



Erprobung und Validisierung von sprachaudiometrischen und anderen computergesteuerten Meßverfahren für die klinische Audiometrie

Abschlußbericht zum BMBF-Verbundprojekt
Förderkennzeichen 01 VJ 89043

Projektleiter: Prof. Dr. Dr. Birger Kollmeier

Mitarbeiter: Dipl. Phys. Stephan Albani
Dipl. Phys. Jens E. Appell
Dipl. Phys. Thomas Brand
Frau Anita Gorges
Dr. Volker Hohmann
Dr. Inga Holube
Dr. Kathrin Kliem
Dr. Volker Kühnel
Dr. Christian Müller
Dr. Rüdiger Schönfeld
Dr. Matthias Wesselkamp
Dipl. Phys. Thomas Wittkop

AG Medizinische Physik
Fachbereich 8 (Physik)
Carl von Ossietzky Universität
26111 Oldenburg

Inhalt

0	Kurzfassung des Schlußberichts	3
0.1	Derzeitiger Stand der Forschung	3
0.2	Begründung/Zielsetzung der Untersuchung.....	3
0.3	Methode.....	3
0.4	Ergebnis	3
5	Schlußfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten	4
1	Kurze Darstellung zu Aufgabenstellung, Voraussetzungen. Planungen und Ablauf, wissenschaftlichen und technischen Stand und zur Zusammenarbeit mit anderen Stellen.....	5
1.1	Aufgabenstellung.....	5
1.2	Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens.....	5
1.4	Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	6
2	Eingehende Darstellung des erzielten Ergebnisses, des voraussichtlichen Nutzens, des Fortschritts bei anderen Stellen, der erfolgten oder geplanten Veröffentlichung.....	7
2.1	Darstellung des erzielten Ergebnisses.....	7
2.1.1	Meßtechnik.....	7
2.1.2	Etablierung neuer Meßverfahren für die Audiologie.....	9
2.1.3	Einführung adaptiver Meßverfahren in die Audiologie	14
2.1.4	Binaurale Testverfahren	16
2.1.5	Anpassungsverfahren für Hörgeräte	17
2.1.6	Theoretische Untermauerung der entwickelten und validierten Methoden.....	18
2.2	Darstellung des voraussichtlichen Nutzens insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen	19
2.2.1	Wissenschaftlicher Nutzen	19
2.2.2	Klinisch- und praktisch-audiologischer Nutzen	19
2.2.3	Technische und kommerzielle Verwertbarkeit der Ergebnisse	19
2.3	Darstellung des bekanntgewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen	20
3	Bibliographie	21
	Liste der aus dem Projekt entstandenen bzw. geplanten Veröffentlichungen	22
Anhang		
I.	Schlußbericht HNO-Klinik RWTH Aachen	
II.	Schlußbericht HNO-Klinik Universität Erlangen/Nürnberg	
III.	Schlußbericht HNO-Klinik, Universität Gießen	
IV.	Schlußbericht HNO-Klinik Universität Kiel	
V.	Schlußbericht HNO-Universitätsklinik Köln	
VI.	Kopie ausgewählter, während des Projektes entstandener Publikationen.	

0 Kurzfassung des Schlußberichts

0.1 Derzeitiger Stand der Forschung

Die Diagnostik von Hörstörungen und die Rehabilitation mit technischen Hörhilfen steht aufgrund der rasanten technischen Entwicklung (Miniaturisierung bei den digitalen Hörgeräten) in einem Umbruch, da die klassischen Meßverfahren (Ton- und Sprachaudiometrie) den heutigen Standards nicht mehr genügen. In der Grundlagenforschung wurden zwar eine Reihe von Methoden zur Charakterisierung des Hörvermögens entwickelt (z. B. psychoakustische Methoden zur Erfassung des eingeschränkten Dynamikbereichs (Recruitment-Phänomen), der verringerten Zeit- und Frequenzauflösung von Innenohrschwerhörigen, Sprachtests zur Gütebeurteilung bei Telekommunikationseinrichtungen), ihre konsequente Umsetzung für die Audiologie und die praktische Hördiagnostik und Hörrehabilitation stand jedoch noch aus.

0.2 Begründung/Zielsetzung der Untersuchung

Das hier beschriebene Verbund-Forschungsvorhaben hatte deshalb das Ziel, neue computergesteuerte Meßverfahren für die Audiometrie zu entwickeln, in verschiedenen Kliniken einzusetzen, anhand von praktischen Erfahrungen zu erproben und zu optimieren. Zu diesen Verfahren zählten einerseits sprachaudiometrische Verfahren, bei denen die Entwicklung neuer Sprachtests speziell unter Störgeräusch und unter binauralen (räumlichen) Bedingungen im Vordergrund standen und andererseits psychoakustische Meßverfahren (wie die kategoriale Lautheitsskalierung) und Anpassungs/Bewertungsverfahren für technische Hörhilfen. Ein wichtiges Ziel war dabei die Entwicklung eines Demonstrations-Untersuchungssystems, in dem sämtliche dieser neuen Untersuchungsverfahren für die Praxis verfügbar sind und die zeiteffiziente Durchführung dieser Verfahren durch den konsequenten Einsatz adaptiver Meßverfahren (d. h. Meßverfahren, die aufgrund der Reaktion der Patienten die Meßparameter automatisch so einregeln, daß eine schnelle Aussage über die zugrundeliegende Hörstörung erfolgen kann).

0.3 Methode

Hierzu wurde eine universelle und flexible Sprachverständlichkeits-Untersuchungsstation entwickelt, die auf einem Personal-Computer mit Signalprozessor und Peripherie (computergesteuerte Audiometerbox, Touch Screen zur Antworteingabe durch den Patienten, CD-ROM oder DAT-Rekorder, Aufzeichnung des akustischen Testmaterials) versehen ist. Diese Untersuchungsstation (Hardware und Software) wurde in Göttingen bzw. Oldenburg entwickelt und an die beteiligten HNO-Universitätskliniken Aachen, Erlangen, Gießen, Kiel und Köln verteilt, so daß dort im klinischen Einsatz mit Patienten eine Erprobung und Optimierung der Meßmethoden stattfinden konnte.

0.4 Ergebnis

Die im Rahmen des Projektes entwickelte neue computergesteuerte Meßtechnik (insbesondere das computergesteuerte Audiometer und die digitale, richtungsabhängige Freifeldentzerrung von Kopfhörern) konnte über die teilnehmenden Kliniken hinaus auch in der Praxis etabliert werden, da einige Audiometer-Hersteller dieselben Prinzipien inzwischen einsetzen. Es wurden weiterhin eine Reihe neuer Meßverfahren entwickelt und validiert, von denen der Göttinger Satztest und die kategoriale Lautheitsskalierung („Oldenburger Hörflächenskalierung“) die für die praktische Anwendung relevantesten neuen Verfahren darstellen. Der Zeitaufwand für die Durchführung dieser Verfahren wurde durch die Einführung adaptiver Meßverfahren, die insbesondere aufgrund der Computersteuerung der Messung möglich sind, deutlich erhöht. Weiterhin wurde die Diagnostik des binauralen Hörens (d. h. der Sprachverständlichkeit bei räumlich verteilten Störschallquellen und Nutzschallquellen) durch die Einführung standardisierter Sprachverständlichkeits-Meßverfahren unter simulierten räumlichen Bedingungen deutlich weiterentwickelt. Die entwickelten Testverfahren konnten erfolgreich für die Auswahl, Anpassung und Erfolgskontrolle von technischen Hörhilfen (Hörgeräte und

Cochlea-Implantate) eingesetzt werden. Als „theoretischer Überbau“ wurden Modelle zur Wirkung von Innenohr-Schwerhörigkeit auf verschiedene Teilleistungen des Hörens aufgestellt, anhand derer der Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der einzelnen audiometrischen Testverfahren quantitativ abgeschätzt werden kann.

5 Schlußfolgerung/Anwendungsmöglichkeiten

Insgesamt wurde durch das Projekt eine ausgewogene und sowohl theoretisch als auch klinisch-experimentell begründete Batterie von effizienten Verfahren für die Hördiagnostik und Hörrehabilitation zur Verfügung gestellt. Diese Verfahren sind teilweise schon in kommerziell verfügbare Produkte integriert, zum Teil ist dies noch eine Aufgabe für die nähere Zukunft. Der Hauptnutzen des Projektes liegt in der verbesserten Hördiagnostik und der Verbesserung der Verfahren für die Hörrehabilitation von hörbehinderten Patienten. Aufbauend auf den Erkenntnissen des Projektes kann die Hördiagnostik entscheidend verbessert und in ihrer Effizienz gesteigert werden, die Hörgeräte-Technik kann besser auf den individuellen Patienten angepaßt werden und letztendlich ist mit einem größeren Erfolg bei der Rehabilitation von hörgeschädigten Patienten zu rechnen.

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

1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel des Vorhabens war die Einführung von modernen, computergesteuerten audiometrischen Meßverfahren und Methoden zur Anpassung technischer Hörhilfen in die audiologische Praxis. Dazu sollte zunächst eine computergesteuerte Sprachaudiometrie-Untersuchungsstation entwickelt werden, die an die beteiligten Universitäts-HNO-Kliniken mit der entsprechenden Software ausgeliefert und erprobt wurde. Mit Hilfe dieser Station wurden neue sprachaudiometrische Meßverfahren weiterentwickelt und klinisch validiert. Außerdem sollten weitere computergesteuerte Testverfahren (insbesondere die kategoriale Lautheitsskalierung) für den klinischen Einsatz optimiert und erprobt werden. Neben der Methodenentwicklung und Validierung war ein weiteres wichtiges Ziel des Vorhabens die theoretische Untermauerung der Verfahren durch Erkenntnisse über die Funktionsweise des normalen und gestörten Gehörs, die für die Abschätzung der Ergebnisse der eingesetzten Meßverfahren und den Zusammenhang zwischen den Verfahren von entscheidender Bedeutung sind. Insgesamt sollen diese Maßnahmen zu einer Reform der in der klinisch-audiologischen Praxis verwendeten Untersuchungsmethoden führen, die insbesondere im Hinblick auf den Einsatz moderner Technologien bei technischen Hörhilfen von entscheidender Bedeutung ist.

