FÖRDERPREIS **2024**

Evaluation von simulierter Freifeldpräsentation für Hörexperimente

Evaluation of a simulated free-field presentation for audiological experiments

Bachelorarbeit im Rahmen des Studiengangs Hörakustik B.Sc.
der Technischen Hochschule Lübeck vorgelegt von

Alina-Sophie Bockelmann
Erstprüfer Dr. rer. nat. Florian Denk
Zweitprüfer Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Tchorz

EUHA
Europäische Union der Hörakustiker e.V.

Diese Arbeit ist im Rahmen einer Tätigkeit bei der Deutsches Hörgeräte Institut GmbH mit Unterstützung von Dr. Hendrik Husstedt entstanden.

Evaluation von simulierter Freifeldpräsentation für Hörexperimente

Evaluation of a simulated free-field presentation for audiological experiments

Bachelorarbeit

im Rahmen des Studiengangs

Hörakustik B.Sc.

der Technischen Hochschule Lübeck

vorgelegt von

Alina-Sophie Bockelmann

334488

am

08.09.2023

Erstprüfer **Dr. rer. nat. Florian Denk**

Zweitprüfer **Prof. Dr. rer. nat. Jürgen Tchorz**

Diese Arbeit ist im Rahmen einer Tätigkeit bei der Deutsches Hörgeräte Institut GmbH mit Unterstützung von **Dr. Hendrik Husstedt** entstanden.

TECHNISCHE HOCHSCHULE LÜBECK

Eigenständigkeitserklärung

Declaration of Originality

Name, Vorname *Last name, first name*	**Matrikelnummer** *Matriculation number*

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende
I hereby declare that this

☐ **Hausarbeit** (term paper) ☐ **Bachelorarbeit** (bachelor's thesis) ☐ **Masterarbeit** (master's thesis)

mit dem Titel
with the title

_____

_____

_____

eigenständig und ohne unerlaubte fremde Hilfe angefertigt habe. Ich habe keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet und Entlehnungen aus anderen Arbeiten kenntlich gemacht. Für den Fall, dass die Arbeit zusätzlich elektronisch und/ oder digital eingereicht wird, erkläre ich, dass die schriftliche und die elektronische und/ oder digitale Form identisch sind. Die Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

is my own original work and any assistance from third parties has been acknowledged. I have clearly indicated and acknowledged all sources and resources as well as any borrowings from other works. In case of an additional electronic and/or digital submission of this work, I declare that the written form and the electronic and/or digital form are identical. This work has not previously been submitted either in the same or in a similar form to another examination office.

Ich bin damit einverstanden, dass die vorliegende Hausarbeit/ Bachelorarbeit/ Masterarbeit für Veröffentlichungen, Ausstellungen und Wettbewerbe des Fachbereiches verwendet und Dritten zur Einsichtnahme vorgelegt werden kann.

I agree that this work can be used for publishing, exhibition or competition purposes and can be inspected by third parties.

☐ **ja** (Yes) ☐ **nein** (no) ☐ **es liegt ein Sperrvermerk bis _____vor** (there is an embargo period until)

Ort, Datum	**Unterschrift**

Zusammenfassung

Bei der Durchführung von Hörtests oder der Beurteilung von Hörgeräten befinden sich der Proband und die Schallquelle in der Regel im selben Raum. Dieser Aufbau stößt an seine Grenzen, wenn der Proband nicht über den Versorgungszustand am Ohr informiert sein soll oder wenn es unethisch wäre, den Probanden über einen längeren Zeitraum bestimmten Reizen, wie hohen Pegeln oder Wind, auszusetzen. Ziel dieser Studie ist es daher, einen Aufbau zu evaluieren, bei dem die Versuchsperson die Stimuli indirekt durch einen Kunstkopf hört, anstatt sie direkt über einen Lautsprecher zu hören. Das heißt, Ziel soll sein, eine neue Art von Blindstudie zu schaffen, die für audiologische Messungen verwendet werden kann.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Schallpräsentationsarten verglichen: A) Über einen Lautsprecher (Genelec 8351A), B) über einen audiometrischen Kopfhörer (HDA200) und C) über einen Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research (KEMAR), dessen aufgenommene Signale gefiltert und in Echtzeit über den Kopfhörer am Probandenohr abgespielt wurden. Für Variante C) wurden drei verschiedene Methoden der Entzerrung verglichen, die entweder zu einer wahrgenommenen (Gf-Gc oder RETSPL) oder technischen Äquivalenz (flach entzerrte Kopfhörerübertragung am KEMAR) der Stimuli führen sollten. Die Filter wurden mit Hilfe eines Digital Signal Processor (DSP) als FIR-Filter in Echtzeit implementiert. Zur Verifikation wurden für alle Konditionen das Übertragungsverhalten, Eigenrauschen und die Dynamik bestimmt. Zusätzlich wurde eine Probandenstudie mit 20 normalhörenden Probanden durchgeführt und die Ergebnisse von audiologischen Standardtests mit allen Schallpräsentationsarten verglichen. Das Sprachverstehen wurde mit Hilfe des Oldenburger Satztest (OLSA) in Ruhe und im Störgeräusch aufgenommen. Die Lautheitsempfindung wurde außerdem mit dem Adaptive Categorical Loudness Scaling (ACALOS) Verfahren gemessen.

Beim Vergleich der fünf Schallpräsentationsarten zeigt sich in den Ergebnissen der audiologischen Messungen ein signifikanter Unterschied zwischen der Kopfhörer- und der Lautsprecherpräsentation. Es konnte kein signifikanter Unterschied festgestellt werden zwischen den Konditionen KEMAR RETSPL, KEMAR Gf-Gc und der Lautsprecherpräsentation. Die Unterschiede lassen sich im Wesentlichen auf die messbaren Unterschiede zwischen den Konditionen, die auf den jeweiligen Zielsetzungen beruhen, zurückführen. Die Verwendung einer simulierten Freifelddarbietung mit Kopfhörerübertragung erscheint daher machbar, ohne dass nennenswerte Unterschiede zur direkten Lautsprecherpräsentation zu erwarten sind. Dabei ist die Verwendung einer audiologischen Kopfhörerentzerrung (nach RETSPL oder Gf-Gc) sinnvoll.

Abstract

When conducting auditory tests or hearing aid evaluations, usually the test subject and the sound source are in the same room. This standard setup bears limitations when the test subject is not supposed to be informed about the condition applied at the ear, or when it would be unethical to expose the test subject to certain stimuli, such as high levels or wind, over an extended period of time. The goal of this study thus is to evaluate a setup where the subject is replaced by an artificial head that receives the stimuli, which are then transmitted and presented to the subject in real time through headphones. This can be useful, for example, for studies on hearing aid features or in the remote fitting of hearing aids.

