Carl v. Ossietzky
UNIVERSITÄT
OLDENBURG

Entwicklung und Bewertung von digitalen Hörgeräte-Algorithmen, Anpassungsverfahren und Prototypen

Abschlußbericht zum BMBF-Verbundprojekt
Förderkennzeichen 01 VJ 9305

Projektleiter: Prof. Dr. Dr. Birger Kollmeier

Prof. Dr. Dr. Birger Kollmeier
AG Medizinische Physik
Fachbereich 8 (Physik)
Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

Prof. Dr. Jürgen Kießling
Funktionsbereich Audiologie
Justus -Liebig-Universität Gießen

Prof. Dr. Gerhard Steeger
Labor für Elektroakustik
Fachbereich Nachrichten- und Feinwerktechnik
Fachhochschule Nürnberg

1 Inhalt

1 Inhalt *2*

2 Kurzfassung des Schlußberichts *3*

2.1 Derzeitiger Stand der Forschung **3**

2.2 Begründung/Zielsetzung der Untersuchung **3**

2.3 Methode **3**

2.4 Ergebnis **3**

2.5 Schlußfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten **4**

3 Kurze Darstellung zu Aufgabenstellung, Voraussetzungen. Planungen und Ablauf, wissenschaftlichen und technischen Stand und zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen *5*

3.1 Aufgabenstellung **5**

3.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde **5**

3.3 Planung und Ablauf des Vorhabens **6**

3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde **6**

3.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen **7**

4 Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses, des voraussichtlichen Nutzens, des Fortschritts bei anderen Stellen und der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung *8*

5 Bibliographie *8*

Anhang:

I. Schlußbericht Universität Oldenburg

II. Schlußbericht HNO-Klinik Universität Gießen

III. Schlußbericht Fachhochschule Nürnberg

2 Kurzfassung des Schlußberichts

2.1 Derzeitiger Stand der Forschung

Digitale Hörgeräte kommen in jüngster Zeit zunehmend auf den Markt und bieten aufgrund ihrer gegenüber konventionellen, analogen oder digital gesteuerten analogen Hörgeräten eine wesentlich höhere Flexibilität, aber auch Komplexität. Demgegenüber ist der Wissensstand über die mit den Hörhilfen zu rehabilitierenden Hörschäden, die dafür notwendigen Diagnostik- und Anpaßverfahren und der Stand von digitalen Algorithmen zur Implementation in digitalen Hörgeräten bei weitem nicht ausentwickelt: Erst in jüngster Zeit wurden erste quantitative Modellvorstellungen über die Auswirkung von (Innenohr-) Schwerhörigkeit auf das Sprachverstehen und anderen psychoakustische Funktionen des Menschen aufgestellt. Anpaßverfahren konnten auf der Basis des Lautheits-Ausgleichs („Recruitment-Kompensation“) für eine limitierte Klasse von Hörgeräte-Algorithmen mit einer geringen Zahl von unabhängigen Frequenzkanälen entwickelt werden. Auf dem Gebiet der Algorithmen ist die Kompensation der bei Innenohrschwerhörigkeit gestörten Lautheitswahrnehmung (Recruitment) am weitesten fortgeschritten, effiziente Algorithmen zur Störgeräuschunterdrückung, zur Kompensation reduzierter binauraler (räumlicher) Hörleistungen und zur Adaptation des Hörgeräts an die jeweilige akustische Situation stehen jedoch noch nicht im befriedigendem Maße zur Verfügung.