1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde als Verbundforschungs-Projekt konzipiert, das von einer wissenschaftlichen Einrichtung im Bereich der Angewandten Physik koordiniert wurde (III. Physikalisches Institut der Universität Göttingen vom 01.08.1990 - 31.07.1993 bzw. AG Medizinische Physik, Fachbereich Physik der Universität Oldenburg vom 01.01.1994 - 30.06.1996) und an dem die Universitäts-HNO-Kliniken Aachen, Erlangen, Gießen, Kiel und Köln als klinische Projektpartner beteiligt waren. Der Wechsel der koordinierenden Hochschule war aufgrund der Ernennung des Projektleiters (Prof. Dr. rer. nat. Dr. med. B. Kollmeier) zum Professor für Angewandte Physik/Experimentalphysik an der Universität Oldenburg zum 01.04.1993 notwendig, sowie des im Zusammenhang damit stehenden Umzugs der ehemals Göttinger Arbeitsgruppe nach Oldenburg Mitte 1993. Aufgabe der zentralen, koordinierenden Institution war die Entwicklung der Untersuchungsstation (Hardware und Software), der wissenschaftliche und zum Teil technische Support für die beteiligten HNO-Universitäts-Kliniken und die Bearbeitung der übergreifenden wissenschaftlichen Fragestellungen. Die Universität Oldenburg bietet für diese Aufgaben aufgrund des dort vorhandenen Forschungsschwerpunktes im Bereich der Hörforschung (Graduiertenkolleg Psychoakustik, Sonderforschungsbereich „Neurokognition“, Hörzentrum Oldenburg) hervorragende Voraussetzungen. Die beteiligten 5 HNO-Kliniken zählen zu den auf dem Gebiet der Audiologie führenden Einrichtungen in der Bundesrepublik Deutschland. Die Abteilungen für Audiologie werden dabei jeweils von einem Physiker oder Ingenieur verantwortlich geleitet und wissenschaftlich vertreten, so daß das entsprechende Potential für die Einführung und Umsetzung neuer computergesteuerter Verfahren für die klinische Audiometrie an diesen Abteilungen definitiv vorhanden ist.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In einer Vorlaufphase (01.08.1990 - 31.12.1990) wurde zunächst nur an der Universität Göttingen die Hardware und die notwendige Grund-Software für die erste Version der Untersuchungsstation konfiguriert bzw. entwickelt, so daß die beteiligten Kliniken zum 01.01.1991 mit der Erprobung und Weiterentwicklung beginnen konnten. Aufgrund der ersten Erfahrungen und Rückmeldungen von den Kliniken war es notwendig, eine zweite Version der Apparatur (einschl. Software) im Jahr 1992 anzufertigen und auszuliefern. Mit dieser Lösung wurden eine Reihe von wissenschaftlichen und klinischen Arbeiten durchgeführt, die

insbesondere während des Symposiums „Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie“ vom 23. - 24.01.1992 vorgestellt und im Kreis von Fachleuten diskutiert wurden (Kollmeier, 1992). Aufgrund der daraus resultierenden Vorschläge externer Experten und der bisher gemachten Erfahrungen wurde schließlich das Projekt bis zum 30.06.1996 verlängert bzw. aufgestockt, um insbesondere den neuesten technischen Stand von Hardware und Software in einer dritten Version der Untersuchungsstation zu aktualisieren und um die aufgrund der ständigen Weiterentwicklung möglich gewordenen optimierten Meßverfahren bei einem größeren Patientenkollektiv einsetzen zu können.

1.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an dem angeknüpft wurde

Zum Zeitpunkt des Projektbeginns wurde in den Kliniken und in der audiologischen Praxis nahezu ausschließlich die seit ca. 30 Jahren etablierten und standardisierten ton- und sprachaudiometrischen Testverfahren verwendet (Tonaudiometrie, überschwellige Testverfahren, Freiburger Sprachtest, vgl. Lehnhardt, 1996). Neuere sprachaudiometrische Tests (z. B. der Einsilber-Sprachverständigkeitstest nach Sotscheck (1982) bzw. die für klinische Anwendungen modifizierte Version nach von Wallenberg und Kollmeier (1989) sowie psychoakustische Verfahren wie die kategoriale Lautheitsskalierung nach Heller (1985) und ihre Anwendung für Hörgeräte-Algorithmen (Kollmeier, 1990b) waren war in der Wissenschaft eingeführt, für das klinische Umfeld jedoch praktisch nicht nutzbar. Die Audiometertechnik war dementsprechend auf einem Stand, der durch analoge Signalgenerierung und -aufbereitung gekennzeichnet war (z. B. Generierung von Sinustönen, Abspielen von Testsignalen über Kassettenrecorder oder Tonband, durchgängig analoge Verstärkungs- und Filtertechnik in den Audiometern). In wissenschaftlichen Untersuchungen wurde zwar der Effekt einer Hörstörung auf sehr unterschiedliche psychoakustische und Sprachperzeptions-Leistungen festgestellt, ein systematischer Zusammenhang zwischen diesen Größen und eine Beziehung zu spezifischen audiometrisch ausmeßbaren Funktionsdefiziten konnte jedoch nicht angegeben werden, insbesondere weil keine einschlägigen Modellvorstellungen existierten (Kollmeier, 1990a, Smoorenburg, 1990). Ein Überblick über den Stand des Gebietes gibt die Habilitationsschrift von B. Kollmeier (Kollmeier, 1990a), so daß auf eine detaillierte Auflistung der zu Projektbeginn verfügbaren Literatur hier verzichtet wird. Aufgrund des in den Vorarbeiten zum Projekt erarbeiteten Standes der Technik und der relativen Überschaubarkeit der technischen Aspekte im Gebiet der audiologischen Akustik war die Inanspruchnahme von technischen Fachinformationsdiensten nicht notwendig.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Neben der im Rahmen des Verbundprojektes institutionalisierten Zusammenarbeit zwischen den Universitäten Aachen, Erlangen, Gießen, Göttingen, Kiel, Köln und Oldenburg bestand zum einen ein Informationsaustausch mit anderen Projekten des BMBF-Schwerpunktprogramms (z. B. Universität Würzburg (Prof. Heller), Universität Hannover (Prof. Lenarz)). Andererseits wurde durch die Organisation von 2 Symposium im Rahmen des vorliegenden BMBF-Projektes (Symposium über „Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie“, Januar 1992 und „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, August 1995) der Kontakt zu den führenden in- und ausländischen Wissenschaftlern gepflegt, die auf diesem Gebiet arbeiten. Hervorzuheben ist dabei der Austausch mit PD Dr. N. Dillier (Zürich), Prof. Dr. W. Dreschler (Amsterdam), Prof. Dr. B.C.J. Moore (Cambridge) und Dr. J. Sotscheck (Berlin), die zu verschiedenen Zeitpunkten des Vorhabens wertvolle Hinweise und Ergänzungen insbesondere in Bezug auf die Sprachaudiometrie und die Anwendung psychoakustischer Meßverfahren geliefert haben.

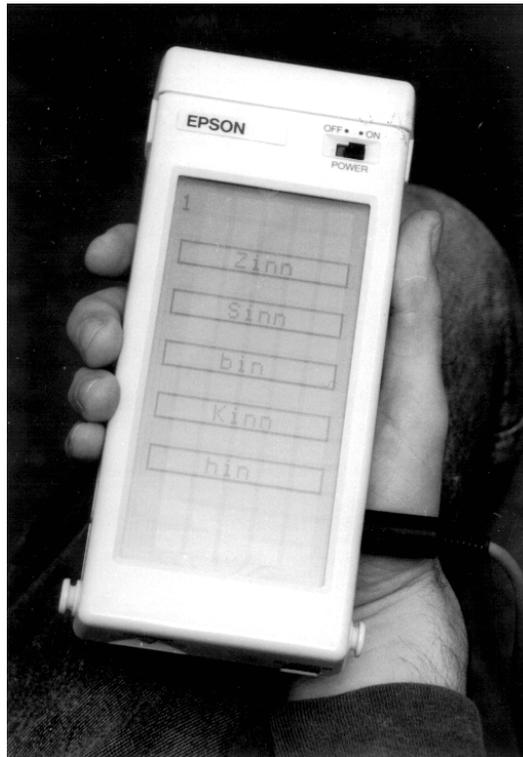


Abbildung 2: Der Touchscreen-Handheld-Computer zur Eingabe der Patientenantworten..

entweder über Kopfhörer oder über das Freifeld erfolgen. Als Eingabemedium für die Versuchsperson oder den Versuchsleiter dient ein berührungsempfindliches LCD-Display (EPSON EHT-10, siehe Abb 2). Die Funktion aller Peripheriegeräte kann vom Steuerrechner kontrolliert werden, so daß ein automatischer Ablauf der verschiedenen audiologischen Meßverfahren möglich ist. Zusätzlich kann die Meßapparatur mit einer Sun-Workstation verbunden werden, die mit Hilfe eines komfortablen Signalverarbeitungsprogramms zur Generierung verschiedener Stimuli (z. B. Schmalbandrauschen, Töne, Tonkomplexe etc.) verwendet werden kann.

Ein erheblicher Entwicklungsaufwand war zum einen für die Audiometerbox notwendig, da zu Beginn des Projektes auf dem Markt keine derartige Audiometrieinheit verfügbar war, die sich über eine serielle Computer-Schnittstelle steuern ließ und die hohen Anforderungen in Bezug auf Dynamikumfang, Kanaltrennung, Auflösung der Abschwächer (0,1 dB bei 120 dB-Bereich) und Einstellbarkeit von Tiefpaßfiltern erreichte. Inzwischen wurde dieses Konzept jedoch von industriellen Herstellern von Audiometern aufgenommen und in Produkte umgesetzt (z. B. Aurical von Madsen und Unity von Siemens). Weiterhin war ein hoher Entwicklungsaufwand für die Erstellung der entsprechenden Software notwendig, wobei primär für die verwendeten Peripherie-Komponenten die entsprechende flexible und universell einsetzbare Steuer-Software erstellt werden mußte. Dabei wirkte sich besonders erschwerend der Übergang vom Betriebssystem DOS auf das neue Betriebssystem Windows aus, so daß sämtliche Treiber und das Konzept der Software im Prinzip während der Projektlaufzeit neu geschrieben werden mußte. Bei dieser Umstellung wurde jedoch ein leistungsfähiges Konzept zur Ansteuerung der verschiedenen Peripherie-Geräte konsequent umgesetzt (Winshell), auf dessen Basis mit relativ geringem Aufwand relativ komplexe Meßprozeduren mit der Apparatur umgesetzt werden können. Damit ist es auch möglich, externe Geräte wie CD-ROM Laufwerke, computergesteuerte Audiometer anderer Hersteller oder andere Patienten-Antwortboxen in das Programmsystem einzubinden, sofern die entsprechenden Treiber an die Gegebenheiten der Software angepaßt werden.

Ein weiteres wichtiges Ergebnis ist die digitale, richtungsabhängige Freifeldentzerrung von Kopfhörern, die für die (breitbandige) Sprachaudiometrie notwendig ist, um unter Kopfhörer-

Darbietung dieselben sprachaudiometrischen Ergebnisse zu erzielen wie in Freifelddarbietung mit Schalleinfall aus unterschiedlichen Richtungen. Die dazu notwendige Technik wurde von Kollmeier und Drüke (1992) vorgestellt und von Pastoors und Kollmeier (1996) anhand von subjektiven Messungen mit Versuchspersonen überprüft. Kernpunkt dieser Technik ist die Aufnahme von Außenohr-Impulsantworten im Freifeld mit einem Kunstkopf (oder einer „mittleren“ Versuchsperson) bei Schalleinfall aus unterschiedlichen Richtungen sowie die Aufnahme derselben Impulsantwort unter Kopfhörer-Darbietung. Durch das Entfalten (Division im Frequenzbereich) kann ein „inverses Filter“ für den Kopfhörer erzielt werden, das die Simulation einer beliebigen Einfallsrichtung des Schalls für die Kopfhörer-Darbietung bewirkt und zugleich den gleichen Frequenzgang wie im Freifeld erzeugt. Die entsprechende Filterung kann mit der o. a. Apparatur in Echtzeit auf dem Signalprozessor durchgeführt werden, so daß gleichzeitig zwei verschiedene räumliche Quellen der Versuchsperson angeboten werden können (z. B. Nutzsprecher und Störgeräusch aus verschiedenen Richtungen). Außerdem bietet diese Technik gegenüber einer Freifelddarbietung den Vorteil, daß die Gesamt-Verstärkung an den beiden Ohren unterschiedlich eingestellt werden kann (zum teilweisen Ausgleich des Hörverlusts). Die mit dieser Technik erzielten Ergebnisse zur Sprachaudiometrie in Ruhe und unter Störschall sind in einer Reihe von Veröffentlichungen im einzelnen dargestellt worden (z. B. Holube und Kollmeier, 1994, Kollmeier 1996b, Wesselkamp 1994). Umfangreiche Untersuchungen (unveröffentlichte Diplomarbeit A. Pastoors, Universität Oldenburg, unveröffentlichte Studienarbeit M. Köntges, Universität Oldenburg 1996) haben ergeben, daß es keine systematische Abweichung zwischen der „objektiven“ durch die o. a. Methode gewonnenen Freifeldentzerrung und der „subjektiven“ Freifeldentzerrung gibt, bei der eine Versuchsperson abwechselnd den Lautheitseindruck eines Schalls im Freifeld und eines über Kopfhörer angebotenen Schalls vergleichen und einander anpassen muß.

