwischen

den unterschiedlichen Bearbeitungen ausgeglichen, so daß der Pegel aller Wörter den gleichen Maximalwert besaß. Damit wurde in erster Näherung die gleiche Lautheit der Sprachschalle sichergestellt [1]. Die Werte der Bearbeitungsparameter beziehen sich auf die Teiltonpegel im TTZM und sind bei der Versuchsdurchführung vom Darbietungspegel abhängig. Beispielsweise entspricht bei der Darbietung eines Wortes mit einem Schallpegel von 80 dB SPL die Schwelle  $L_{min} = 20$  dB einem Schallpegel von 29,5 dB SPL.

Fig. 1 zeigt den Verlauf des Gesamtpegels (RMS) des unbearbeiteten Wortes „Stift“ (dünne Linie) und seiner Bearbeitung mit den Parametern  $L_{min} = 20$  dB und  $L_{max} = 50$  dB (dicke Linie). Bei der Berechnung des Gesamtpegels (RMS) wurde das Signal über eine Dauer von 5 ms gemittelt. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit ist in Fig. 1 der Pegelverlauf der Schalle zu den Zeitpunkten, an denen alle Teiltöne durch das Verfahren LIMIT entfernt wurden ( $L \rightarrow -\infty$ ), unterbrochen und nicht zur Abszisse durchgezogen. Die Dynamik der Wörter

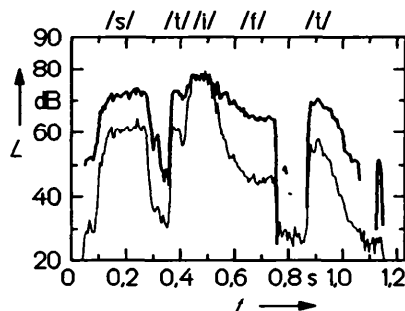


Fig. 1. Gesamtpegel (RMS) des Wortes 'Stift' als Funktion der Zeit. Die einzelnen Bilder zeigen den Pegel des Originalsignals (dünne Linie) und der bearbeiteten Schalle (dicke Linie). Bei der Bearbeitung wurden Teiltöne mit Pegeln unter 20 dB aus dem TTZM entfernt (LIMIT) und mit dem Verfahren SQRT bei  $L_{max} = 50$  dB bearbeitet. Die Signalpegel besitzen den gleichen Maximalwert.

wurde analog zu [4] durch die Differenz zwischen dem Maximalwert des Gesamtpegels und seinem Minimalwert möglichst in der Wortmitte definiert. Zeitabschnitte, in denen das Signal durch die Bearbeitung vollständig entfernt worden war, blieben bei der Bestimmung des Pegelminimums unberücksichtigt. Mit der Kombination der Verfahren LIMIT und SQRT wurden Dynamikreduktionen zwischen 17 dB ( $L_{min} = 20$  dB,  $L_{max} = 50$  dB) und 21 dB ( $L_{min} = 20$  dB,  $L_{max} = 30$  dB) ermittelt. Eine Anhebung der Schwelle  $L_{min}$  auf 30 dB verändert die Dynamik nur geringfügig. Trotz dieser geringen Unterschiede der Dynamikreduktion wurden alle vier Parameterkombinationen in den Hörversuchen verwendet. Die unbearbeiteten TTZM wurden ebenfalls resynthetisiert und als Referenzschalle mit in die Messungen einbezogen.

### 3. Hörversuche

In Zusammenarbeit mit der HNO-Klinik der Ludwig-Maximilians-Universität München wurden Verständlichkeitsmessungen mit Gehörgeschädigten durchgeführt.

#### Versuchsdurchführung

Insgesamt nahmen 17 Versuchspersonen, die unter einer Innenohrschwerhörigkeit (pancochleär oder Hochtonabfall) mit eingeschränktem Dynamikbereich (Recruitment) litten, an den Untersuchungen teil. Sie benutzten während der Hörversuche keine Hörgeräte. Die Wortverständlichkeit wurde bei jedem Darbietungspegel und jeder Parameterkombination mit einer anderen Gruppe des Freiburger Wörtertests ermittelt, um Lerneffekte bei den Versuchspersonen auszuschließen. Jeder Versuchsperson wurden möglichst zwei Kombinationen der Bearbeitungsparameter ( $L_{min}$ ,  $L_{max}$ ) dargeboten. Die im Hörversuch verwendeten Bearbeitungsparameter und der Darbietungspegel der Wortgruppen wurde anhand der Hör- und der Unbehaglichkeitschwelle aus dem klinischen Ton- und Sprachaudiogramm der Versuchsperson festgelegt.