2.2 Begründung/Zielsetzung der Untersuchung

Primäres Ziel des hier vorgestellten Verbund-Forschungsprojektes war die Weiterentwicklung der Systemtechnik von digitalen Hörgeräten, d. h. der um das eigentliche „Produkt“ Hörgerät herum notwendigen Techniken zur adäquaten Beschreibung des zu rehabilitierenden Hörverlusts, zur Anpassung von Hörgeräten und zur Entwicklung optimaler Signalverarbeitungs-Strategien (Algorithmen), die auf eine Kompensation der Hörstörung abzielen. Besonderes Gewicht wurde in diesem Projekt auf das beidohrige (binaurale) Hören gelegt und auf Ansätze für eine wirkungsvolle Störgeräuschunterdrückung. Die Modellierung des Hörverlusts, die Entwicklung geeigneter Algorithmen und ihre Anpassung und Optimierung im Labor wurden an der Universität Oldenburg durchgeführt, während an der Fachhochschule Nürnberg ein Prototyp-DSP (Digital Signal Processing)-Hörgerät in Westentaschenformat entwickelt wurde (Hardware und Software), dessen praktische Einsetzbarkeit und Anpassung an Patienten in der Universität Gießen getestet wurde. Ziel war es, durch die Interaktion zwischen Theorie (Modelle des Hörverlusts, Algorithmen-Entwurf, Technologie (Entwicklung eingebetteter Systeme zur Sprachsignalverarbeitung) und Klinik (Anpassung und Bewertung von Prototyp-Hörgeräten) zu einer Verbesserung des Standes der Hörgeräteversorgung zu gelangen, die unmittelbare Auswirkungen für die Praxis hat.

2.3 Methode

Für die quantitative Beschreibung (Modellbildung) der Auswirkung von Innenohr-schwerhörigkeit auf die Sprachverarbeitung wurden psychoakustische und Sprachver-ständlichkeits-Meßverfahren bei normal- und schwerhörigen Patienten eingesetzt, sowie verschiedene numerische Modellvorstellungen entwickelt und evaluiert. Darauf auf-bauend wurden Hörgeräte-Algorithmen auf Laborsystemen zunächst Off-Line und anschließend in einer Echtzeit-Implementation mit Multi-Signalprozessorsystem implementiert. Vereinfachte Versionen dieser Algorithmen wurden auf dem tragbaren Prototyp-DSP-Hörgerät mit einem Festkomma Low-Power-Signalprozessor imple-mentiert. Das resultierende Prototyp-Hörgerät wurde mit Hilfe einer audiologischen Testbatterie bei schwerhörenden Probanden erprobt.

2.4 Ergebnis

Die quantitativen Modelle der Auswirkungen von Innenohr-Schwerhörigkeit konnten erfolgreich entwickelt und anhand verschiedener Tests (z. B. Vorhersage der Sprach-

verständlichkeit in Ruhe und unter Störgeräusch aus dem Hörverlust und auf psychoakustischen Parametern) validiert werden. Die auf Labor-Systemen darauf aufbauend entwickelten Hörgeräte-Algorithmen erwiesen sich in entsprechenden Labortests als wirkungsvoll in bezug auf die Recruitment-Kompensation und die Störgeräusch-Reduktion für bestimmte Klassen von Störgeräuschen und räumlichen Nutzschall/Störschall-Situationen. Auf dem digitalen Prototyp-Hörgerät konnte eine Reihe dieser Algorithmen erfolgreich implementiert werden, insbesondere eine Kombination aus (vereinfachter) Störgeräusch-Unterdrückung und Enthallung mit einer Dynamikkompression (Recruitment-Kompensation). In den Feldtests konnten die Vor- und Nachteile verschiedener Anpassungsverfahren für (digitale) Hörgeräte-Algorithmen ebenso ausgearbeitet werden wie die Vor- und Nachteile der implementierten Störgeräusch-Unterdrückungs-Algorithmen. Dabei ist der Nutzen der bisher verwendeten festen Einstellung eines Störgeräusch-Unterdrückungs-Algorithmus (ohne automatische Anpassung an die jeweilige akustische Situation) geringer als erwartet.