Damit sind die wesentlichen theoretischen und (in Form der Echtzeit-Signalverarbeitung) praktischen Voraussetzungen geschaffen, um die digitale, richtungsabhängige Freifeldentzerrung auch in der Praxis einzusetzen. Dies ist bislang nur auf der hier entwickelten Sprachaudiometrie-Untersuchungsstation geschehen, eine Umsetzung dieser Technik in kommerzielle Audiometer wird in der nächsten Zeit jedoch erwartet.

2.1.2 Etablierung neuer Meßverfahren für die Audiologie

a) Entwicklung von Sprachtests

Im Rahmen des vorliegenden Verbundprojektes wurde eine Reihe von Sprachtests entwickelt, verbessert bzw. weiterentwickelt (vgl. Tabelle 1).

Die aufgelisteten Verfahren unterscheiden sich vorwiegend in ihrem Sprachmaterial und in der verwendeten Bewertungsmethode. Während einige Sprachtests sowohl konzeptionell als auch vom Sprachmaterial bereits vor Projektbeginn vorlagen und im Rahmen des Projektes nur bearbeitet oder modifiziert werden mußten (z. B. Einsilber-Reimtest, Dreinsilber-Test, Deutsche MAC-Batterie) wurden andere Tests vollständig neu konzipiert und im Rahmen dieses Projektes entwickelt (insbesondere der Zweisilber-Reimtest, Zweisilber-Kinder-Reimtest und der Göttinger Satztest). Dazu waren umfangreiche Untersuchungen zu dem Sprachmaterial und der optimalen Zusammenstellung der Testlisten notwendig, sowie zu der sich anschließenden Validierung des Testmaterials mit normal- und schwerhörigen Versuchspersonen.

Besonders hervorzuheben ist dabei der Göttinger Satztest (Wesselkamp et al., 1992, Wesselkamp, 1994, Kollmeier und Wesselkamp, 1997), der eine schnelle und effiziente Bestimmung von Sprachverständlichkeitsschwellen zuläßt und in der Klinik sofort aufgegriffen wurde. Inzwischen ist der Test auch auf CD in einem kommerziellen Produkt verfügbar (BIRD-Test von Starkey GmbH). Die übrigen Tests (insbesondere der Einsilber-Reimtest nach von Wallenberg und Kollmeier und der Zweisilber-Reimtest nach Kliem und Kollmeier) sind als CD vom Hörzentrum Oldenburg lieferbar. Sämtliche der in Tabelle 1 aufgeführten Meßverfahren

Name des Tests	Testmaterial	Antwortformat	Literatur
Kieler Logatomtest	CVC Einsilber	offen	Müller-Deile (pers. Mitt.)
Einsilber-Reimtest	CVC Einsilber (sinnvoll)	geschlossen, 6 Alternativen 5 Alternativen	Sotscheck, 1982 v. Wallenberg & Kollmeier, 1989
Dreinsilbertest	Einsilber, 3 mal wiederholt	offen	Döring, 1986
Zweinsilber-Reimtest	CVC/ε/oder CVC/εn	geschlossen, 4 Alternativen	Kliem & Kollmeier, 1994
Zweinsilber-Kinder-Reimtest	CVC/ε/oder CVC/εn	geschlossen, 3 Alternativen	Kliem & Kollmeier, 1995
Deutsche MAC-Batterie	Ein- und zweisilber-Sätze	geschlossen, 4/2-3 Alternativ.	Dillier & Spillmann, 1992
Göttinger Satztest	Kurze Sätze	offen, Wortbewertung	Wesselkamp et al., 1992

Tabelle 1: Liste der Sprachverständlichkeits-Meßmethoden mit Literatur-Verweis der im Rahmen des Verbundprojektes verwendeten und weiterentwickelten Verfahren.

sind auf der Sprachverständlichkeits-Untersuchungsstation implementiert und wurden von den beteiligten Kliniken praktisch erprobt (vgl. Arbeitsberichte der Kliniken in der Anlage).

b) Zusammenhang der Ergebnisse der verschiedenen Sprachtests

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde der Göttinger Satztest im Vergleich zu herkömmlichen Tests (Freiburger Sprachverständlichkeitstest) in Hinblick auf Praktikabilität und Validität im routinemäßigen klinischen Einsatz untersucht. Es wurde die Reproduzierbarkeit der Meßergebnisse der unterschiedlichen Verfahren durch Wiederholungsmessungen für ein größeres Kollektiv schwerhörender sowie auch normalhörender Personen überprüft. Der Göttinger Satztest wurde mit festen Darbietungspegeln sowie auch mit einer adaptiven Pegelsteuerung durchgeführt.

Insgesamt wurden 121 Patienten (212 Ohren) mit vorwiegend sensorineuralen Hörstörungen unterschiedlichen Schweregrades (nahezu normalhörend bis hochgradig schwerhörig) sowie Tinnituspatienten in einem Zeitraum von vier bis sechs Monaten untersucht. Die Untersuchungen wurde multizentrisch im Rahmen der klinischen Routineuntersuchungen an mehreren HNO-Kliniken durchgeführt.

Von allen Probanden lag ein kompletten Tonschwellenaudiogramm (Luft- und Knochenleitung) vor. Weiterhin wurde zur Vergleichbarkeit mit den klassischen sprachaudiometrischen Tests der Freiburger Sprachverständlichkeitstest mit einsilbigen Wörtern und Zahlen ohne Störgeräusch durchgeführt. Hierbei wurde für den Zahlentest der Pegel für 50 % Sprachverständnis (SRT) bestimmt, für den Einsilbertest wurde die komplette Diskriminationsfunktion gemessen. Diese Daten wurden mit klinischen Audiometern gewonnen.

Zur Bestimmung der Sprachverständlichkeitsschwelle im Störgeräusch wurde der Göttinger Satztest (Wesselkamp et. al., 1992) verwendet. Die Messungen wurden mit dem computer-gestützten Forschungsaudiometer durchgeführt, wobei sowohl Messungen mit festen Darbietungspegeln durchgeführt wurden, als auch ein adaptives Meßverfahren zur Bestimmung des SRT eingesetzt wurde (Brand und Kollmeier, 1996). Zum Vergleich dazu wurden auch die konventionellen Sprachverständlichkeitstests (Freiburger Einsilber- und Zahlentest sowie der Aachener Dreinsilber-Test mit dem gleichen Störgeräusch durchgeführt. Als Störgeräusch wurde einheitlich ein sprachsimulierendes Rauschen (Sotscheck-Rauschen) verwendet. Das Störgeräusch wurde bei einem Pegel dargeboten, der der Empfindung „mittellaut“ entsprach.

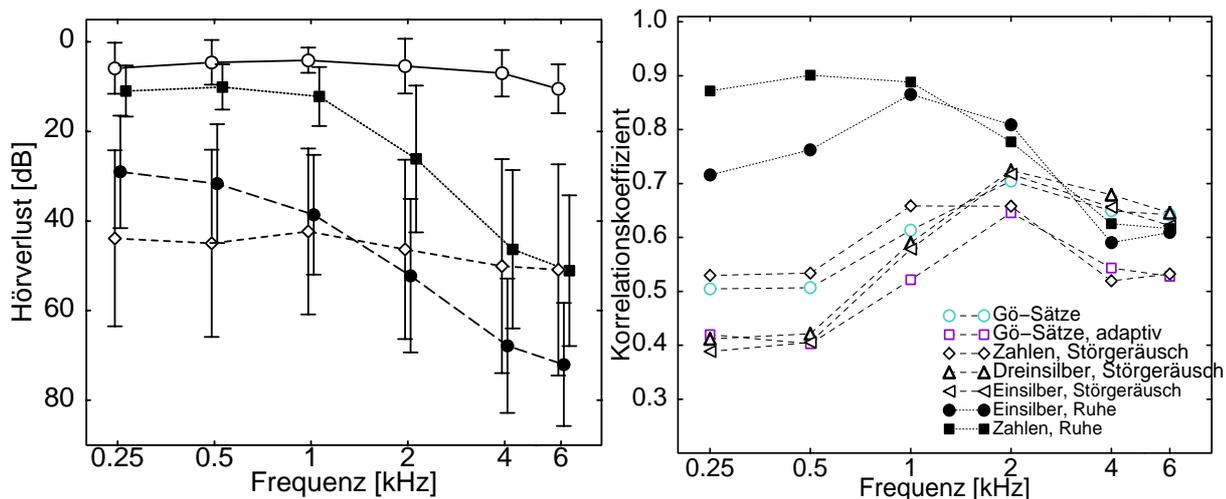


Abb. 3a, 3b: Dargestellt ist links (3a) der gemittelte Luftleitungshörverlust mit Standardabweichung für die untersuchten Probandengruppen. ○: Normalhörende (NH), ■: Hochtonschwerhörigkeit, ◇: Breitbandschwerhörigkeit und ●: „Schrägabfall“. Rechts (3b) ist der Rangkorrelationskoeffizient der gemessenen Sprachverständlichkeitsschwellen mit dem Tonaudiogramm für alle Sprachtests in Ruhe (gefüllte Symbole) sowie in Störgeräusch (offene Symbole) dargestellt.

Die individuellen Lautheitswahrnehmung wurde dazu mit einer breitbandigen Lautheitsskalierung (Hohmann et al., 95) bestimmt.

Zur Analyse der Meßergebnisse wurden die Probanden in 4 Gruppen unterschiedlichen Grades der Schwerhörigkeit nach tonaudiometrischen Befunden gruppiert. Normalhörende (NH) mit weniger als 20 dB Hörverlust zwischen 125 Hz und 6 kHz (N=34, PTA=4.7 ±3.2 dB), Probanden mit Hochtonschwerhörigkeit (Hörverlust < 20 dB unterhalb 1 kHz, N=76, PTA=16±18 dB), Patienten mit einem breitbandigen Hörverlust (BreitbandHV), für die bei allen Frequenzen mindestens 20 dB Hörverlust vorlagen (N=45, PTA=44±19 dB) und hochgradig schwerhörige Patienten mit einem Schrägabfall im Tonaudiogramm (N=73, PTA= 41±12 dB). Hierbei ist PTA (Pure Tone Average) der gemittelte Hörverlust bei 0.5, 1 und 2 kHz. Abbildung 3a zeigt die Mittelwerte und Standardabweichungen der Luftleitungstonaudiogramme für diese vier Probandengruppen.

In der Abbildung 3b ist der Rangkorrelationskoeffizient der ermittelten Sprachverständlichkeitsschwellen mit dem Reintonaudiogramm dargestellt. Für Sprachverständlichkeitsmessungen ohne Störgeräusch ergibt sich eine hohe Korrelation des SRT mit dem Tonaudiogramm besonders bei niedrigen Frequenzen. Das bedeutet, daß Sprachtests in Ruhe ähnliche Eigenschaften des Gehörs abbilden wie sie im Tonaudiogramm zu finden sind. Im Gegensatz dazu zeigen die Messungen mit Störgeräusch eine deutlich geringere Korrelation mit der Ruhehörschwelle. Aus der Hörschwelle kann also nicht ohne weiteres die Sprachverständlichkeit unter Störgeräusch vorhergesagt werden. Daraus ergibt sich, daß insbesondere bei Hochtonschwerhörigkeit eine geringe Sprachverständlichkeit in alltäglichen Situationen mit Störlärm nicht mit den herkömmlichen Sprachtest in Ruhe vorhergesagt werden kann. Die Sprachtests in Störgeräusch testen damit qualitativ andere Eigenschaften des gesunden oder kranken Ohres. Ursache für die geringe Korrelation der Sprachtests in Störgeräusch mit der Hörschwelle könnte die Verzerrungswirkung des Gehörs bei sensorineuraler Schwerhörigkeit sein, die durch den eingeschränkten Hördynamkbereich (Recruitment) verursacht wird.