Die Durchführung der Hörversuche erfolgte in einem schallgedämpften audiologischen Untersuchungsraum der HNO-Klinik. Die Versuchsschalle wurden über einen stark bündelnden Lautsprecher dargeboten, der in einem Abstand von einem Meter in Kopfhöhe frontal vor den Versuchspersonen angebracht war. Der Darbietungspegel wurde über ein Audiometer eingestellt. Die Darbietung erfolgte mit dem Pegel, bei dem laut klinischem Sprachaudiogramm eine optimale Verständlichkeit von Einsilbern vorlag ( $L_{opt}$ ). Die Aufgabe der Versuchspersonen bestand darin, jedes dargebotene Wort zu wiederholen. Ihre Antwort wurde vom Versuchsleiter notiert. Bei drei Versuchspersonen wurde der Darbietungspegel variiert.

### Ergebnisse

Die Versuchspersonen beschrieben die mit dem Pegel  $L_{opt}$  dargebotenen Wörter als unangenehm hart und prasselnd. Diese Empfindung nahm mit sinkendem Darbietungspegel ab.

Zur Auswertung der Meßergebnisse wurden die Erkennungsraten der einzelnen Versuchspersonen für bearbeitete Wörter auf die der unbearbeiteten Wörter normiert und Median und Interquartilbereich der Erkennungsraten aller Versuchspersonen ermittelt. Tab. 1 zeigt Media-

Bearbeitung	Normierte Erkennungsrate
unbearbeitetes TTZM	100%
SQRT ( $L_{max} = 50$ dB)	82%
LIMIT ( $L_{min} = 20$ dB)	100% 60%
SQRT ( $L_{max} = 50$ dB)	77%
LIMIT ( $L_{min} = 30$ dB)	86% 40%
SQRT ( $L_{max} = 30$ dB)	49%
LIMIT ( $L_{min} = 20$ dB)	71% 23%
SQRT ( $L_{max} = 30$ dB)	49%
LIMIT ( $L_{min} = 30$ dB)	60% 41%

Tab. 1. Erkennungsraten der mit verschiedenen Parametern bearbeiteten Wortgruppen des Freiburger Wörtertests. Darbietung der Wörter beim Pegel optimaler Verständlichkeit ( $L_{opt}$ ) laut klinischem Sprachaudiogramm der Versuchspersonen. Angegeben sind Median und Interquartilbereich der Erkennungsraten bezogen auf die Erkennung unbearbeiteter Wörter bei Mittelung über 17 Versuchspersonen.

ne und Interquartile der Erkennungsraten für die unterschiedlichen Bearbeitungsparameter. Die Erkennungsraten der bearbeiteten Wörter liegen für alle Verfahren unter denen der unbearbeiteten Wörter (normierte Erkennungsrate  $< 100\%$ ). Nur für zwei Versuchspersonen waren die bearbeiteten Wörter und die unbearbeiteten Wörter gleich verständlich (nicht normierte Erkennungsrate: 85% und 70%). Während die Erkennungsrate in Tab. 1 mit steigender Pegelschwelle  $L_{min}$  (LIMIT) kaum abnimmt, ruft eine Verringerung des Dynamikbereichs der Teiltöne ( $L_{max}$ ) von 50 dB auf 30 dB einen Rückgang der Erkennungsrate um rund 30% hervor.

Neben den Untersuchungen beim Darbietungspegel  $L_{opt}$  wurde mit einem Teil der Versuchspersonen die Verständlichkeit bearbeiteter Wörter bei einem 15 dB niedrigeren Darbietungspegel ermittelt. Da für die abgesenkten Darbietungspegel keine Messungen mit unbearbeiteten Wörtern durchgeführt wurden, ist ein direkter Vergleich der Ergebnisse nicht möglich. Bei acht Versuchspersonen zeigte sich jedoch eine bessere Verständlichkeit der bearbeiteten Wörter bei niedrigerem Darbietungspegel als bei der Darbietung mit dem Pegel  $L_{opt}$ . Dagegen nahm die Verständlichkeit bearbeiteter Wörter bei sechs Versuchspersonen mit sinkendem Pegel ab.