2.5 Schlußfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Die hier entwickelte Systemtechnologie für digitale Hörgeräte hat sich bereits während der Projektlaufzeit als äußerst wichtig für das gesamte Feld der Hörgeräteforschung und Hörgeräteversorgung erwiesen, da wesentliche Teile des Projektes (z. B. Diagnose-, Anpassungs- und Bewertungsverfahren von Hörgeräten) unmittelbar in die Praxis umgesetzt werden konnten. Weiterhin zeigen die Ergebnisse des Projekts, daß eine effiziente binaurale Störgeräusch-Unterdrückung nur in Kombination mit einer adäquaten Recruitment-Kompensation/Dynamikkompression und einer „intelligenten“, adaptiven Algorithmenwahl sinnvoll ist, um den Vorteil von Störgeräuschunterdrückungs-Strategien nur in den Situationen zu nutzen, für die sie geschaffen wurden. Weitere Arbeiten müssen daher in diese „intelligente“ Algorithmenwahl, die Weiterentwicklung der dabei verwendeten Algorithmen und in die Feldtests mit Patienten investiert werden. Die Tatsache, daß die 5 größten weltweit operierenden Hörgeräte-Hersteller während der Laufzeit des Projektes eine Zusammenarbeit zur Weiterentwicklung ihrer Produkte mit den am Projekt beteiligten Hochschulen begonnen bzw. fortgesetzt haben, belegt eindrucksvoll den Erfolg dieses Projektes.
Angesichts dieser positiven Bewertung der aktuellen Situation sowie der sich daraus ergebenden Chancen und Herausforderungen für die Zukunft muß es als sehr bedauerlich gelten, daß die schwerpunktmäßige Forschungsförderung auf diesem Sektor durch das BMBF nicht fortgeführt wird. Bei etwa 14 Millionen Schwerhörigen in Deutschland, die mehrheitlich (ca. 12 Mio.) ausschließlich von Hörgeräten eine Verbesserung ihres Kommunikationsvermögens erwarten dürfen, sollten alle zu Gebote stehenden Initiativen ergriffen werden, um eine Kontinuität der Forschungsförderung auf diesem Gebiet sicherzustellen.

3 Kurze Darstellung zu Aufgabenstellung, Voraussetzungen. Planungen und Ablauf, wissenschaftlichen und technischen Stand und zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen

3.1 Aufgabenstellung

Ausgehend von einer Analyse des Ist-Standes der Hörgeräte-Versorgung und -Entwicklung in Deutschland und Europa (z. B. unzureichende Kenntnisse über die bei einem Hörverlust zugrundeliegenden Verarbeitungsdefizite, pragmatische Signalverarbeitungs-Strategien in Hörgeräten ohne weiteren theoretischen oder audiologischen Hintergrund, unsystematische Anpaß- und Bewertungsprozeduren von Hörgeräten mit z. T. deutlich veralteten Meßverfahren, mangelnde Verfügbarkeit geeigneter digitaler Systeme zum testen innovativer Verfahren) bestand die Aufgabe des Projektes darin, die Grundlagen für eine verbesserte Hörgeräte-Versorgung und -Entwicklung zu schaffen und anhand eines Prototyp-Hörgeräts exemplarisch den Entwicklungsgang eines digitalen Hörgerätes zu optimieren. Dabei wurde weniger Gewicht auf die kommerziellen Aspekte (z. B. Verkäuflichkeit des Prototyp-Gerätes aufgrund von Design und Gewicht, Miniaturisierung und Leistungsaufnahme-Minimierung der Signalverarbeitungs-Algorithmen) gelegt, sondern es wurde ein Schwergewicht auf die audiologisch sinnvollen und für zukünftige Hörgerätegenerationen anzustrebenden Signalverarbeitungsverfahren und ihre Anpassungs- und Überprüfungsprozeduren gelegt. Zu diesen Anforderungen gehörte die streng binaurale Auslegung des Prototyp-Hörgeräts, da das binaurale (beidohrige) Hören wesentlich zur akustischen Kommunikation und Orientierung in der täglichen Umwelt beiträgt (z. B. räumlicher Eindruck, Unterdrückung von Nachhall und Unterdrückung von Störgeräuschen durch das gesunde binaurale System). Außerdem wurde für die Entwicklung und Durchführung von Meßverfahren für die Anpassung und Evaluation von Hörgeräten ein wesentlich höherer Zeitbedarf der Versuchspersonen angesetzt, als in der Praxis (Klinik, Hörgeräte-Akustik) normalerweise zur Verfügung steht.