Die Ergebnisse der Sprachverständlichkeitsschwellen in den 4 Probandengruppen sind in Abbildung 4 dargestellt. Der absolute Wert der Schwelle für den Freiburger Zahlentest liegt deutlich unter der Schwelle der anderen Tests. Die Ursache dafür könnte die Redundanz des Zahlenmaterials oder auch eine andere Definition des Signal-Rausch-Verhältnisses sein.

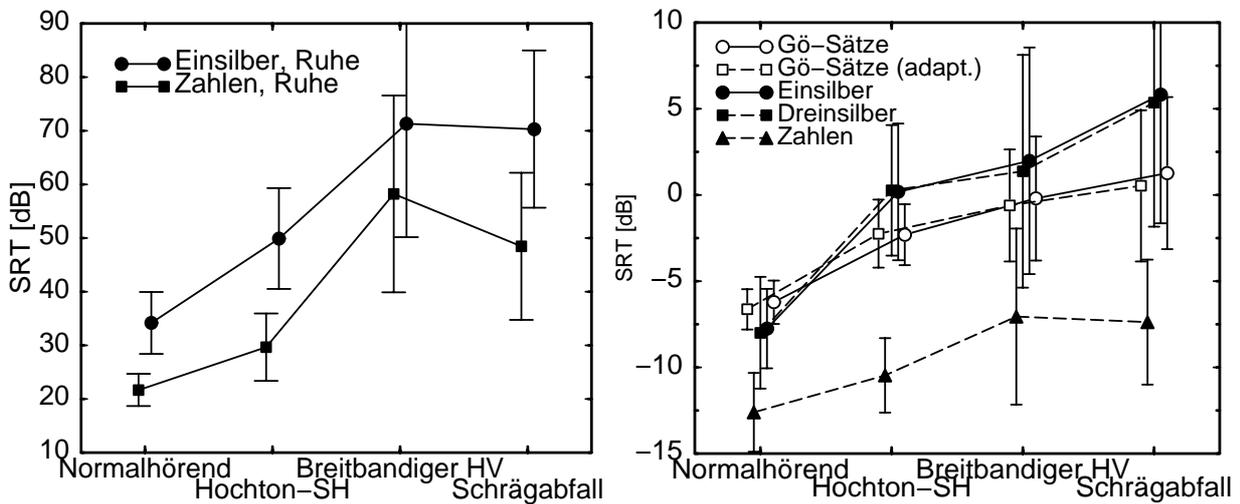


Abb. 4: Sprachverständlichkeitsschwelle für Sprachtests in Ruhe (links) und Störgeräusch (rechts) für alle Probandengruppen

Zum einen steigt die Sprachverständlichkeitsschwelle in Ruhe sowie im Störgeräusch mit zunehmendem Hörverlust an. Zum anderen wächst die interindividuelle Streuung mit zunehmendem Hörverlust für alle durchgeführten Sprachverständlichkeitstests.

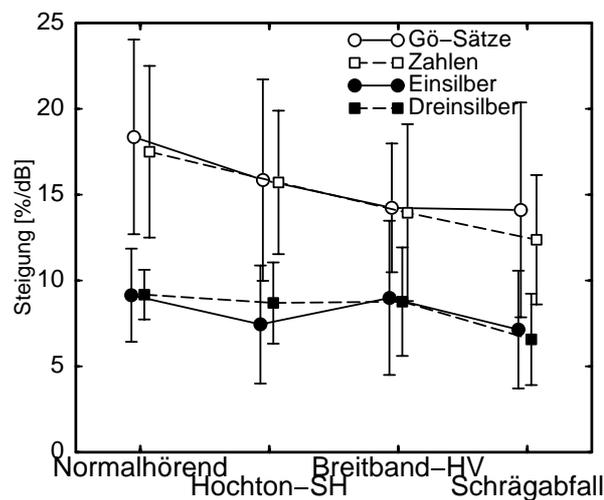


Abb. 5: Steigung der Diskriminationsfunktion für die Sprachverständlichkeitstests in Störgeräusch mit interindividuellen Abweichungen

In der Abbildung 5 ist die Steigung der Diskriminationsfunktion für Sprachtests in Störgeräusch dargestellt. Für alle Probanden ist die Steigung der Diskriminationsfunktion für den Göttinger Satztest bzw. den Zahlentest signifikant größer als für den Einsilber bzw. Dreinsilber-Test. Für Normalhörende findet man beim Göttinger Satztest eine Steigung von etwa 18 %/dB gegenüber 9 %/dB für den Einsilber/Dreinsilber-Test, was mit den Literaturdaten (Kollmeier, 1996 b) übereinstimmt. Ursache für die deutlich höhere Steigung der Diskriminationsfunktion ist die Redundanz der vollständigen Sätze bzw. der dargebotenen Zahlen. Mit zunehmendem Grad der Schwerhörigkeit (Normalhörend - Hochtonverlust - Breitbandhörverlust - Schrägabfall) nimmt die Steigung der Diskriminationsfunktion für alle untersuchte Sprachtests ab. Auch dies ist ein Zeichen für eine Fehlhörigkeit bei cochleärer Schwerhörigkeit, die wahrscheinlich durch Schädigung der äußeren Haarzellen den Ausfall aktiver Prozesse bewirkt. Der eingeschränkte Restdynamikbereich verursacht eine gegenüber Normalhörenden „verzerrte“ Wahrnehmung. Die Folge ist eine gegenüber Normalhörenden verringerte Zunahme der Verständlichkeit bei Verbesserung des Signal-Rausch-Abstands.

Zur Bestimmung der intraindividuellen Streuung der gemessenen Sprachverständlichkeitsschwellen wurde für die Sprachtests in Störgeräusch die Differenz des SRT zwischen erster und

Wiederholungsmessung sowie die Standardabweichung dieser Größen berechnet. In Tabelle 2 sind die Ergebnisse der Test-Retest-Messungen dargestellt. Die statistische Analyse zeigt, daß die Streuung der Schwellenmessung für den Freiburger Einsilber-Test sowie den Dreinsilber-Test auf dem 0.1% Signifikanzniveau größer als die des Göttinger Satztests und des Freiburger Zahlentests ist. Weiterhin zeigt sich für den Göttinger Satztest eine statistisch signifikante (0.1%

	N	SRT (Test-Retest) [dB]	Std.Abw. [dB]	Meßdauer [s]
Gö-Sätze	239	0.3	1.85	198±58
Gö-Sätze (adaptiv)	159	0.3	1.93	225±16
Einsilber	125	-0.4	2.51	208±56
Dreinsilber	127	-0.2	2.49	340±126
Freiburger Zahlen	127	0.1	2.01	146±32

Tabelle 2: Test-Retest Vergleich der untersuchten Sprachverständlichkeitstest im Störgeräusch. Angegeben ist die Anzahl der Untersuchungen, die Differenz des SRT zwischen erster Messung und Wiederholungsmessung und die Standardabweichung der intraindividuellen Streuung. In der letzten Spalte ist die mittlere Meßdauer für eine Messung angegeben

Niveau) Verbesserung des SRT der Wiederholungsmessung gegenüber der ersten Messung um im Mittel 0.3 dB (Wilcoxon-Test). Dieser kleine Lerneffekt kann nur für den Göttinger Satztest nachgewiesen werden, da hier eine größere Anzahl von Probanden untersucht wurde und eine kleine Streuung der Daten vorliegt. Betrachtet man die Abhängigkeit der intraindividuellen Streuung vom Hörverlust, so ergibt sich keine signifikante Zunahme der Streuung mit dem Hörverlust.

Die ebenfalls in Tabelle 2 angegebene Meßdauer wurde für jede einzelne Messung protokolliert. Die Meßdauer des Freiburger Zahlentest ist deutlich geringer, die des Dreinsilber-Tests größer als die der anderen untersuchten Tests. Aufgrund der fest vorgegebenen zwei Testlisten für den adaptiven Satztest ist die Streuung der Meßzeit hier am geringsten, wobei die adaptive Versuchsdurchführung erstaunlicherweise keinen Zeitgewinn gegenüber der Darbietung mit festen Pegeln bietet.

c) Kategoriale Lautheitsskalierung

Im Rahmen des Verbundprojektes wurde für die klinische Audiometrie die Methode der kategorialen Lautheitsskalierung weiterentwickelt und validiert, die auf der von Heller, 1985 vorgeschlagenen Methode basiert und von Hellbrück und Moser, 1985 für die Anwendung in der Audiometrie als „Würzburger Hörfeldskalierung“ eingeführt wurde. Die im Projekt durchgeführte Modifikation baut auf Arbeiten von Kollmeier, 1990 b, Hohmann, 1993 und Hohmann und Kollmeier, 1995 auf. Sie wird im folgenden als „Oldenburger Hörflächenskalierung“ bezeichnet und die dazu durchgeführten Arbeiten werden im Rahmen eines in Druck befindlichen Buchs eingehend vorgestellt und diskutiert (Kollmeier, 1997). Aus dem Kreise der Verbundprojektpartner liegt bereits eine Reihe von Veröffentlichungen vor, die entweder die kategoriale Lautheitsskalierung selbst zum Thema haben oder sie als Methode für andere Themen (z. B. Anpassung technischer Hörhilfen) einsetzen (Bachmann et al., 1996, Hohmann, 1993, Hohmann und Kollmeier, 1995, Hohmann et al., 1995, Holube 1993, Holube und Kollmeier, 1994, Kießling, 1996a, b, Kießling et al., 1993, 1995, 1996a, b, Kollmeier, 1990, 1992a, b, 1996a, b, Kollmeier und Hohmann, 1995, Launer, 1995, Launer et al., 1994, 1995, Meister u. v. Wedel, 1995a, b, Sander u. Launer, 1995).

Die Parameterfestlegung für das Verfahren erfolgte aufgrund umfangreicher experimenteller bzw. theoretischer Studien, die auf den Arbeiten von Hohmann, 1993, Hohmann und Kollmeier, 1995 und Brand et al., 1997 beruhen. Als Grundlage für diese methodologischen Fragestellungen wurden die psychoakustischen Fragen zur Lautheitsskalierung in Oldenburg insbesondere im Zusammenhang mit dem Graduiertenkolleg „Psychoakustik“ untersucht

(Hohmann et al., 1995, Launer, 1995, Launer et al., 1995, Kollmeier, 1997, Kap. 2). Die klinische Wertigkeit der Hörflächenskalierung wurde durch den Vergleich der Hörflächenskalierung mit anderen klinisch-audiologischen Diagnostik-Verfahren untersucht, wobei dies in den Arbeiten von Kießling, 1996b, Kießling et al., 1996a, 1993, 1995, Hornig et al., 1996 und Kollmeier, 1997 (Kap. 4) dargestellt wird (vgl. auch die beiliegenden Arbeitsberichte der Kliniken, insbesondere Köln und Gießen). Weiterhin wurde die kategoriale Lautheitsskalierung für die Auswahl, Anpassung und Weiterentwicklung von technischen Hörhilfen untersucht (Kießling, 1996a, Kießling et al., 1995, 1996b, Meister u. v. Wedel, 1995b, 1996a, b, Hohmann, 1993, Kollmeier, 1997 (Kap. 5)).

Die wichtigsten Ergebnisse dieser Vielzahl von verschiedenen Untersuchungen mit unterschiedlichen Fragestellungen und Patientengruppen sind:

- die kategoriale Lautheitsskalierung eignet sich bei richtiger Durchführung hervorragend für die Hördiagnostik und Hörgeräteanpassung und -überprüfung
- die kategoriale Lautheitsskalierung ist ein sehr guter Recruitment-Indikator, der sich auch bei zweiseitigem Hörverlust zuverlässig einsetzen läßt und mit anderen zuverlässigen Recruitment-Parametern (z. B. Fowler-Test und Metz-Kriterium) sehr gut korreliert
- anhand der kategorialen Lautheitsskalierung lassen sich Aussagen über die gestörte kompressive Nichtlinearität des peripheren auditorischen Systems zuverlässig treffen
- für die Hörgeräte-Anpassung liefert die kategoriale Lautheitsskalierung eine verlässliche Hilfe
- die aufgrund der Ergebnisse der kategorialen Lautheitsskalierung bei schwerhörigen Patienten gewonnenen Erkenntnisse und Modellvorstellungen lassen sich in moderne Konzepte zur Recruitment-Kompensation von „intelligenten“ Hörgeräten einsetzen.