To this end, different ways of signal presentation were compared: A) Directly through a loudspeaker (Genelec 8351A), B) directly over audiometric headphones (HDA200) and C) over another loudspeaker and an artificial head (KEMAR 45BC) in a different room, whose signals were equalized and transmitted in real time to the audiometric headphones. Thereby, three different means of headphone equalization were compared, which should result in either perceptual (Gf-Gc or RETSPL in coupler) or technical equivalence (flat headphone response on KEMAR) of the stimuli. Those filters were implemented in real time as FIR filters with the help of a digital signal processor (DSP). Within the scope of the study, transfer function, inherent noise and dynamic range were determined for all conditions. For all presentation conditions, loudness function scaling (using the ACALOS procedure) and speech intelligibility in quiet and noise (using the OLSA sentence test) were conducted in 20 normal-hearing subjects.

When comparing the five means of signal presentation, the results of the audiological measurements show a significant difference between headphone and loudspeaker presentation. No significant difference could be found between the conditions RETSPL in KEMAR, Gf-Gc in KEMAR and loudspeaker presentation. The differences can essentially be attributed to the measurable differences between the conditions based on the respective objectives. The use of a simulated free-field presentation with headphone transmission therefore seems feasible without expecting significant differences to the direct loudspeaker presentation. The use of audiological headphone equalisation (according to RETSPL or Gf-Gc) is useful here.

Abkürzungsverzeichnis

ACALOS	Adaptive Categorical Loudness Scaling
AES3	Audio Engineering Society Standard 3
ANOVA	Analysis of Variance
CU	Categorical Unit
DSP	Digital Signal Processor
Gf-Gc	Differnz zwischen Freifeldpegel Gf und Kupplerpegel Gc
HATS	Head and Torso Simulator
HL	Hearing Level
HRTF	Head Related Transfer Function
KEMAR	Knowles Electronics Manikin for Acoustic Research
OEG	Open Ear Gain
OlNoise	Sprachsimulierendes Rauschen aus dem Oldenburger Satztest
OLSA	Oldenburger Satztest
OMA	Oldenburger Messprogramme
RETSPL	Reference Equivalent Sound Pressure Level
REUG	Real Ear Unaided Gain
SDT	Speech Detection Threshold
SNR	Signal to Noise Ratio
SPL	Sound Pressure Level
SRT	Speech Recognition Threshold

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Beispiel für Kopf und Rumpf Simulatoren. 3
Abbildung 2: Binaurale Aufnahme, Filterung und Präsentation am Probanden [1]. 5
Abbildung 3: Sprachmaterial des Oldenburger Satztestes. 7
Abbildung 4: Das Ergebnis einer OLSA-Messung in Ruhe. 8
Abbildung 5: Skala für die Kategoriale Lautheitsskalierung. 9
Abbildung 6: Das Ergebnis einer ACALOS Messung bei 1000Hz. 10
Abbildung 7: Schematischer Messaufbau. 11
Abbildung 8: Messergebnisse der Vergleichsmessung der Kopfhörer HDA200 und HDA280. 13
Abbildung 9: Messung des Kopfhörers auf dem künstlichen Ohr. 14
Abbildung 10: Audiogramm-Daten der Probanden. 17
Abbildung 11: Messaufbau mit Proband 18
Abbildung 12: Ergebnisse der Übertragungseigenschaften des Oldenburger Rauschens. 21
Abbildung 13: Ergebnisse der Dynamikmessung 22
Abbildung 14: Ergebnisse der OLSA-Messungen in Ruhe. 24
Abbildung 15: Ergebnisse der OLSA-Messungen im Störgeräusch. 25
Abbildung 16: Ergebnisse der ACALOS Messungen mit schmalbandigen und breitbandigen Rauschsignalen. 26

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Referenz männlicher Sprecher [2],[3] _____ 8
Tabelle 2: Ergebnisse Oldenburger Satztest _____ 40
Tabelle 3: Ergebnisse Lautheitsskalierung breitbandig _____ 41
Tabelle 4: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 250Hz _____ 41
Tabelle 5: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 1000Hz _____ 41
Tabelle 6: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 4000 Hz _____ 42
Tabelle 7: Verwendetes Messequipment _____ 42

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung 1

2. Grundlagen 3

2.1. Binaurale Signalübertragung 3
2.2. Lautheits-Mismatch zwischen Kopfhörern und Lautsprechern 5
2.3. Korrekturwerte in der Kopfhörerübertragung 5
2.4. Sprachverständlichkeit und Messung 6
2.5. Lautheitsempfindung und Messung 9

3. Methodik 11

3.1. Messaufbau 11
3.2. Konditionen und Kalibrierung 12
3.2.1. Kopfhörerpräsentation 12
3.2.2. Lautsprecherpräsentation 14
3.2.3. KEMAR-Präsentation 14
3.3. Technische Messungen 16
3.4. Probandenkollektiv 16
3.5. Messdurchführung 17
3.5.1. Durchführung OLSA 18
3.5.2. Durchführung ACALOS 18

4. Ergebnisse 20

4.1. Übertragungsverhalten 20
4.2. Dynamikbereich 21
4.3. Sprachverständlichkeit 22
4.4. Lautheitsskalierung 25

5. Diskussion 27

5.1. Bewertung der Technischen Messungen 27
5.2. Bewertung der Sprachverständlichkeitsmessungen 28
5.3. Bewertung der Lautheitsskalierung 29

6. Fazit und Ausblick 31

Literaturverzeichnis 32

Anhang 35

A.1. Ethikvotum 35
A.2. Probandeninformation und Datenschutzerklärung 36

A.3. Messaufbau im Detail _____ 40
A.4. Messergebnisse _____ 40
A.5. Verwendetes Equipment _____ 42
A.6. Randomisierung der Konditionen bei den Probandenmessungen am Beispiel von P1-P5 _____ 43
A.7. Einweisung OLSA _____ 43
A.8. Einweisung ACALOS _____ 43

1. Einleitung

Audiologische Messungen werden in der Regel in einem dafür vorgesehenen Raum durchgeführt. Das heißt, dass der Raum der Norm DIN EN ISO 3745 (2012) entspricht, ausreichend gedämmt ist und eine möglichst geringe Nachhallzeit aufweist. In so einem Raum können Hörtests wahlweise über einen Kopfhörer oder einen Lautsprecher, also im Freifeld, dargeboten werden. Um beispielsweise eine Hörgeräteversorgung zu überprüfen, wird die Hörschwelle meist über Kopfhörer gemessen und dann Sprachtests mit und ohne Hörsystem durchgeführt. Dem Probanden ist in dem Fall immer bewusst, ob er versorgt oder unversorgt ist. Für einige Studien ist es jedoch sinnvoll, wenn der Proband nicht über seinen Versorgungszustand oder die Einstellung der Features informiert ist. Auch bei der Bewertung von speziellen Hörgeräte-Features, wie z.B. bei der Windgeräuschreduzierung, kann es für den Probanden sinnvoll sein, nicht im selben Raum zu sitzen, in dem die Messungen präsentiert werden. Die Exposition von Wind über den Zeitraum einer gesamten Studie wäre unethisch. Es wäre daher ein Messaufbau sinnvoll, bei dem eine Lautsprecherpräsentation über einen Kopfhörer durchgeführt werden kann. Ein Weg, dies zu realisieren, ist das Hören über einen Kunstkopf mit binauraler Signalübertragung in Echtzeit auf einen Kopfhörer, den der Proband trägt.