3.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde als Verbundforschungs-Projekt zwischen einer eher der Grundlagenforschung zuzurechnenden Institution (AG Medizinische Physik, Universität Oldenburg), einer technologieorientierten Institution (Fachhochschule Nürnberg, Fachbereich Nachrichten- und Feinwerktechnik) und einer HNO-Klinik (Arbeitsbereich Audiologie der HNO-Klinik der Universität Gießen) durchgeführt. In der Endphase des Projekts (Feldtests mit dem digitalen Prototyp-Hörgerät) wurden zudem Leistungen des Hörzentrums Oldenburg einbezogen (privatwirtschaftlich organisiertes An-Institut der Universität Oldenburg und des Evangelisches Krankenhauses Oldenburg mit der Zielsetzung des Technologie-Transfers zwischen Wissenschaft, Klinik und Industrie auf dem Gebiet der rehabilitativen Audiologie). Zusätzlich bestand eine enge Kooperation mit einem europäischen Verbundprojekt zur Hörgeräteentwicklung („EU-Projekt HEARDIP“) mit den Projektpartnern Universität Amsterdam (Prof. Dreschler, Koordinator), Universität Rotterdam (Dr. Verschuure), Universität Cambridge (Prof. Moore), Universität Oldenburg (Prof. Kollmeier), Siemens Audiologische Technik GmbH (Erlangen) und Philips Hörgeräte (Eindhoven). Obwohl beide Verbundprojekte eine deutlich andere Zielstellung hatten (Grundlagen und Prototyp-Entwicklung und Validierung im deutschen Verbundprojekt, Bewertung von verschiedenen, aus der europäischen Literatur bekannten Hörgeräte-Strategien im Labor im europäischen Projekt), profitierten beide Projekte von den Synergie-Effekt: Das europäische Verbundprojekt konnte beispielsweise die im Rahmen des deutschen Projektes von der

Fachhochschule Nürnberg entwickelte Hardware und Grund-Software nutzen, während das deutsche Verbund-Projekt von den Erfahrungen und der internationalen Reputation des europäischen Konsortium und der darin vertretenden Hörgeräte-Firmen für die eigenen Entwicklungen profitieren konnten (beispielsweise lieferten Siemens und Philips die analogen HDO-Hörgeräte, die mit dem digitalen Prototyp-Hörgerät gekoppelt wurden). Die Kooperation in diesem Konsortium wurde nach Ablauf der BMBF-Förderung (Auslaufen des Schwerpunktes) im Rahmen eines von der EU finanzierten Projekts „SPACE“ fortgesetzt.

Neben den genannten Kooperationen profitierte der an der Universität Oldenburg angesiedelte Teil des Projektes von der Kooperation mit den Fächern Psychologie, Informatik und HNO-Medizin im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs „Psychoakustik“ sowie von der Kooperation mit der Neurobiologie und Psychologie in Oldenburg und der Hirnforschung in Bremen im Rahmen des seit 1996 geförderten Sonderforschungsbereichs „Neurokognition“.

3.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Während der gesamten Laufzeit des Vorhabens wurden an der Universität Oldenburg grundlegende Untersuchungen durchgeführt und Hörgeräte-Algorithmen entwickelt und validiert sowie psychoakustische und sprachaudiometrische Messungen mit normal- und schwerhörenden Probanden durchgeführt. Ebenso wurden an der Universität Gießen während des gesamten Zeitraums audiologische Messungen durchgeführt sowie Untersuchungen zu Anpaßverfahren und zur Überprüfung des Gewinns von Hörgeräte-Versorgungen. Sie wurden während des ersten Projektzeitraums auf der Basis von derzeitig kommerziell verfügbaren Geräten (digital programmierbare analoge Hörgeräte) durchgeführt und während des zweiten Projektzeitraums auf der Basis des dann verfügbaren Prototyp-DSP-Hörgeräts. An der Fachhochschule Nürnberg wurden während der Laufzeit des Projekts zwei Generationen von digitalen Prototyp-Hörgeräten (Hardware, Software) einschließlich der Anpassungssoftware entwickelt, wobei die zweite Generation sich durch eine höhere Leistungsfähigkeit der Signalverarbeitung, kleinere physikalische Abmessungen und eine längere mittlere Betriebsdauer mit einer Akkumulator-Ladung auswies. In der Endphase des Projekts wurden zusätzliche Feldtests an der Universität Oldenburg durchgeführt.