Für eine detailliertere Diskussion und Übersicht über die Zusammenhänge sei auf die zitierte Literatur und insbesondere auf das in Druck befindliche Buch (Kollmeier, 1997) verwiesen, das einen wesentlichen Teil der Ergebnisse des Verbundprojektes beinhaltet.

Tabelle 3 zeigt eine Übersicht über verschiedene Verfahren zur kategorialen Lautheitsskalierung.

2.1.3 Einführung adaptiver Meßverfahren in die Audiologie

Ein wesentlicher Nachteil der oben beschriebenen, neuen computergesteuerten Meßverfahren für die klinische Audiometrie ist ihr relativ hoher Zeitaufwand, der aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen resultiert. Aufgrund der Tatsache, daß pro Zeiteinheit nur eine bestimmte Zahl von Antworten von den Patienten gegeben werden kann, ist die in einer audiometrischen Messung erfaßbare Information (und damit die Meßgenauigkeit) direkt von der Meßzeit abhängig. Bei diesem Dilemma zwischen Erhöhung der Genauigkeit und der damit verbundenen Erhöhung der notwendigen Meßzeit ist man gezwungen, zu einem optimalen Kompromiß unter optimaler Ausnutzung der zur Verfügung stehenden Zeit bzw. der vom Patienten aufgebrauchten Geduld zu kommen. Daher ist die Einführung von adaptiven Verfahren in die Audiometrie unumgänglich, d. h. Verfahren, die in unmittelbarer Reaktion auf die Antwort der Versuchsperson den Parameter der Messung (z. B. den Darbietungspegel) adaptiv variieren. Derartige Verfahren lassen sich praktisch nur durch Computer-Einsatz realisieren, so daß auf keine entsprechende Verfahren der konventionellen Audiometrie zurückgegriffen werden konnte. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden daher adaptive Verfahren insbesondere für die Sprachaudiometrie in Ruhe (Einsilber-Reimtest) und die Sprachaudiometrie unter Störgeräusch (Göttinger Satztest) entwickelt und erprobt (Brand und Kollmeier, 1996, Brand und Kollmeier, 1994, Brand et al., 1995, Brand et al., 1996 (Bad Zwischenahn)).

Verfahren	Pascoe (1986)	LGOB (1990)	IHAFF (v.Vliet,1995)	Heller (1985)	Oldenburger Hörflächenskala
Anzahl der Antwort-Kategorien	9+1	5+1	7	50+1	10+1
Einstufiges/zweistufiges Verfahren	einspurig	einstufig	einstufig	zweistufig	einstufig
Anzahl der angebotenen Stimuluspegel pro Frequenz	5 dB-Stufen	15	5 dB(bzw. 2.5 dB)-Stufen		7
Darbietungen des Pegels pro Messung		1	mind. 4		2
Auswahl des Pegelbereichs	fest	adaptiv (Vormessung)	adaptiv (Vormessung)	fest	adaptiv (Vormessung)
Abfolge der Stimulus-Pegel	aszendierend	zufällig	aszendierend	zufällig	Pseudo-Zufall (Stufenbegrenzung)
Verwürfelung der Stimulusfrequenzen	nein	ja	nein		optional
Verwürfelung der Darbietungsseite (links/rechts)	nein	nein	nein		optional
Angepaßte Zielfunktion		Polygonzug		Polygonzug	Geraden (+ Begrenzung)
Darstellung der Ergebnisse	Isophone	Lautheitsfunktion/ Isophone	Lautheitsfunktion	Lautheitsfunktion/ Isophone	Lautheitsfunktion/ Isophone
Steuerung	manuell	Computer		manuell	Computer

Tabelle 3: Vergleich verschiedener Verfahren zur kategorialen Lautheitsskalierung (unvollständig). Bei den leeren Feldern liegt keine Information über die entsprechenden Parameter vor.

Für den Göttinger Satztest konnten zwei adaptive Pegelsteuerungen entwickelt werden, die eine schnelle und genaue Bestimmung des zu 50% Sprachverständlichkeit gehörenden Pegels L_{50} ermöglichen. Eine der beiden adaptiven Pegelsteuerungen ist computergesteuert und erfordert daher einen Steuerrechner und ein computersteuerbares Audiometer. Das andere Verfahren wurde gegenüber dem erstgenannten vereinfacht, so daß es manuell durchführbar ist. Seine Meßgenauigkeit ist gegenüber rechnergesteuerten Verfahren geringfügig reduziert.

Für eine signifikante Bestimmung des L_{50} sind mit beiden Verfahren 2 Testlisten. d.h. insgesamt 20 Sätze erforderlich. Bei einem Zeitaufwand von 10 Minuten kann so eine Genauigkeit (Standardabweichung) der L_{50} Schätzung von ca. 1 dB erreicht werden. Diese Genauigkeit ist ausreichend, um signifikant zwischen zwei Hörsituationen, z.B. versorgt bzw. unversorgt, zu unterscheiden, wenn sich die beiden gemessenen L_{50} Pegel um mehr als 2 dB unterscheiden.

Die Bestimmung des Verlaufs der Verständlichkeitsfunktion des Einsilber-Reimtests ist ebenfalls mit einem adaptiven Verfahren möglich. Hierbei werden der L_{50} , die Steigung und die maximale Verständlichkeit bestimmt. Der hierfür erforderliche Zeitaufwand beträgt mindestens 30 Minuten. Erreicht der Patient auch bei hohen Darbietungspegeln nicht annähernd 100% Verständlichkeit, so ist für eine genaue Steigungsbestimmung eine große Anzahl von Einzelmessungen erforderlich. Durch ein Stabilitätskriterium, daß die Schwankungen der drei Schätzparameter berücksichtigt, kann festgestellt werden, wann eine Messung die vorgegebene Genauigkeit erreicht hat und deswegen beendet werden kann.

Die manuell durchführbare adaptive Pegelsteuerung ist in dem kommerziell verfügbaren BIRD-Test (Firma Starkey GmbH, Norderstedt) implementiert worden.

Eine weitere Anwendungsmöglichkeit adaptiver Pegelsteuerungen ergibt sich bei der bereits oben beschriebenen kategorialen Lautheitsskalierung, bei der die adaptive Pegelsteuerung vorwiegend die Vormessung betrifft. In dem bisher benutzten Verfahren mußte in der Vormessung der Pegelbereich zwischen Ruheschwelle und Unannehmbarkeitsschwelle durch einen im Pegel aufsteigenden Stimulus erfaßt werden, bevor die eigentlich Messung beginnen kann. Durch den Einsatz eines adaptiven Pegelverfahrens nach Brand et al., 1997 und Brand, 1997 (in Kollmeier, 1997) wird diese Anfangs-Phase der Hörflächenskalierung bereits in die Messung integriert. In der Anfangs-Phase der Messung wird der Pegelbereich der angebotenen Stimuli dabei schrittweise erweitert, bis die Unannehmlichkeitsschwelle einerseits bzw. die Ruheschwelle andererseits erreicht ist (adaptive Start-Phase). Anschließend wird wie bei der bisherigen kategorialen Lautheitsskalierung verfahren. Dieses Verfahren der adaptiven Hörflächenskalierung ist auf breites Interesse gestoßen, insbesondere im Kreis der Hersteller von Audiometrie-Meßtechnik, so daß mit einer Umsetzung in kommerziell erhältliche Produkte in der nächsten Zukunft zu rechnen ist.

2.1.4 Binaurale Testverfahren

Während in der bisher etablierten Routine-Audiometrie eine Hör-Diagnostik für beide Ohren seitengetreunt durchgeführt wird, lag ein Schwerpunkt der Methodenentwicklung im hier dargestellten Projekt auf dem Bereich des binauralen Hörens, d. h. der im Gehirn stattfindenden Interaktion zwischen den an beiden Ohren empfangenen akustischen Informationen. Diese binaurale Interaktion ist eine wesentliche Voraussetzung für die akustische Lokalisation und die Fähigkeit von normalhörenden Personen, in einer geräuschbehafteten Umgebung die störenden Anteile zu unterdrücken und das „gewünschte“ Signal (z. B. Sprache) dennoch zu verstehen. Da die verringerte Sprachverständlichkeit unter komplexen akustischen Situationen zu den häufigsten Beschwerden von schwerhörigen Patienten gehört, ist eine suffiziente Diagnostik dieser Leistung sowohl im Hinblick auf die Hördiagnostik als auch im Hinblick auf die optimale Rehabilitation mit Hörgeräten von entscheidender Bedeutung. Im vorliegenden Projekt wurde daher einerseits die Bestimmung binauraler Leistungen von Schwerhörigen anhand von psychoakustischen Meßmethoden verfolgt (Holube, 1993, Holube und Kollmeier, 1994) und andererseits wurde die Sprachverständlichkeit unter komplexen (simulierten) räumlichen Störschall/Nutzschallsituationen ausgemessen (Peissig, 1992, Wesselkamp, 1994, Peissig und Kollmeier, Kollmeier und Wesselkamp, 1997, Kühnel und Kollmeier, 1997).

Bei den Untersuchungen zum Zusammenhang zwischen psychoakustischen Größen und Sprachverständlichkeit ergeben sich die folgenden Folgerungen (Holube, 1993):

- Die Schwerhörigen zeigen unterschiedlich starke Einschränkungen der psychoakustischen Parameter, die besonders bei den binauralen Leistungen und der Hörfähigkeit bei hohen Frequenzen auftreten.
- Die Sprachverständlichkeitsparameter ILD und BILD stehen in Beziehung zur BMLD (Binaural Masking Level Difference) und der Mithörschwellendifferenz auf dem schlechteren Ohr aus den Experimenten zur Bestimmung der Frequenzgruppenbreite. Insofern kann ein gewisser Zusammenhang zwischen psychoakustischen Experimenten zum binauralen Hören und Sprachverständlichkeits-Experimenten zum binauralen Hören aufgestellt werden.
- Offensichtlich werden verschiedene Fähigkeiten des auditorischen Systems in einer nichtvorhersagbaren Weise durch Innenohrschwerhörigkeit gestört, so daß keine einfachen Gesetzmäßigkeiten zwischen den Verminderungen unterschiedlicher Leistungen (d. h. monauraler und binauraler psychoakustischer und sprachverständlichkeits-relevanter Leistungen) auftreten. Damit scheint Schwerhörigkeit ein diffuser, multilokaler Degenerationsmechanismus zu sein, der in seinen Auswirkungen bei den individuellen Patienten schwer erfaßbar ist.

Als Konsequenz ergibt sich daraus, daß die binauralen Leistungen bei der Sprachverständlichkeits-Bestimmung sich nicht aus anderen audiometrischen Parametern beim individuellen

Patienten vorhersagen lassen. Zur vollständigen Charakterisierung eines Hörverlustes (insbesondere auch zur Bestimmung der reduzierten Sprachverständlichkeit unter Störgeräusch) ist daher die Bestimmung der Sprachverständlichkeit unter binauralen Situationen notwendig.