Ansätze für die Umsetzung von solchen Blindstudien gab es schon in der Vergangenheit. So haben Harvey Dillon et al. [4] beispielsweise eine Vorrichtung gebaut, bei welcher Hörgeräte blind getestet werden konnten. Die Geräte waren auf einer Platte montiert, welche so nah wie möglich neben dem Probandenohr platziert wurde. Auf der Platte konnte durch die Betätigung eines Schalters umgestellt werden, über welches Hörgerät der Proband hören soll. Die Hörsysteme sind hier jedoch fern vom Ohr angebracht und geben daher nur begrenzt Aufschluss über das ohrnahe Verhalten der Geräte. Eine andere Möglichkeit stellt die Aufnahme über einen Kunstkopf dar. Florian Denk et al. [5] haben in ihrer Studie einen großen Wert auf die ohrnahe Platzierung der Hörsysteme gelegt, da die richtige Ankopplung des Hörsystems an das Ohr und die Räumlichkeiten, in denen die Messung stattfindet, einen tragenden Einfluss auf die Übertragung haben. In ihrer Studie wurde ein Kunstkopf mit einem transparent eingestellten Hörsystem versorgt und die Signale vom Kunstkopf aufgenommen, bevor sie einem Probanden vorgespielt wurden. Ziel der Studie war der Vergleich eines Prototyps mit akustischer Transparenz gegenüber dem offenen Ohr. Wenn die Prüfung von Hörsystemen in Echtzeit stattfinden soll, so stößt dieser Versuchsaufbau an seine Grenzen. Einen Ansatz einer Echtzeitübertragung bietet die Studie von Hendrik Husstedt et al. [6], bei welcher der Einfluss einer Windgeräuschunterdrückung von Hörgeräten gemessen wurde. Auch hier wurden einem Kunstkopf Hörgeräte angepasst. Die aufgenommenen Signale wurden jedoch direkt auf den Kopfhörer eines Probanden im Nebenraum gestreamt.

Diese Übertragung soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit ohne Hörsysteme evaluiert werden. Es stellt sich die Frage, ob es möglich ist, Hörtests über einen Kunstkopf durchzuführen, ohne die Ergebnisse durch diese Art der Signalübertragung zusätzlich zu verfälschen. Dazu soll überprüft werden, ob eine Übertragung über einen Kunstkopf sowohl in der Sprachverständlichkeit, als auch in der Lautheitsempfindung die gleichen Ergebnisse erzielt, wie eine Lautsprecherpräsentation bzw. eine normale Kopfhörerpräsentation, und welche Art der Entzerrung sich für die Präsentation über einen Kunstkopf anbietet. Um diese Frage zu beantworten, wurden im Rahmen der Studie die Übertragung über einen Kopfhörer, einen Lautsprecher und über einen

Kunstkopf verglichen. Bei dem Kunstkopf handelte es sich um einen KEMAR der Firma G.R.A.S. Über diesen wurden Signale aufgenommen und direkt auf den Kopfhörer des Probanden, welcher sich im Nebenraum befand, übertragen. Bei der KEMAR Übertragung wurden mit Hilfe eines digitalen Signalprozessors (DSP) in Echtzeit Filter zur äquivalenten Entzerrung des Kopfhörers angewendet. Bei dem Filtern handelte es sich um eine Entzerrung nach RETSPL [7], eine Entzerrung nach Gf-Gc [8] und eine flache Entzerrung am Kopfhörer [1]. In allen Konditionen wurden Sprachverständlichkeitstests (OLSA) in Ruhe und im Störgeräusch durchgeführt, sowie Lautheitsskalierungen (ACALOS) mit schmalbandigen und einem breitbandigen sprachsimulierten Rauschen. Außerdem wurden im Vorfeld technische Messungen durchgeführt, bei denen das Übertragungsverhalten, das Eigenrauschen und die Dynamik der verschiedenen Konditionen gemessen und verglichen wurden.

Die Arbeit wird wie folgt gegliedert: Im ersten Schritt wird auf die Grundlagen zu allen Konditionen und zu den verwendeten audiologischen Tests eingegangen. Im nächsten Schritt wird die Methodik sowie die Durchführung der Probandenstudie, welche im Rahmen der Arbeit durchgeführt wurde, beschrieben. Im letzten Schritt die Ergebnisse und die Diskussion dieser Arbeit, bevor dann im Fazit die Forschungsfrage nochmal aufgegriffen wird.

2. Grundlagen

2.1. Binaurale Signalübertragung

Unter einer binauralen Signalaufnahme versteht man eine Aufnahme, die, über Kopfhörer dargeboten, dem Hören im Freifeld sehr nahekommt und sich in diesem Sinne natürlich anhört. Dabei versteht man unter dem Begriff *binaural*, dass über beide Ohren gehört oder über zwei Ohren aufgenommen wird. Unterschieden wird sie von der stereophonen (umgangssprachlich *stereo*) Aufnahme. Bei einer stereophonen Aufnahme wird über zwei Kanäle bzw. über zwei Mikrofone aufgenommen. Die Aufnahmen sind dabei nicht zwangsläufig ohrnah [9]. Was eine binaurale Signalaufnahe ausmacht, sind vor allem die Head Related Transfer Functions (HRTFs), die bei jedem Menschen individuell sind und für eine unterschiedliche Hörwahrnehmung sorgen (dichotisches Hören). Die HRTFs werden vor allem durch die Form und Beschaffenheit der Pinna, sowie durch die Reflektionen und Abschattungen durch Kopf und Oberkörper bestimmt [10]. Eine binaurale Signalaufnahme kann auf zwei Wegen realisiert werden. Die für den Alltag eher unpraktikable Möglichkeit ist die Verwendung von Probanden, bei denen Mikrofone vor dem Trommelfell platziert werden. Hierüber können unter Berücksichtigung der HRTFs Signale aufgenommen werden. Jedoch kann hier nicht immer ein gleicher Sitz der Mikrofone vor dem Trommelfell gewährleistet werden und es kommt zusätzlich zur Aufnahme von Atem- und körpernahen Geräuschen sowie zu Effekten durch Kopfbewegungen [10]. Eine praktikablere Methode ist die Verwendung von Kunstköpfen. In der Vergangenheit haben sich in der binauralen Signalaufnahme Head and Torso Simulators (HATSs) und Knowles Electronics Manikins for Acoustic Research (KEMARs) bewehrt. Unter diesen versteht man Nachbildungen von Köpfen und Torsi, die einem durchschnittlichen Menschen nachempfunden sind (Abbildung 1).