3.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns waren nur vereinzelte z. T. nicht validierte Modelle zur Signal- und Sprachverarbeitung im pathologischen Gehör in der Literatur verfügbar (Lautheitsmodell nach Zwicker, modifiziert nach Florentine und Zwicker (1979); Erste Version des Modells der „effektiven“ Signalverarbeitung im Gehör für Normalhörende nach Püschel (1988); Sprachverständlichkeits-Vorhersagemethoden aufgrund von Spracheigenschaften, s. Kollmeier (1990)), so daß hier eine Erweiterung der Modell-vorstellungen für Schwerhörende und eine Validierung (Überprüfung) der Modell-vorstellungen im Hinblick auf Hörgeräte-Anwendungen notwendig erschienen. Bei den Hörgeräte-Algorithmen existierten nur vereinzelte Labor-Studien mit Mehrkanal-Hörgeräten (meistens 2-3 kanalige Realisierung), aber kaum Berichte und Erfahrungen über Multi-Kanal-Hörgeräte mit angestrebter Lautheitskompensation (z. B. Dreschler, (1992), Kießling und Steffens (1993), Appell (1994)). Erfahrungen mit Störgeräusch-Unterdrückungssystemen gab es bisher nur anhand von Laboruntersuchungen (z. B. Boll (1980), Brey *et al.* (1987), Graupe *et al.* (1987), Koch (1992), Peissig (1992)). Weitergehende Erfahrungen mit der Implementation und dem Test von derartigen Algorithmen auf tragbaren Systemen gab es nicht. Für Hörgeräte-Anwendungen wurde

zum Zeitpunkt des Projektbeginns an verschiedenen Stellen spezielle Hardware entwickelt (z. B. in Zürich (Dr. Dillier), Linköping (Prof. Arlinger), Boulder/USA, (Firma AudioLogic, Dr. Melanson)), die eine ähnliche Leistungsfähigkeit der Signalverarbeitung, aber eine andere technische Realisierung ermöglichten, als das im Rahmen dieses Projekts entwickelte Prototyp-Hörgerät-System. In bezug auf audiologische Diagnostik- und Anpassungsmethoden für Hörgeräte gab es nur wenige systematische Studien, insbesondere gab es noch wenig Konsens über die für die Beurteilung einer „erfolgreichen" Hörgeräte-Anpassung benötigten Testverfahren. Einen ungefähren Überblick über den Stand der Forschung und Technik während der ersten Hälfte des Projektes gibt das 1996 erschienene Buch von B. Kollmeier „Psychoacoustics, Speech and Hearing Aids", das das Resultat einer Tagung im September 1995 vorstellt, bei der auch wesentliche Projektergebnisse und die Vorarbeiten dazu vorgestellt wurden und ein Vertreter der DLR Projektträgerschaft Forschung im Dienste der Gesundheit anwesend war.