Zusätzlich zu den in Abschnitt 2.1.2 c beschriebenen monauralen Messungen, bei denen Nutz- und Störschall durch Faltung mit der entsprechenden Außenohrimpulsantwort der Vorne-Richtung dargeboten werden (S_0N_0), wurden räumliche Störschall-Nutzschallsituationen zur Bestimmung der ILD (Intelligibility level difference) und BILD (Binaural intelligibility level difference) untersucht. Hierbei wurden die Signale aus $\pm 45^\circ$ Richtung dargeboten. Die ILD beschreibt den gesamten Gewinn der Sprachverständlichkeit in einer Störschall-Nutzschallsituation, bei der Nutzsignal und Störsignal räumlich getrennt dargeboten werden: $ILD = SRT(S_0N_0) - SRT(S_{315}N_{45})$, binaural. Die BILD beschreibt nur den Gewinn an Sprachverständlichkeit, der sich aus der binauralen Verarbeitung ohne Berücksichtigung eines Kopfabschattungseffektes ergibt: $BILD = SRT(S_{315}N_{45})_{\text{monaural}} - SRT(S_{315}N_{45})_{\text{binaural}}$. Die Messungen wurden mit dem Göttinger Satztest mit festen Darbietungspegeln durchgeführt. Abbildung 6 zeigt die Meßergebnisse für die unterschiedlichen Probandengruppen. Ähnlich wie bei den anderen audiometrischen Daten erkennt man eine systematische Abhängigkeit beider Größen vom Hörverlust. Die ILD ist signifikant (1%-Niveau) mit den тонаudiometrischen Daten negativ korreliert. Die BILD liegt bei Normalhörenden in der Größenordnung von 5 dB und nimmt mit zunehmender Schwerhörigkeit ab. Man erreicht somit schnell die Grenze der Meßgenauigkeit der Sprachverständlichkeitsmessungen von etwa ± 2 dB für die ILD/BILD-Messungen. Die BILD zeigt nur wenig signifikante Korrelation mit den anderen Daten. Möglicherweise ist die Messung der BILD noch nicht genau genug, um entsprechende Aussagen zu machen.

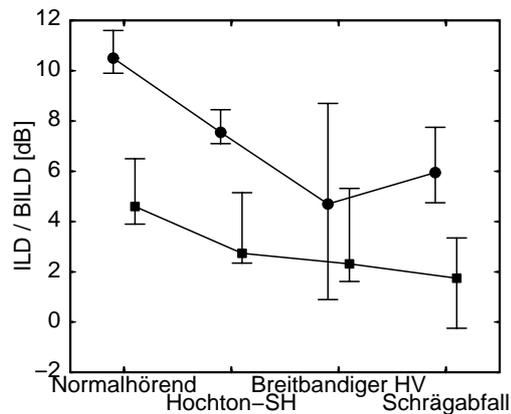


Abbildung 6: ILD (●) und BILD (■) für die unterschiedlichen Probandengruppen

2.1.5 Anpassungsverfahren für Hörgeräte

Die oben diskutierte, im Rahmen des Projektes weiterentwickelte Methode der kategorialen Lautheitsskalierung ist sehr gut zur Präsiktion von Dynamikkompansions-Hörgeräten geeignet, d. h. Hörgeräten, die das Recruitment-Phänomen bei Schwerhörigen zu kompensieren versuchen. Die Eignung dieses Verfahrens und die dabei zu beachtenden Besonderheiten wurden im Rahmen dieses Projektes im Rahmen von mehreren Studien untersucht (Hohmann, 1993, Kießling et al., 1996 b, 1995 a, Bachmann et al., 1996, Kießling, 1996, a und b, Kollmeier, 1996).

Zusätzlich kann eine adaptive, interaktive Form der kategorialen Lautheitsskalierung bei der Anpassung von Hörgeräten direkt eingesetzt werden, um nicht nur eine Präsiktion der Hörgeräte-Einstellung, sondern eine direkte, aufgrund von Patientenurteilen erfolgende Einstellung des Hörgerätes zu erzeugen. Dieser Gedanke ist Grundlage des in Gießen im

Rahmen des Projektes entwickelten Verfahren ScalAdapt, das inzwischen Eingang in kommerzielle Audiometrie-Systeme gefunden hat (Aurical Danasound der Firma GN Danavox) (Kießling et al., 1996 b, Kießling et al., 1995 a, Kießling, 1996). Weiterhin kann die kategoriale Lautheitsskalierung zur Überprüfung einer Hörgeräteanpassung herangezogen werden, indem der Patient mit dem Hörgerät die Lautheitsskalierung durchführt (Meister und von Wedel, 1996, 1995, Bachmann et al., 1996). Zusätzlich wurden weitere Verfahren zur Erfassung des subjektiven Benefit eines Hörgerätes im versorgten Zustand entwickelt. Dazu zählt zum einen ein speziell für die Bedürfnisse von Hörgeräteträgern entwickelter Fragebogen, „das Oldenburger Inventar“ (Holube und Kollmeier, 1994, Holube, 1993) sowie ein in das Deutsche übertragene Frageninventar des Göteborger Profils (Kießling et. al., 1996 c). Weiterhin können subjektive Skalierungsverfahren der Sprachverständlichkeit und Sprachqualität (Wesselkamp, 1994, Peissig und Kollmeier, 1997, Kollmeier und Wesselkamp, 1997) eingesetzt werden und die bereits oben beschriebenen Methoden der Sprachaudiometrie. Insgesamt wurde daher im Rahmen des vorliegenden Projekts ein breit angelegtes und inzwischen gut validiertes Instrumentarium von Methoden zur Anpassung und Überprüfung technischer Hörhilfen entwickelt, die vorwiegend unter Computerunterstützung mit der entwickelten Sprachverständlichkeits-Untersuchungsstation einsetzbar sind.

2.1.6 Theoretische Untermauerung der entwickelten und validierten Methoden

Neben der praktischen Entwicklung von neuen, computergesteuerten Meßverfahren für die klinische Audiometrie ist es wichtig, quantitative Vorstellungen von den Größen zu entwickeln, die mit diesen Meßmethoden überhaupt erfaßt werden sollen. Dies wird einerseits benötigt, um die Vorgänge bei der Innenohrschwerhörigkeit hinreichend genau charakterisieren zu können und andererseits, um den inneren Zusammenhang zwischen den verschiedenen Meßverfahren erfassen zu können, so daß die Wertigkeit der einzelnen Meßverfahren dadurch abgeschätzt werden kann. Im Rahmen des vorliegenden Projekts ist daher ein wichtiges Ergebnis die Entwicklung von einschlägigen Modellvorstellungen zum Sprachverstehen bei Normalhörenden und bei Innenohrschwerhörigen (Holube, 1993, Wesselkamp 1994, Holube und Kollmeier, 1996, Holube, 1996, Kollmeier et al., 1995, Kollmeier, 1996 a). Die ersten Ansätze zur quantitativen Modellierung der Sprachverständlichkeit in Ruhe und Störgeräusch als Funktion des Tonaudiogramms basieren auf den spektralen Methoden des Articulation Index (Kryter, 1967) bzw. Speech Transmission Index (Houtgast und Steeneken, vgl. Kollmeier, 1990 a). Diese Methoden beruhen ausschließlich auf der Veränderung des Sprachspektrums durch eine Hörschädigung und können zeitliche Effekte und Effekte der bei Innenohrschwerhörigen veränderten Zeit- und Frequenzauflösung nicht vorhersagen (vgl. Holube, 1996).

Einen grundlegend anderen Ansatz versucht daher das ursprünglich in Göttingen entwickelte und dann in Oldenburg weiterentwickelte und modifizierte Perzeptionsmodell nach Dau et al. (1996), das zur Vorhersage der Sprachverständlichkeit von Normal- und Schwerhörigen von Holube (1993) erfolgreich eingesetzt wurde. Dabei ist es möglich, sowohl den Hörverlust als auch andere gestörte psychoakustische Parameter (wie veränderte Zeit- und Frequenzauflösung) einzufügen und eine befriedigende Vorhersage der reduzierten Sprachverständlichkeit in Ruhe und Störgeräusch zu erlangen. Eine Erweiterung dieses Modells im Hinblick auf die adäquate Modellierung des Recruitment-Phänomens ist Gegenstand laufender Arbeiten im Rahmen des Graduiertenkollegs „Psychoakustik“ in Oldenburg (Derleth et al., 1997). Außerdem ist eine Erweiterung dieses Modells auf binaurale Situationen wünschenswert, die in ersten Ansätzen bereits erfolgt ist (Holube et al., 1995, Zerbs und Holube, 1996). Die im Rahmen des vorliegenden Projekts erreichte Modellierung des geschädigten peripheren auditorischen Systems kann jedoch zu einer für die klinische Audiometrie ausreichenden Vorhersage der Beziehung zwischen Tonaudiogramm, psychoakustischen Leistungen und Sprachaudiometrie gelangen.

2.2 Darstellung des voraussichtlichen Nutzens insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses und der Erfahrungen

2.2.1 Wissenschaftlicher Nutzen

Die neu entwickelten Meßverfahren und der für ihren Gebrauch entwickelte theoretischer Hintergrund stellen erstmals einen erfolgversprechenden Ansatz zur quantitativen Beschreibung von Innenohrhörstörungen auf, von dem eine Reihe weiterer Entwicklungen ausgehen können. Diese Entwicklungen reichen von der genaueren Erfassung eines individuellen Hörverlusts über die quantitative Erfassung und Abschätzung des Nutzens einer Hörgeräteversorgung für den individuellen Patienten bis zur Konstruktion verbesserter, „intelligenter“ digitaler Hörgeräte. Aus Sicht der Wissenschaft birgt eine adäquate Modellierung eines Hörverlusts auch die Chance in sich, das normale Hörvermögen genauer zu beschreiben, da man aus Störungen eines Systems immer Schlüsse auf das ungestörte Funktionieren des Systems ziehen kann. Obwohl die Wissenschaft noch weit entfernt von einem vollständigen Verständnis des menschlichen Hörens ist, versprechen die im Rahmen dieses Projektes gewonnenen Erkenntnisse einen deutlichen Fortschritt.

2.2.2 Klinisch- und praktisch-audiologischer Nutzen

Für die Diagnostik von Hörstörungen, ihre Begutachtung und die Anpassung und Überprüfung von Hörgeräten sind die im Rahmen des Projektes entwickelten Methoden von sehr großem Nutzen. Insbesondere wird durch die Entwicklung des Göttinger Satztestes eine Sprachaudiometrie unter Störgeräusch für die Praxis verfügbar (u. a. durch die kommerzielle Verfügbarkeit des BIRD-Tests). Weiterhin kann durch die Methode der kategorialen Lautheitsskalierung, die derzeit auf verschiedenen kommerziellen Audiometern bereits verfügbar ist, die Recruitment-Diagnostik und die Anpassung nichtlinearer Hörgeräte wesentlich verbessert werden. Das im Rahmen des Projektes insgesamt entwickelte Testinventar ist außer in den beteiligten Kliniken bereits auch schon in anderen Kliniken mit Erfolg zum Einsatz gelangt, so daß von einer deutlichen Ausweitung des Nutzerkreises innerhalb der nächsten Jahre auszugehen ist.