Abbildung 1: Beispiel für Kopf und Rumpf Simulatoren. Zu sehen ist ein KEMAR 45BC-9 Head and Torso Simulator

HATS fanden und finden auch heute in verschieden Bereichen Anwendung. Die ersten Kunstköpfe wurden zur Aufnahme von Theatern und Opern verwendet, aber auch beim Radio, in der Musikproduktion und in der Automobilindustrie finden Kunstköpfe noch heute Anwendung. Man kann bei den HATS zwischen Modellen, die für die reine Aufnahme und solchen, die für technische Messungen verwendet werden, unterscheiden. Bei HATS, die nur zur Aufnahme verwendet werden, sitzen die Mikrofone am Gehörgangs Eingang. Der Einfluss des Gehörgangs wird also vernachlässigt. Anwendungsbereiche für dieses Modell finden sich unter anderem in der Musikproduktion. HATS, die für technische Messungen eingesetzt werden, haben dagegen Mikrofone an der Stelle, an welcher das menschliche Trommelfell säße. Sie finden Anwendung in der Industrie und in der Forschung. Hier soll analysiert werden, welcher Pegel genau am Trommelfell eines Menschen ankommt [9]. Probleme, die bei der binauralen Signalübertragung auftreten können, sind die individuellen HRTFs, die von Mensch zu Mensch unterschiedlich sind und durch die Anwendung eines HATS nicht berücksichtigt werden. Zudem werden bei einer Kunstkopfaufnahme die individuellen Kopfbewegungen nicht berücksichtigt, auch fehlen die visuellen Reize. Auch die richtige Entzerrung des Kopfhörers ist von Bedeutung bzw. kann es, durch die individuelle Positionierung des Kopfhörers, zu Fehlern in der Übertragungskette kommen [10]. So wurde in der Vergangenheit beispielsweise schon festgestellt, dass sich die Lokalisationsfähigkeit verschlechtert, wenn ein Proband über einen Kunstkopf hört [11]. Auch das Eigenrauschen, welches sowohl durch das Mikrofon als auch durch den Vorverstärker bedingt ist, kann zum Problem werden. Das Eigenrauschen des Mikrofons kann in den mittleren bis hohen Frequenzen verortet werden. Das Eigenrauschen des Vorverstärkers kann in den tiefen Frequenzen verortet werden [12]. Trotz dieser Einschränkungen war es in der Vergangenheit jedoch möglich, Signale über einen Kunstkopf aufzunehmen und einem Probanden diese Aufnahmen zu präsentieren (siehe Abbildung 2) [1]. Um dabei einen möglichst realistischen Klangeindruck zu schaffen, wird empfohlen, den Kopfhörer flach zu entzerren. Ein flacher Frequenzgang bedeutet, dass es keine Verfälschung des Signals über den Übertragungsweg gibt. Es sollte in diesem Fall nicht zu einer frequenzspezifischen Verstärkung oder Dämpfung kommen.

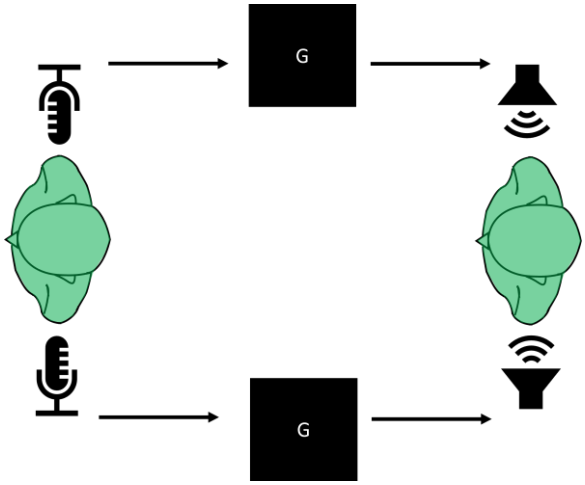


Abbildung 2: Binaurale Aufnahme, Filterung und Präsentation am Probanden [1].

2.2. Lautheits-Mismatch zwischen Kopfhörern und Lautsprechern

Es ist zu erkennen, dass es bei dem Aufbau einer Kopfhörer- und einer Lautsprecherpräsentation deutliche Unterschiede gibt. So steht der Lautsprecher bei audiologischen Messungen in der Regel einige Meter vom Probanden entfernt, wohingegen der Kopfhörer direkt am Ohr sitzt. Die Kopfhörerpräsentation umgeht so die individuelle Übertragung, die durch die HRTFs entsteht. Außerdem setzt der Proband den Kopfhörer zwischen Messungen möglicherweise öfter ab, womit sich die Übertragung leicht verändert. Vor jeder Messung wird daher der Messaufbau kalibriert, sodass am Probandenohr auf beiden Wegen der gleiche Pegel am Trommelfell ankommt. Es wurde jedoch schon früh festgestellt, dass es ein Mismatch in der Lautheitswahrnehmung gibt. Der Pegel des Kopfhörers muss frequenzabhängig erhöht werden, um das gleiche Lautheitsperzept zu erzeugen wie über einen Lautsprecher. In der Vergangenheit wurde dabei von den *Missing 4 dB* [13] gesprochen. Mehrere Studien haben versucht, diesen Mismatch zu reproduzieren. Je nachdem wie der Messaufbau aufgestellt war und in welchen Räumlichkeiten gemessen wurde, konnten entweder kein Mismatch [14] oder ein Mismatch abhängig von Frequenz und Räumlichkeiten festgestellt werden [15]. Um diesen Mismatch zu umgehen, werden in der Audiometrie Filter angewendet, die die Kopfhörerübertragung an eine Freifeldübertragung anpassen. Diese Filter werden im Kapitel 2.3 weiter beschrieben.