3.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der bereits oben genannten institutionellen Zusammenarbeit im Rahmen des deutschen Verbundprojektes, des europäischen Verbundprojektes und der an der Universität Oldenburg etablierten Institutionen standen Kontakte zu weiteren Projektes des BMBF-Förderschwerpunktes „Hilfen für Hörgeschädigte": Im Rahmen des 1997 abgeschlossenen Verbundprojektes zur „Sprachaudiometrie und anderen computergesteuerten Verfahren der Audiologie" bestanden Kontakte zu den HNO-Universitäts-Kliniken Aachen, Erlangen und Köln, die zur Verbesserung der eingesetzten audiologischen Meßverfahren führten. Weitere Kontakte gab es mit der Universität Bochum (Prof. Hudde), der im Rahmen seines BMBF-Projektes ein Prototyp-Hörgerät aus dem hier beschriebenen Projekt einsetzen konnte. Eine Verknüpfung der Projekt-Ergebnisse konnte im gewissen Umfang im Rahmen der von B. Kollmeier in Oldenburg organisierten 1. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Audiologie (11.-12. März 1998) erzielt werden, in deren Rahmen ein Berichtskolloquium des BMBF-Förderschwerpunktes „Hilfe für Hörgeschädigte" stattfand. Darüber hinaus bestand durch die Vermittlung des während der Projekt-Laufzeit gegründeten An-Instituts „Hörzentrum Oldenburg" ein Kontakt zu den größten weltweit agierenden Hörgeräte-Herstellern, der u. a. dadurch gefördert wurde, daß eine Reihe von Absolventen der Oldenburger Arbeitsgruppe nach Abschluß ihrer akademischen Ausbildung bei diesen Firmen eine Beschäftigung aufnahmen: Firma Siemens Audiologische Technik, Erlangen (Frau Dr. Holube, Dr. Wesselkamp), Firma Starkey, Norderstedt (Dr. Sander), Firma Phonak, Stäfa (Schweiz) (Dr. Launer, Dr. Kühnel), Firma Bernafon (Schweiz) (Dr. Müller), Firma Widex (Dänemark) (Dr. Hansen), Firma Kind Hörgeräte, Großburgwedel (Dr. Kind, Dr. Neumann). Allein durch diesen massiven Personaltransfer ist eine Übertragung der an der Universität (u. a. im Rahmen dieses Projekts) erarbeiteten Konzepte und Technologien in die Praxis der Hörgeräteversorgung gegeben.

4 Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses, des voraussichtlichen Nutzens, des Fortschritts bei anderen Stellen und der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung

Die detaillierte Darstellung der Ergebnisse befindet sich getrennt in den jeweiligen Abschlußberichten der Projektpartner, die als Anhang beigefügt sind.

5 Bibliographie

Die detaillierte Bibliographie sowie Sonderducke der im Rahmen des Projekts entstandenen Veröffentlichungen befinden sich getrennt in den jeweiligen Abschlußberichten der Projektpartner. Im folgenden ist nur die in dieser Zusammenfassung angegebene Literatur aufgeführt.

1. Appell, J.-E. (1994). Simulation, Anpassung und Test von dreikanaligen Signalverarbeitungsstrategien für Hörgeräte, Diplomarbeit Universität Göttingen.
2. Boll, S. F. and D. C. Pulsipher (1980). "Suppression of Acoustic Noise In Speech Using Two Microphone Adaptive Noise Cancellation." IEEE Trans. Acoustics, Speech and Signal Processing **ASSP-28** (6): 752.
3. Brey, R. H., M. S. Robinette, et al. (1987). "Improvement in speech intelligibility in noise employing an adaptive filter with normal and hearing impaired subjects." J.\,Reh.\,Res.\,Dev. **24**: 75--86.
4. Dreschler, W. A. (1992). "Fitting Multichannel--Compression Hearing Aids." Audiology **31(3)**: 121--131.
5. Florentine, M. and E. Zwicker (1979). "A model of loudness summation applied to noise induced hearing loss." Hearing Research **1**: 121--132.
6. Graupe, D., J. K. Grosspietsch, et al. (1987). "A Single-Microphone based self-adaptive Filter of Noise from Speech and its Performance evaluation." Journal of Rehabilitation Research and Development **24**: 119--126.
7. Kießling, J. and T. Steffens (1993). "Comparison of a Programmable 3-Channel Compression Hearing System with Single-Channel Agc Instruments." Scandinavian Audiology **22**: 65-74.
8. Koch, R. (1992). Gehörgerechte Schallanalyse zur Vorhersage und Verbesserung der Sprachverständlichkeit, Dissertation Universität Göttingen.
9. Kollmeier, B. (1990). Meßmethodik, Modellierung und Verbesserung der Verständlichkeit von Sprache, Habilitationsschrift Universität Göttingen.
10. Peissig, J. (1992). Binaurale Hörgerätestrategien in komplexen Störschallsituationen, Dissertation Universität Göttingen.
11. Püschel, D. (1988). Prinzipien der zeitlichen Analyse beim Hören, Dissertation Universität Göttingen.

ANHANG

I. Schlußbericht Universität Oldenburg

II. Schlußbericht HNO-Klinik Universität Gießen

III. Schlußbericht Fachhochschule Nürnberg