2.2.3 Technische und kommerzielle Verwertbarkeit der Ergebnisse

Da der Hauptteil der im Rahmen dieses Projektes erzielten Ergebnisse sich auf (medizinische) Diagnoseverfahren und wissenschaftliche Untersuchungsmethoden bezieht, die prinzipiell nicht patentierbar sind, ist die kommerzielle Verwertbarkeit (im Sinne von einer Lizenzierung an bestimmte Hersteller von entsprechenden Geräten) unrealistisch. Statt dessen ist zu erwarten, daß verschiedene Hersteller die de-facto-Standards in ihre Produkte übernehmen, die durch die Entwicklungen des Verbundprojektes geschaffen wurden (z. B. im Bereich der Sprachtests und der kategorialen Lautheitsskalierung). Um dies zu erreichen, wurde bereits frühzeitig mit mehreren Herstellern von Audiometrie-Meßtechnik Kontakt aufgenommen. Beispielsweise wurden in einer Präsentationsveranstaltung in Kiel (1992) die grundlegenden Konzepte und Meßverfahren verschiedenen Herstellern erklärt. Darauf aufbauend haben bereits die neuesten Generationen von Audiometer ähnliche Elemente eingebaut, wie sie in den Entwicklungen des Projekts vorgegeben wurden (z. B. vollständige Rechner-Steuerung des Audiometers, digitale Signalverarbeitung für die Freifeldentzerrung, frei konfigurierbare Testverfahren und Signale). Die im Rahmen des Projekts entwickelte Software wird von den beteiligten Universitäten (insbesondere der Universität Oldenburg) weiterentwickelt und gepflegt. Zentrale Rolle wird dabei das an der Universität Oldenburg u. a. für diesen Zweck gegründete An-Institut „Hörzentrum Oldenburg GmbH“ einnehmen, dessen mittelfristiges Ziel die Erstellung eines marktgängigen Audiometrie-Systems ist, das auf den Ergebnissen des hier dargestellten Verbundprojektes aufsetzt.

Der Nutzen bzw. die Bedeutung des Projektes für die deutschsprachige Industrie läßt sich u. a. daran ablesen, daß im Laufe des Projektes eine wissenschaftliche Mitarbeiterin und fünf wissenschaftliche Mitarbeiter der Universität Oldenburg, die mittelbar oder unmittelbar an dem Projekt beteiligt waren, in die einschlägige Industrie gewechselt sind und so einen entsprechenden know-how-Transfer vollzogen haben: Dr. Christian Müller (Ascom-Audiosys, Bern), Dr. Andres Sander (Starkey-Laboratories GmbH, Norderstedt), Dr. Stefan Launer (Phonak AG, Stäfa, Schweiz), Dr. Inga Holube und Dr. Matthias Wesselkamp (Siemens Audiologische Technik, Erlangen) und Dr. Jürgen Peissig (Sennheiser Elektronik KG, Wedemark). Durch diese Entwicklung wird zum einen das große Interesse der Industrie an dem im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Arbeiten deutlich und zum anderen ist dadurch sichergestellt, daß die Arbeitsergebnisse in einem möglichst breiten Umfeld von Klinik, Wissenschaft und Industrie in die Praxis umgesetzt werden, ohne daß eine bestimmte Institution den alleinigen Nutzen aus der Förderung zieht.

2.3 Darstellung des bekanntgewordenen Fortschritts auf diesem Gebiet bei anderen Stellen

Auf dem Gebiet der Sprachaudiometrie wurden im deutschsprachigen Raum an anderer Stelle einige neue Testverfahren entwickelt, die sämtlich auf dem vom hier beschriebenen Verbundprojekt ausgerichteten Symposium „Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie“ im Januar 1992 in Seeburg präsentiert und in dem Tagungsband zusammengefaßt wurden (Kollmeier, 1992 c). Besonders sei dabei auf die Entwicklungen von Dillier und Spillmann hingewiesen, die eine deutschsprachige Testbatterie für den Einsatz bei hochgradig Schwerhörigen und Cochlea-Implantat-Trägern entwickelt haben, die im Rahmen des Verbundprojektes auch auf der Untersuchungsstation implementiert wurde (Dillier und Spillmann, 1992). Außerdem sei auf den Basler Satztest verwiesen (Tschopp und Ingold, 1992), der in Analogie zum englischsprachigen SPIN-Satztest (Kalikow et al., 1977) konstruiert wurde, aber bisher keine weitreichende praktische Bedeutung erlangt hat. Im europäischen Kontext wurden in dem von der EU (Projektbereich TIDE) geförderten Projekt DICTUM Test- und Trainingsmethoden für hochgradig Schwerhörige und Cochlea-Implantat-Benutzer entwickelt, bei denen die audiovisuelle Interaktion im Vordergrund stand. Eine deutschsprachige Version der dabei erstellten Trainingsprogramme und der Testumgebung ist jedoch nicht verfügbar. Allerdings ist bei diesem Projekt relativ wenig Gewicht auf die akustische Darbietung gelegt worden, während der Aspekt der audiovisuellen Darbietung bei dem vorliegenden Projekt keine Beachtung gefunden hat, so daß eine Kombination beider Ansätze für zukünftige Entwicklungen sinnvoll erscheint (u. a. um die audiovisuelle Trainingsmöglichkeit auch für deutschsprachige Patienten nutzen zu können). Ein dementsprechender Förderantrag unter dem Akronym „Natascha“ wurde bei der EU-Kommission - allerdings bisher erfolglos - eingereicht.

Auf dem Bereich der kategorialen Lautheitsskalierung sind einige kommerzielle Audiometrie-Systeme inzwischen auf dem Markt erschienen, die eine Lautheitsskalierung in der einen oder anderen Form anbieten (z. B. Westra, Aurical von Danavox, Unity von Siemens). Zumeist wird bei diesen Systemen jedoch eine andere Anzahl von Kategorien (5, 7 oder 50) und auch keine adaptive Pegelsteuerung verwendet. Mehrere Hersteller versuchen derzeit, eine kategoriale Lautheitsskalierung auf den Audiometern anzubieten, ohne jedoch den Stand der Wissenschaft und Technik adäquat zu berücksichtigen. Es ist davon auszugehen, daß durch das Erscheinen des aus diesem Projekt entstandenen Buches über kategoriale Lautheitsskalierung die hier entwickelten und validierten Methoden als de-facto-Standard etabliert werden können. Es bestehen weiterhin Bestrebungen, zu einer Normierung der kategorialen Lautheitsskalierung zu gelangen, damit die Hersteller sich auf einheitliche Durchführungsbestimmungen festlegen können und die Ergebnisse der kategorialen Lautheitsskalierung an verschiedenen Orten vergleichbar sind.

3 Bibliographie

- Derleth, R.P., Dau, T., Kollmeier, B. (1997): Modell zur Beschreibung der effektiven Signalverarbeitung bei Schwerhörigen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '97, in Druck
- Dillier, N., Spillmann, T. (1992): Deutsche Version des der Minimal Auditory Capability (MAC)-Test-Batterie. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 238-263
- Hellbrück, J., Moser, L.M. (1985). Hörgeräte-Audiometrie: Ein computer-unterstütztes psychologisches Verfahren zur Hörgeräteanpassung. Psychol. Beiträge **27**, 494-509.
- Heller, O. (1985): Hörfeldaudiometrie mit dem Verfahren der Kategorienunterteilung (KU). Psycholog. Beiträge **27**, 478-493
- Hornig, S. et al : Zusammenhänge zwischen Sprachaudiometrie und Hörfeldskalierung in der klinisch - pädaudiologischen Diagnostik. In Gross, M. (Hrsg.) Aktuelle phoniatisch - pädaudiologische Aspekte 1995, R. Gross Verlag, Berlin, 1996
- Kalikow, D.N., Stevens, K. N., Elliott, L. L. (1977): Development of a test of speech intelligibility in noise using sentence materials with controlled word predictability. J. Acoust. Soc. Am. **61** 1337-1351
- Kollmeier, B. (1990a): Meßmethodik, Modellierung und Verbesserung der Verständlichkeit von Sprache. Habilitationsschrift, Universität Göttingen
- Kollmeier, B. (1990b): Speech enhancement by filtering in the loudness domain. Acta Otolaryngol. Suppl. 469, 207-214
- Kollmeier, B., Dau, T., Holube, I., Wesselkamp, M. (1995): Modelling the ear's „effective“ signal processing to predict psychoacoustics and speech perception in normal and impaired listeners. In 15. International Congress on Acoustics, Trondheim, 81-84
- Kryter, K. D. (1962): Methods for the calculation and use of the Articulation Index. J. Acoust. Soc. Am. **34**, 1689-1697
- Lehnhardt, E. (1996) Praxis der Audiometrie. Thieme-Verlag, Stuttgart.
- Pascoe, D.P. (1986). Hearing Aid Selection Procedure Used at Central Institute for the Deaf in Saint Louis. Audiol: Akustik 25, 90-106.
- Peissig, J., Kollmeier, B. (1997): Directivity of binaural noise reduction in spatial multiple noise-source arrangements for normal and impaired listeners. J. Acoust. Soc. Am. **101**(2) (im Druck)
- Smootenburg, G, F. (Ed.) (1990): Hearing Impairment and Signal-Processing Hearing Aids. Acta Otolaryngol. Suppl. **469**
- Sotscheck, J. (1982): Ein Reimtest für Verständlichkeitsmessungen mit deutscher Sprache als ein verbessertes Verfahren zur Bestimmung der Sprachübertragungsgüte. Der Fernmeldeingenieur **36**, Heft 4/5, 1
- Tschop, K., Ingold, L. (1992): Die Entwicklung einer deutschen Version des SPIN-Tests. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 311-329
- Van Vliet, D. (1995): Determining contour loudness judgements. Hearing Instruments 3/1995, 30.
- v. Wallenberg, E. L., Kollmeier, B. (1989): Sprachverständlichkeitsmessungen für die Audiologie mit einem Reimtest in deutscher Sprache: Erstellung und Evaluation von Testlisten. Audiol. Akustik **28**, 50-65
- Zerbs, C. , Holube, I. (1996): Simulation binauraler Schwellen für Simultan- und Nachverdeckung, In: Fortschritte der Akustik - DAGA '96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 334-335

Liste der aus dem Projekt entstandenen bzw. geplanten Veröffentlichungen

(die kursiv gesetzten Veröffentlichungen sind dem Bericht als Anhang beigelegt.)

Bachmann, J., Kießling, J., Schubert, M. (1996), A concept for the evaluation of hearing aid benefit. In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 307-312

Brand, T., Kollmeier, B. (1994): Bestimmung psychometrischer Funktionen mit einer Maximum-Likelihood-Methode. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'94, DPG-Verlag, Bad Honnef, 1437-1440

Brand, T., Launer, S., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1995) Fehlerabschätzung der Steigungsbestimmung bei psychometrischen Funktionen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'95, DPG-Verlag, Bad Honnef, 219-222

Brand, T., Kollmeier, B. (1996a) Adaptive Testverfahren in der Audiologie. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 60-63

Brand, T., Wesselkamp, M., Kollmeier, B. (1996) Adaptive estimation of psychometric functions in psychoacoustic and speechaudiometry. In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 69-72

Brand, T., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1997): Meßgenauigkeit der (adaptiven) kategorialen Hörfächenskalierung. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'97, im Druck

Döring, W. H., Hamacher, V. (1992): Neue Sprachverständlichkeitstests in der Klinik: Aachener Logatomtest und „Dreinsilber-Test“ mit Störschall. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 137-168

Hohmann, V. (1993): Dynamikkompression für Hörgeräte - Psychoakustische Grundlagen und Algorithmen. Dissertation, Universität Göttingen

Hohmann, V., Launer, S., Kollmeier, B. (1995) Lautstärkewahrnehmung bei Schwerhörigen: I. Experimente. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'95, DPG-Verlag, Bad Honnef, 211-214

Hohmann, V., Kollmeier, B. (1995), Weiterentwicklung und klinischer Einsatz der Hörfeldskalierung. In: Audiologische Akustik 34, 48-59

Holube, I., Kollmeier, B. (1992): Sprachverständlichkeitsvorhersage bei Schwerhörigen, In: Fortschritte der Akustik - DAGA'92, DPG-Verlag, Bad Honnef, 621-624

Holube, I. (1993): Experimente und Modellvorstellungen zur Psychoakustik und zum Sprachverstehen bei Normal- und Schwerhörigen, Dissertation, Universität Göttingen

Holube, I., Kollmeier, B. (1994): Beziehungen zwischen dem Einsilber-Reimtest in Ruhe und der Ton- und Sprachaudiometrie. Audiologische Akustik 33, Heft 2, 18-29