2.3. Korrekturwerte in der Kopfhörerübertragung

In der Akustik gibt es zwei unterschiedliche Arten von Korrekturwerten, die in der Audiometrie Anwendung finden, um eine Kopfhörerpräsentation hinsichtlich verschiedener Kriterien an eine Lautsprecherpräsentation anzugleichen. Die Reference Equivalent Sound Pressure Level (RETSPL) Korrekturwerte sollen an das menschliche Hören im Freifeld angelehnt sein und kommen für die Bestimmung von Hörschwellen über Kopfhörermessungen zum Einsatz. Dazu wurde die Hörschwelle mittels einer Tonaudiometrie bei einer

größeren Anzahl an Testpersonen mit normalem Hörvermögen gemessen. Die durchschnittlichen Pegel wurden dann über einen Kuppler aufgenommen. Der am Kuppler gemessene Schalldruckpegel ist der äquivalente Bezugsschwellendruck und bei einer Kalibrierung der Kopfhörer wird über das Addieren dieser Werte der normale Höreindruck berücksichtigt [7].

Die Differenz zwischen Freifeldpegel Gf und Kupplerpegel Gc (Gf-Gc) Werte bieten die Möglichkeit den Ausgangspegel des Kopfhörers an einen Freifeldpegel, hinsichtlich der Lautheit für schmalbandige Stimuli bei mittleren Lautheiten, anzugleichen. Diese Daten wurden mithilfe eines Lautheitsvergleiches ermittelt. Dazu wurde von 16 Versuchspersonen der Pegel von Terzbandrauschen über einen Kopfhörer so eingestellt, dass der Lautheitseindruck gleich ist mit dem gleichen Terzbandrauschen im Freifeld. Angegeben werden die Gf-Gc-Werte als Differenzwerte zwischen dem Kupplerpegel (Gc) und dem Freifeldpegel (Gf) gemessen am Kuppler [8]. Um also einen Eindruck des Freifelds zu erzeugen, müssen die Gf-Gc-Werte zu den am Ohrsimulator gemessenen Pegel addiert werden.

Eine technische Möglichkeit, die Kopfhörerübertragung an eine Lautsprecherübertragung anzupassen, ist diese flach zu entzerren. Ein flacher Frequenzgang bedeutet, dass es keine Verfälschung des Signals über den Übertragungsweg gibt. Es sollte in diesem Fall nicht zu einer frequenzspezifischen Verstärkung oder Dämpfung kommen. Dies wurde schon in Kapitel 2.1 kurz beschrieben. In der Audiometrie sind Lautsprecher in der Regel flach entzerrt. Um also den Eindruck einer Lautsprecherpräsentation zu schaffen, sollte der Kopfhörer auch flach entzerrt sein [1].

2.4. Sprachverständlichkeit und Messung

Neben der Tonaudiometrie wird in audiologischen Messungen oft auch eine Sprachaudiometrie durchgeführt. Dabei wird statt der Hörschwelle die Schwelle der gerade hörbaren Sprache ermittelt. Man unterscheidet dabei die Schwelle, bei deren Pegel Sprache das erste Mal als Sprache wahrgenommen wird (Speech Detection Threshold (SDT)) und die Schwelle, bei deren Pegel Sprache in 50% der Fälle verstanden wird (Speech Recognition Threshold (SRT)). Die Bestimmung der SRT-Werte erfolgt in der Regel anhand von Sprachmaterial, das dem Probanden vorgespielt wird und das er nachsprechen soll [16]. Ein verbreiteter und weit anwendbarer Sprachtest in Deutschland ist der Oldenburger Satztest (OLSA) [17]. In seiner Entwicklung hieß es, der Test solle alle positiven Eigenschaften von bisherigen Sprachtests vereinen. Folgende Anforderungen wurden also an diesen Test gestellt: Der Test soll im Störgeräusch durchführbar sein, eine steile Diskriminationsfunktion, eine hohe Anzahl an Testlisten, eine hohe Wiederholbarkeit und eine mittlere Sprachgeschwindigkeit haben und sowohl gebräuchliche als auch umgangssprachliche Wörter beinhalten [18]. Bei dem Oldenburger Satztest (OLSA) handelt es sich um einen Sprachtest, bei dem Sätze nachgesprochen werden. Ziel der Messung ist es, das 50%Sprachverstehen zu ermitteln. Bei den Sätzen handelt es sich um kurze deutsche Sätze, die aus einem Namen, einem Verb, einer Zahl, einem Adjektiv und einem Objekt bestehen. Ein Beispielsatz könnte also lauten: *Peter kauft acht nasse Sessel*. Insgesamt gibt es bei dem Test zehn verschiedenen Wörter pro Kategorie, welche je nach Testliste unterschiedlich angeordnet sind (siehe Abbildung 3). Durch die Randomisierung sind die Sätze semantisch nicht sinnvoll und der Proband kann sich, im Gegensatz zu anderen Testmaterialien, die Sätze nicht aus dem Kontext erschließen. Das Auswendiglernen der Sätze ist schwierig, weshalb eine mehrfache Durchführung möglich ist [18].

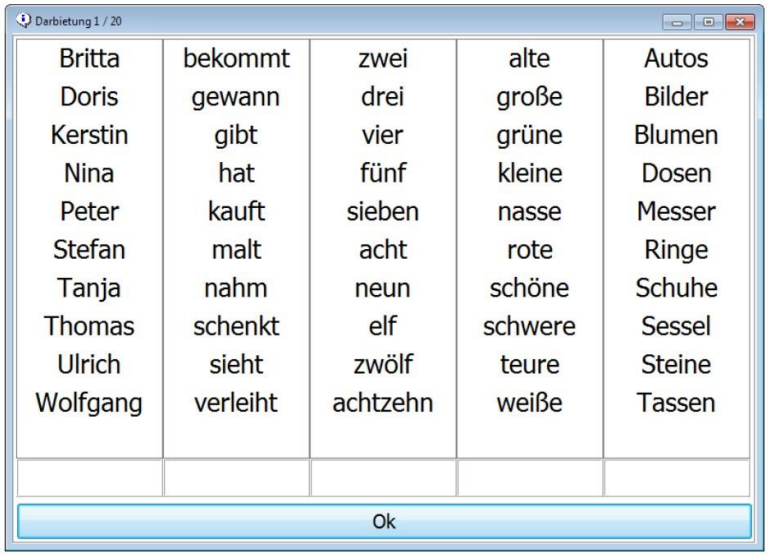


Abbildung 3: Sprachmaterial des Oldenburger Satztestes. Auswahlmaske für den geschlossenen Oldenburger Satztest [2].