Drei der acht Versuchspersonen, die eine Verständlichkeitsverbesserung mit sinkendem Darbietungspegel zeigten, nahmen an Messungen bei veränderten Darbietungspegeln teil. Fig. 2 zeigt den Verlauf der Erkennungsrate  $h$  als Funktion des Darbietungspegels  $L$  für die unterschiedlichen Bearbeitungsverfahren. Durch die Absenkung der Darbietungspegel nimmt die Verständlichkeit der unbearbeiteten Wörter (Rauten) drastisch ab. Bei einem Darbietungspegel 20 dB unter dem Pegel optimaler Verständlichkeit steigt die Erkennungsrate der Verfahrens-

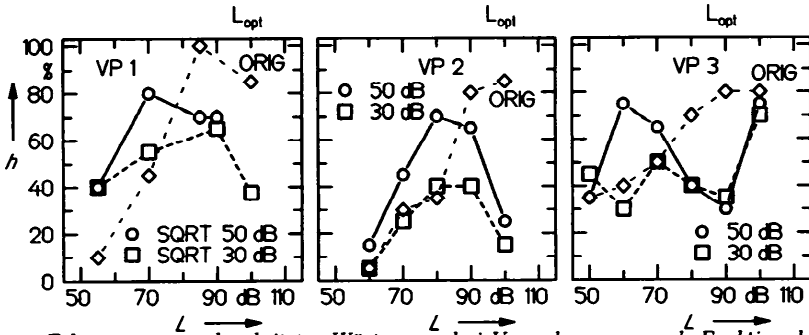


Fig. 2. Erkennungsraten bearbeiteter Wörter von drei Versuchspersonen als Funktion des Darbietungspegels  $L$ . Die Wörter wurden mit niedriger Kompression (Kreise) und hoher Kompression (Quadrate) bearbeitet (SQRT:  $L_{max} = 50$  dB bzw. 30 dB, LIMIT:  $L_{min} = 30$  dB). Zum Vergleich sind die Erkennungsraten un bearbeiteter Wörter eingetragen (Rauten).  $L_{opt}$  markiert den Pegel größter Sprachverständlichkeit im klinischen Sprachaudiogramm.

kombination LIMIT-SQRT ( $L_{min} = 30$  dB,  $L_{max} = 50$  dB) bei allen Versuchspersonen über die Erkennungsrate der un bearbeiteten Wörter an. Sie erreicht jedoch bei keiner Versuchsperson die Erkennungsrate der un bearbeiteten Wörter bei hohem Darbietungspegel ( $L_{opt}$ ).

Unter Berücksichtigung der kleinen Versuchspersonenzahl, die an den Versuchen teilnahm, läßt sich die Signalaufbereitung von Sprachschallen im TTZM für Hörgeschädigte nur eingeschränkt bewerten. Die verwendeten Verfahren waren nur grob an die individuelle Schwerhörigkeit der Versuchspersonen angepaßt. Dennoch zeigen die Ergebnisse einzelner Versuchspersonen deutlich, daß die Dynamikreduktion im TTZM bei niedrigen Darbietungspegeln eine Verbesserung der Verständlichkeit gegenüber un bearbeiteten Wörtern bewirkt. Die Dynamikreduktion ermöglicht die beabsichtigte Absenkung des Darbietungspegels von Schallen, um die dem geschädigten Gehör zugeführte Schallenergie zu verringern. Diese Maßnahme trägt erheblich dazu bei, eine fortschreitende Schädigung des Gehör durch die normalerweise benötigten hohen Schallpegel zu vermeiden. Zwar entstehen bei den niedrigen Darbietungspegeln geringe Verständlichkeitseinbußen, jedoch sind diese einer zunehmenden Beeinträchtigung des Hörvermögens vorzuziehen, zumal von einer genauen Anpassung der Bearbeitungsverfahren an die individuelle Schwerhörigkeit eine weitere Verbesserung der Verständlichkeit zu erwarten ist. Des weiteren ist zu erwarten, daß durch ein gezieltes Hörtraining eine deutliche Verbesserung der Diskrimination bearbeiteter Sprache zu erwarten ist.

Die Untersuchungen wurden im SFB 204 „Gehör“ mit Unterstützung der DFG durchgeführt.

## Literatur

- [1] Fastl, H. (1977). Zur Lautheit fließender Sprache. Zeitschrift für Hörgeräte-Akustik, 16: 2-13.
- [2] Heinbach, W. (1988). Aurally Adequate Signal Representation: The Part-Tone-Time-Pattern Acustica, 67: 113-121.
- [3] Terhardt, E. (1985). Fourier transformation of time signals: Conceptual revision. Acustica, 57: 242-256.
- [4] Wartini, S., v. Rücker, C. (1994). Dynamikreduktion von Sprachsignalen in konturierter Darstellung. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '94, Dresden S. 1421-1424
- [5] Westra. (1992). Audiometric Disc Nr.11, Zahlen und Wörtertest nach DIN 45621 mit Störgeräusch nach Prof.Dr.-Ing. H. Fastl. Westra Electronic GmbH, 86637 Wertingen.
- [6] Zwicker, E., Zollner, M. (1984). Elektroakustik. Springer, Berlin.