Holube, I., Kollmeier, B. (1994): Modifikation eines Fragebogens zur Erfassung des subjektiven Hörvermögens und dessen Beziehung zur Sprachverständlichkeit in Ruhe und unter Störgeräuschen. Audiologische Akustik 33, Heft 4, 22-35

Holube, I. (1996): Models of speech perception and psychoacoustics, In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 111-122

Holube, I., Kollmeier, B. (1996): Speech intelligibility prediction in hearing-impaired listeners based on a psychoacoustically motivated perception model. J. Acoust. Soc. Am. 100, 1703 - 1716

- Kießling, J., Steffens, T. Wagner, I. (1993): Untersuchung der praktischen Anwendbarkeit der Lautheitsskalierung. *Audiologische Akustik* 32, 100-115
- Kießling, J., Schubert, M., Wagner, I. (1994a): Lautheitsskalierung. *HNO* 42, 350-357
- Kießling, J., Schubert, M., Wagner, I. (1994b): Sprachverständlichkeitsmessung an Normalhörenden und Schallempfindungsschwerhörigen - fünf Sprachtests im Vergleich. 1. Teil, *Audiologische Akustik* 33, Heft 1, 6-19
- Kießling, J., Schubert, M., Wagner, I. (1994c): Sprachverständlichkeitsmessung an Normalhörenden und Schallempfindungsschwerhörigen - fünf Sprachtests im Vergleich. 2. Teil, *Audiologische Akustik* 33, Heft 2, 11-15
- Kießling, J., Schubert, M., (1995a): Ein adaptives Verfahren zur Hörgeräte-Anpassung mittels Lautheitsskalierung (ScalAdapt). *Hörakustik*, März 1995, 4-15
- Kießling, J., Dyrland, O., Christiansen, C. (1995b) Loudness scaling - towards a generally accepted clinical method. In: *Proceedings of the European Conference on Audiology*, Noordwijkerhout, Niederlande
- Kießling, J., Pfreimer, C., Schubert, M. (1996a), Recruitmentnachweis - Kategoriallautheitsskalierung und klassische überschwellige Audiometrie im Vergleich. Laryngo-Rhino-Otologie* 75, 10 - 17
- Kießling, J., Schubert, M., Archut, A. (1996b): Adaptive fitting of hearing instruments by category loudness scaling (ScalAdapt). *Scand. Audiol.* (angenommen zur Veröffentlichung)
- Kießling, J., Bachmann, J., Margolf-Hackl, S. (1996c): Computerunterstützte Erfassung der subjektiv empfundenen Hörstörung und des daraus resultierenden Handicaps mit Hilfe von Frageninventaren. *Audiologische Akustik* 35, 110-121
- Kießling, J. (1996a): Scaling Methods for the Selection, fitting and evaluation of Hearing aids. In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 297-306
- Kießling, J. (1996b): Die Kategorial-Lautheitsskalierung: Grundlagen, Durchführung und klinische Anwendung. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 56-59.*
- Kliem, K., Kollmeier, B. (1992): Ein Zweisilber-Reimtest in deutscher Sprache. In: Kollmeier, B. (Ed.), *Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie*, Buchreihe *Audiologische Akustik*, Median Verlag, Heidelberg, 287-310
- Kliem, K. (1993): Entwicklung und Evaluation eines Zweisilber-Reimtestverfahrens in deutscher Sprache zur Bestimmung der Sprachverständlichkeit in der klinischen Audiologie und Nachrichtentechnik. Dissertation, Universität Oldenburg.
- Kliem, K., Kollmeier, B. (1994), Entwicklung und Evaluation eines Zweisilber-Reimtestverfahrens für die deutsche Sprachaudiometrie. Audiologische Akustik* 33, Heft 6, 4-14
- Kliem, K., Kollmeier, B. (1995), Überlegungen zur Entwicklung eines Zweisilber-Kinder-Reimtests für die klinische Audiologie. *Audiologische Akustik* 34 1/95, 6-11
- Kollmeier, B. (1992a): Cocktail-Parties und Hörgeräte - Probleme und Lösungsansätze bei der Rehabilitation Schwerhöriger. Plenarvortrag. In: *Fortschritte der Akustik - DAGA '92*, DPG-Verlag, Bad Honnef, 73

- Kollmeier, B. (1992b): Aktueller Stand und Entwicklungsperspektiven digitaler Hörgeräte. Z. med. Phys. 2, 201-208
- Kollmeier, B. (1992c): Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median-Verlag, Heidelberg
- Kollmeier, B., Drüke, G. (1992): Richtungsabhängige Freifeldentzerrung von Audiometrie-Kopfhörern mit digitaler Echtzeit-Filterung. In: Roth, J. (Ed.): Medizinische Physik '92, Basel, 296-297
- Kollmeier, B., Müller, C., Wesselkamp, M., Kliem, K. (1992): Weiterentwicklung des Reimtest nach Sotschek. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 216-237
- Kollmeier, B. (1996a): Psychoakustik, Sprachwahrnehmung und Hörgeräte: Von der Grundlagenforschung zur klinischen Anwendung. In Fortschritte der Akustik - DAGA '96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 52-55.*
- Kollmeier, B. (1996b) Computer-controlled speech audiometric techniques for the assessment of hearing losses and the evaluation of hearing aids. In: Psychoacoustics, speech and hearing aids. In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 57-67*
- Kollmeier, B., Wesselkamp, M. (1997) Development and evaluation of a German sentence test for objective and subjective speech intelligibility assessment. J. Acoust. Soc. Am. (under revision)
- Kollmeier, B. (1997): Hörfächenskalierung - Grundlagen und Anwendung der kategorialen Lautheitsskalierung für Hördiagnostik und Hörgeräteversorgung, im Druck
- Kühnel V., Kollmeier, B (1997): Sprachaudiometrie in Ruhe und Störgeräusch; Göttinger Satztest im Vergleich zu konventionellen Sprachverständlichkeitstest im klinischen Einsatz. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'97 (im Druck)*
- Launer, S., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1994): Experimente und Modellvorstellungen zur Lautheitsskalierung bei Schwerhörigen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '94, DPG-Verlag, Bad Honnef, 1405-1408
- Launer, S. (1995): Loudness Perception in Listeners with Sensorineural Hearing Impairment. Dissertation, Universität Oldenburg.
- Launer, S., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1995) Lautstärkewahrnehmung bei Schwerhörigen: II. Modellvorstellungen. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '95, DPG-Verlag, Bad Honnef, 215-218
- Launer, S., Holube, I., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1996) Categorical loudness scaling in hearing-impaired listeners- Can loudness growth be predicted from the audiogram? Audiologische Akustik 35, 4/1996 157-163*
- Meister, H., v. Wedel, H. (1995a): Untersuchungen zur Lautheitsskalierung in der klinischen Diagnose und Therapie. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '95, DPG-Verlag, Bad Honnef, 199-202
- Meister, H., v. Wedel, H. (1995b), Kategorial-Lautheitsskalierung und Sondenmessung. Audiologische Akustik 4/95, 172-178
- Meister, H., v. Wedel, H. (1996a), Hearing aid evaluation with categorical loudness scaling in patients with presbycusis, In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 313-318

Meister, H., v. Wedel, H. (1996b): Hörgeräteüberprüfungen mittels kategorialer Lautheitsskalierung. Audiol. Akustik 35, 96-105.

Müller, C. (1992): Perzeptive Analyse und Weiterentwicklung eines Reimtestverfahrens für die Sprachaudiometrie. Dissertation, Universität Göttingen

Müller-Deile, J. (1995), Zur Störsignalreduktion bei Cochlear Implant Sprachprozessoren, HNO 43, Springer, Berlin, 545-551

Pastoor, A., Kollmeier, B. (1996): Freifeldentzerrung von Kopfhörern. In: Fortschritte der Akustik - DAGA '96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 462f

Peissig, J. (1992): Binaurale Hörgerätestrategien in komplexen Störschallsituationen. Dissertation. Universität Göttingen.

Sander, A., Launer, S. (1995): Loudness Functions. In Fortschritte der Akustik - DAGA '95, DPG-Verlag, Bad Honnef, 1167-1170

Wesselkamp, M., Kliem, K., Kollmeier, B. (1992): Erstellung eines optimierten Satztestes in deutscher Sprache. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 330-343

Wesselkamp, M., Kollmeier, B. (1992): Analyse von Phonemverwechslungen. In: Kollmeier, B. (Ed.), Moderne Verfahren der Sprachaudiometrie, Buchreihe Audiologische Akustik, Median Verlag, Heidelberg, 70-85

Wesselkamp, M. (1994): Messung und Modellierung der Verständlichkeit von Sprache. Dissertation, Universität Göttingen

ANHANG

- I. Schlußbericht HNO-Klinik RWTH Aachen**
- II. Schlußbericht HNO-Klinik Universität Erlangen/Nürnberg**
- III. Schlußbericht HNO-Klinik, Universität Gießen**
- IV. Schlußbericht HNO-Klinik Universität Kiel**
- V. Schlußbericht HNO-Universitätskliniken Köln**
- VI Kopie ausgewählter, während des Projektes entstandener Publikationen.**

Anhang VI: Kopie ausgewählter, während des Projektes entstandener Publikationen.

Brand, T., Kollmeier, B. (1996a) Adaptive Testverfahren in der Audiologie. In Fortschritte der Akustik - DAGA'96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 60-63

Holube, I., Kollmeier, B. (1994): Modifikation eines Fragebogens zur Erfassung des subjektiven Hörvermögens und dessen Beziehung zur Sprachverständlichkeit in Ruhe und unter Störgeräuschen. Audiologische Akustik **33**, Heft 4, 22-35

Holube, I., Kollmeier, B. (1996): Speech intelligibility prediction in hearing-impaired listeners based on a psychoacoustically motivated perception model. J. Acoust. Soc. Am. **100**, 1703 - 1716

Kießling, J., Pfreimer, C., Schubert, M. (1996a), Recruitmentnachweis - Kategoriallautheits-skalierung und klassische überschwellige Audiometrie im Vergleich. Laryngo-Rhino-Otologie **75**, 10 - 17

Kießling, J. (1996b): Die Kategorial-Lautheitsskalierung: Grundlagen, Durchführung und klinische Anwendung. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 56-59.

Kliem, K., Kollmeier, B. (1994), Entwicklung und Evaluation eines Zweisilber-Reimtestverfahrens für die deutsche Sprachaudiometrie. Audiologische Akustik 33, Heft 6, 4-14

Kollmeier, B. (1996a): Psychoakustik, Sprachwahrnehmung und Hörgeräte: Von der Grundlagenforschung zur klinischen Anwendung. In Fortschritte der Akustik - DAGA'96, DPG-Verlag, Bad Honnef, 52-55.

Kollmeier, B. (1996b) Computer-controlled speech audiometric techniques for the assessment of hearing losses and the evaluation of hearing aids. In: Psychoacoustics, speech and hearing aids. In: B. Kollmeier (Ed.) „Psychoacoustics, speech and hearing aids“, World scientific publishing, Singapur, 57-67

Kühnel V., Kollmeier, B (1997): Sprachaudiometrie in Ruhe und Störgeräusch; Göttinger Satztest im Vergleich zu konventionellen Sprachverständlichkeitstest im klinischen Einsatz. In: Fortschritte der Akustik - DAGA'97 (im Druck)

Launer, S., Holube, I., Hohmann, V., Kollmeier, B. (1996) Categorical loudness scaling in hearing-impaired listeners- Can loudness growth be predicted from the audiogram? Audiologische Akustik 35, 4/1996 157-163

Meister, H., v. Wedel, H. (1996b): Hörgeräteüberprüfungen mittels kategorialer Lautheitsskalierung. Audiol. Akustik 35, 96-105.

Müller-Deile, J. (1995), Zur Störsignalreduktion bei Cochlear Implant Sprachprozessoren, HNO **43**, Springer, Berlin, 545-551