Vor dem Start der Messung wird das Wiedergabemedium eingestellt. Außerdem wird der Pegel der Sätze und des Störgeräusches gewählt. Wird ein Störgeräusch angewendet, ist dies standardmäßig das Oldenburger Rauschen. Es können aber auch andere Rauschsignale wie ein Freiburger Rauschen oder ein selbst erzeugtes Rauschsignal eingestellt werden. Bei dem Oldenburger Rauschen (OlNoise) handelt es sich um ein sprachsimuliernedes Rauschen, welches generiert wurde, indem das gesamte Sprachmaterial zufällig zeitlich verschoben und 30-mal überlagert wurde [18]. Der Test kann wahlweise als offener oder geschlossener Test durchgeführt werden. Ein offener Test bedeutet, dass der Proband die Sätze nachspricht und der Versuchsdurchführende die Wörter als *richtig nachgesprochen* kennzeichnet. Bei dem geschlossenen Test ist der Proband aufgefordert, aus einer Tabelle die gehörten Wörter selbst über einen Touchscreen zu wählen (siehe Abbildung 3) [2]. Ob der Oldenburger Satztest bei der Verwendung des Sprachsimulierendes Rauschen aus dem Oldenburger Satztest (OlNoise) offen oder geschlossen durchgeführt wird, hat kaum einen Einfluss auf den SRT. Ein signifikanter Unterschied lässt sich lediglich in der Durchführungsdauer feststellen. Ein geschlossener Test dauert bei normalhörenden Probanden in der Regel zwei bis drei Minuten länger im Vergleich zu einem offenen Test [19]. Nach dem Start der Messung wird dem Probanden der erste Satz wahlweise mit oder ohne Störgeräusch vorgespielt. Je nach Anzahl der richtig beantworteten Wörter regelt das Messsystem den Pegel neu ein. Innerhalb von 20 Messdurchgängen bzw. 20 Sätzen wird auf diese Weise die 50% Sprachverstehensschwelle ermittelt. Statt den 20 Sätzen können aber auch Testlisten mit 30 Sätzen ausgewählt werden. Wird der OLSA im Störgeräusch durchgeführt, so bleibt der Pegel des Sprachsignals gleich und das Störgeräusch wird im Pegel verändert. Das Ergebnis wird in dB SNR (Signalrauschabstand) angegeben. Wird der ACALOS in Ruhe durchgeführt, so verändert sich der Pegel des Sprachsignals. Das Ergebnis wird in dB SRT (Speech Recognition Threshold) angegeben. Abbildung 4 zeigt den Verlauf einer OLSA-Messung in Ruhe. Die ersten Messpunkte waren gut hörbar, weswegen der Sprachpegel herabgesenkt wurde, bis der

Proband weniger als 50% der Sprache verstanden hat. Hat der Proband weniger als 50% verstanden, so wurde der Pegel der Sprache wieder angehoben.

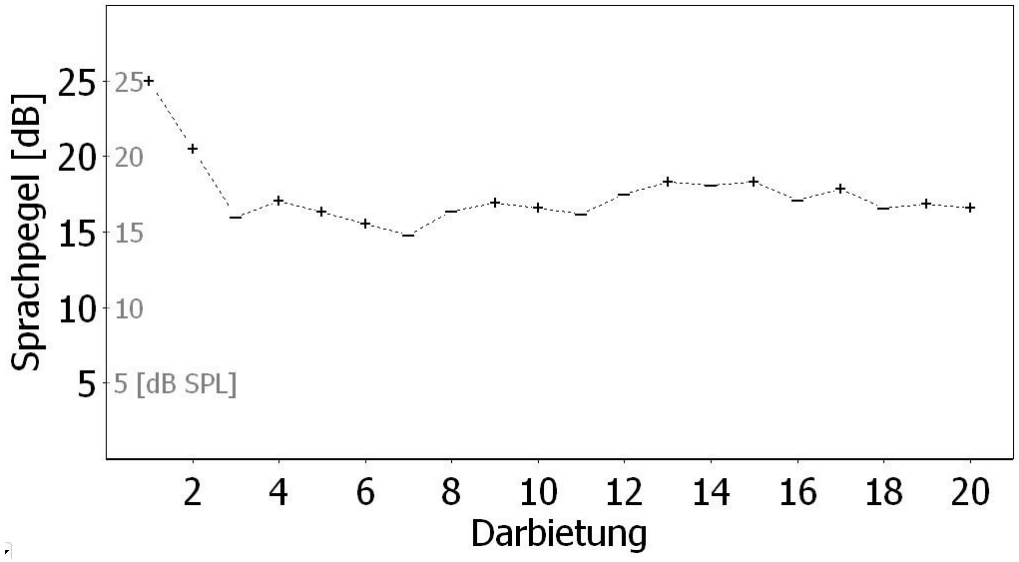


Abbildung 4: Das Ergebnis einer OLSA-Messung in Ruhe. Der SRT liegt hier am Ende bei 16,2dB SRT.

Der Oldenburger Satztest weist im Gegensatz zu anderen Sprachtests einen Trainingseffekt auf, welcher auf die Gewöhnung an die verwendeten Wörter zurückzuführen ist. Dieser Trainingseffekt umfasst eine Verbesserung des SRT-Wertes um etwa ein bis zwei dB. Bevor eine Messung begonnen wird, sollte daher auf eine ausreichende Trainingsphase geachtet werden. Empfohlen sind in der Praxis ein bis zwei Übungslisten [20]. Für den OLSA gibt es einige Referenzwerte für den männlichen Sprecher. Diese Werte wurden mit einem offenen Testmaterial und bei einem konstanten, diotischen Rauschen über den HDA200 an normalhörenden Probanden gemessen. In der Tabelle 1 sind diese Referenzwerte aufgeführt.

Tabelle 1: Referenz männlicher Sprecher [2],[3]

Parameter	50% Schwelle	Standardabweichung
Wert in Ruhe	19.9dB SPL	2.8dB SPL
Wert im Störgeräusch	-7.1dB SPL	1.1dB SPL

Ein Einflussfaktor auf diese Referenzwerte kann unter anderem die Präsentation des Rauschens haben. Ist das Rauschen kontinuierlich, so fällt der SRT signifikant negativer aus als bei einem synchronen Rauschen, welches immer nur mit der Sprache präsentiert wird [3].

2.5. Lautheitsempfindung und Messung

Unter Lautheit versteht man die empfundene Lautstärke eines Schallereignisses. Die Messung ist rein subjektiv und das Ergebnis kann zwischen Probanden variieren. Angegeben wird die Lautheit in der Einheit Sone. Signale mit unterschiedlicher Tonhöhe und gleichem Pegel können als unterschiedlich laut wahrgenommen werden. Mit Hilfe von Vergleichsmessungen lassen sich Kurven gleicher Lautheit bestimmen. Das heißt, die Töne werden so lange aneinander angepasst, bis sie sich gleich laut anhören. Diese Kurven werden auch Isophonkurven genannt [21].

Eine Methode, um das Lautheitsempfinden eines Probanden zu messen, ist die sogenannte kategoriale Lautheitsskalierung [22],[23]. Dabei bekommt der Proband nacheinander Testsignale mit unterschiedlichem Pegel vorgespielt und muss diese anhand einer Kategorialskala bewerten. Die Skala bietet

Auswahlmöglichkeiten, die zwischen *zu laut* und *nicht gehört* liegen. Die Kategorien werden dann in Zahlenwerte zwischen 0 und 50, eine sogenannte Categorical Unit (CU) übersetzt. Auch Zwischenkategorien, in Form von schwarzen Balken zwischen der Schrift, können dabei gewählt werden (siehe Abbildung 5) [23].

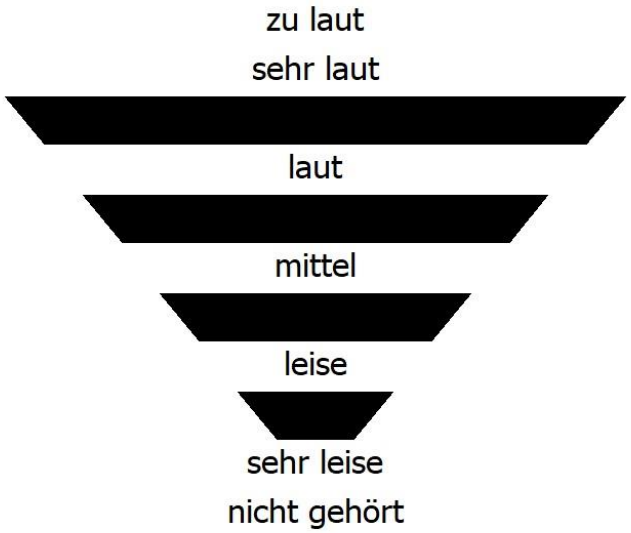


Abbildung 5: Skala für die Kategoriale Lautheitsskalierung. Es können Kategorien zwischen nicht gehört und zu laut gewählt werden. Die Kategorien können in CU zwischen 0 und 50 übersetzt werden. [23].

Unterschiedliche Testsignale können mit diesem Verfahren in ihrer Lautheit bewertet werden. Sowohl ein breitbandiges Messignal, als auch schmalbandige Messsignale können verwendet werden, um auch frequenzabhängig die Lautheitsfunktion zu bestimmen. In der Hörakustik wird die Lautheitsskalierung genutzt, um den Höreindruck mit Hörgeräten zu normalisieren. Dazu werden dem Probanden im versorgten Zustand Töne vorgespielt und Einstellungen an der Verstärkung des Hörgerätes vorgenommen, bis das Lautheitsempfinden ungefähr dem Lautheitsempfinden eines Normalhörenden entspricht [24]. Eine Lautheitsskalierung bei einem normalhörenden Probanden kann ähnlich wie in Abbildung 6 aussehen. Hier

ist eine Lautheitsskalierung bei 1000Hz zu sehen. Auf der Ordinate ist der Pegel in dBSPL und auf der Abszisse ist die dazu empfundene Lautheit als CU angegeben. In grau ist der Referenzbereich markiert und in grün wurden die Messpunkte und die daraus berechnete gefittete Lautheitsfunktion angegeben [23].

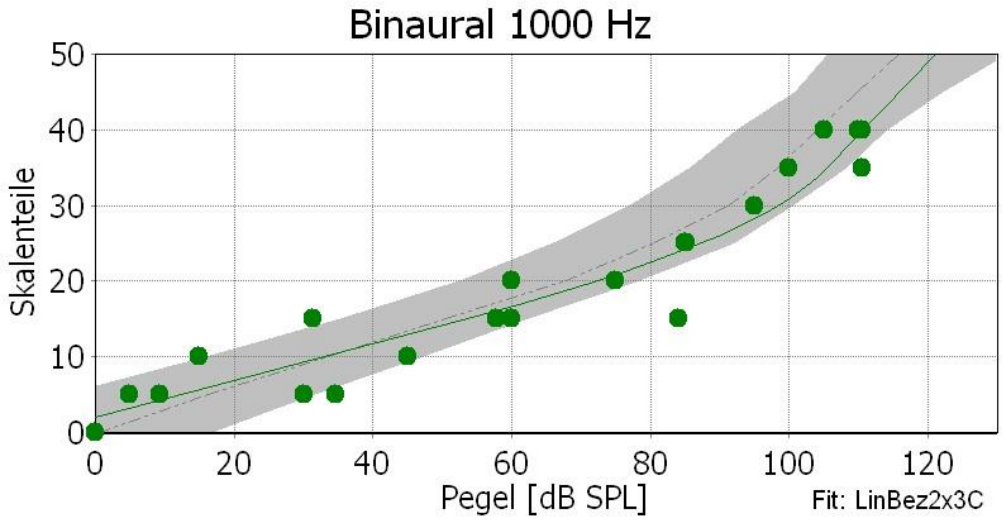


Abbildung 6: Das Ergebnis einer ACALOS Messung bei 1000Hz.

Eine verbreitete Methode zur Messung der Lautheitsempfindung ist der ACALOS. Dieser ist in zwei Phasen aufgeteilt. In der ersten Phase wird das Hörfeld des Probanden grob ermittelt. Dazu wird bei einem Pegel von 80dB HL gestartet und im ersten Schritt um 10dB erhöht, sodass 90dB HL erreicht werden. Zum Schutz des Probanden werden ab 90dB HL nur noch 5dB-Schritte vorgenommen, bis die Kategorie *zu laut* erreicht wird, also 50 CU. Dazwischenliegend werden einige Präsentationen in ihrem Pegel reduziert. Dabei wird der Pegel immer um 15dB reduziert, bis die Kategorie *nicht gehört*, also 0 CU, angegeben wird. Limitiert ist der Pegel nach oben hin bei 115dB HL und nach unten bei 0dB HL durch die Oldenburger Messprogramme (OMA). Nach dieser kurzen Einschätzungsphase startet die zweite Phase. Hier werden dann die anderen Kategorien ermittelt, also die Pegel, die einer Einheit von 15, 25, 35, und 45 CU entsprechen. In dieser Phase wird der Proband dadurch geschützt, dass nur noch maximal 5dB über dem in der ersten Phase als *zu laut* angegebenen Pegel gemessen wird [25]. Im Gegensatz zu anderen Messverfahren für die Lautheitsskalierung hat der ACALOS zwei Vorteile. Zum einen ist aufgrund der ersten Phase des Tests, welche integriert ist, weder eine Eingewöhnungs- noch Testphase notwendig. Zum anderen ist es im Gegensatz zu anderen Verfahren, wie einem Vergleich von Pegeln oder beim Reproduzieren eines gleichlauten Stimulus, robuster und bringt reproduzierbare Ergebnisse [25]. Auch für die Lautheitsskalierung gibt es gewisse Referenzwerte, die in der Norm DIN ISO 16832:2006 festgehalten sind [22].

3. Methodik

3.1. Messaufbau

Die Messungen zur Evaluation einer simulierten Freifeldpräsentation wurden in einem Aufbau mit zwei identischen audiologischen Messkabinen der Deutschen Hörgeräte Institut GmbH durchgeführt. Dabei handelte es sich um die Messräume G001 und G002. Diese erfüllen die Anforderungen der Freifeldaudiometrie nach DIN EN ISO 3745 (2012) [26] und sind mit schallabsorbierenden Wänden und Teppichboden ausgestattet. Die Messräume liegen nebeneinander und haben jeweils eine Grundfläche von $9m^2$ und eine Raumvolumen von $22,5m^3$. In Abbildung 7 ist der Aufbau schematisch dargestellt.

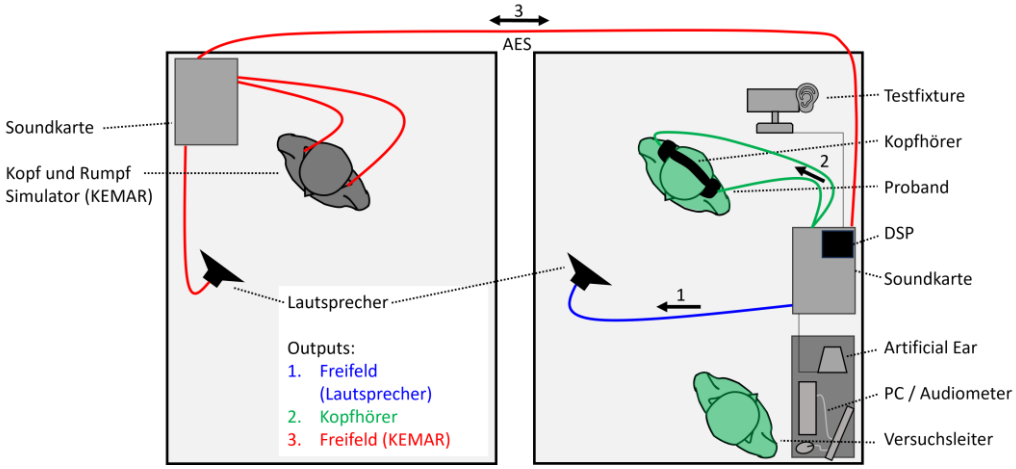


Abbildung 7: Schematischer Messaufbau. Übertragungswege über einen Kopfhörer (grün), einen Lautsprecher (blau) und einen KEMAR (rot)

Zu sehen sind die drei Übertragungswege über einen Kopfhörer (grün), einen Lautsprecher (blau) und einen KEMAR (rot). Man sieht außerdem, dass sich der Proband und der KEMAR in unterschiedlichen Räumen befinden. Rechts ist der Raum G001 mit dem Probandenplatz, dem Lautsprecher (Genelec 8351A) und dem Kopfhörer (Sennheiser HDA200) zu sehen. Der dazugehörige Kuppler (Brüel & Kjær Artificial Ear Typ 4153) befand sich ebenso wie das Audiometer (ACAM) auf dem Platz des Versuchsleiters. Die Bedienung des Audiometers und der Oldenburger Messsoftware erfolgte über einen PC (Lenovo ThinkCenter M90n-1 MT-M). Außerdem befand sich eine Kopfhörer-Testfixture (Hearingprotector Test Fixture 45CA-1 der Firma G.R.A.S.) in dem Raum. Der Proband war in einem Abstand von einem Meter und in einem Winkel von 0° zum Lautsprecher positioniert. Bei der Positionierung wurde darauf geachtet, Raummoden bestmöglich auszuschließen. Der Probandenstuhl war höhenverstellbar, aber nicht arretierbar, sodass die Blickrichtung zum Lautsprecher immer gleichblieb. Die Sitzhöhe wurde so eingestellt, dass die Ohrhöhe der Probanden auf der akustischen Achse des Lautsprechers 1.30m über dem Boden lag. Vor dem Probanden befand sich neben dem Lautsprecher ein Touchscreen, über den die Kategorien für die ACALOS-Messung ausgewählt werden konnten. Die gleiche Anordnung fand sich auch im linken Raum wieder. Zu sehen sind ein Kunstkopf (Typ KEMAR 45BC-9 Head and Torso Simulator der Firma G.R.A.S) und ein weiterer Lautsprecher (Genelec 8351A).

Der KEMAR war mit je einem Ohrsimulator pro Seite und anthropometrischen Pinnae (KB5000/5001) ausgestattet. Auch hier stand der Lautsprecher in einem Abstand von einem Meter und einem Winkel von 0° zum Kunstkopf. Die Lautsprecher waren über zwei RME Fireface 802 Soundkarten an den PC im Probandenraum angeschlossen. Der KEMAR wurde über ein Power Module Type 12AR von der Firma G.R.A.S. versorgt und war über dieses mit der Soundkarte im KEMAR-Raum verbunden. Die Referenzmikrofone (Brüel & Kjær 4192) und das künstliche Ohr wurden über eine 4 Channel Microphone Power Supply Type 2829 der Firma Brüel & Kjær mit der Soundkarte verknüpft. Die Kopfhörer-Testfixture lief über ein Power Module Type 12AK der Firma G.R.A.S. Zwischen den beiden Räumen bestanden Audio Engineering Society Standard 3 (AES3) Verbindungen zwischen A) dem KEMAR und der Soundkarte im Probanden-Raum und B) der Soundkarte im Probandenraum und dem Lautsprecher im KEMAR-Raum. Das Umschalten der Filter in der KEMAR Übertragung erfolgte über einen Equalizer der Firma MiniDSP. Die Kabelführung wurde aus einem früheren Versuchsaufbau übernommen [6] und verlief über die Deckenplatten des kleinen Flures außerhalb der Messräume. Ein detaillierterer Versuchsaufbau (A.2) sowie eine Übersicht des verwendeten Messequipments (A.6) sind im Anhang zu finden.

3.2. Konditionen und Kalibrierung

Im Rahmen der Studie wurden fünf verschiedene Konditionen der Schallpräsentation miteinander verglichen. Dabei handelte es sich um eine Kopfhörerpräsentation, eine Lautsprecherpräsentation und eine Übertragung über einen KEMAR mit einer Präsentation über einen Kopfhörer, wobei drei verschiedene Filter angewendet werden. In jeder Kondition wurden die Stimuli, die in späteren Messungen genutzt wurden, im Vorweg kalibriert. Zu den Stimuli gehören schmalbandrauschen bei 250, 1000 und 4000Hz und das OlNoise. Auf die einzelnen Konditionen und ihre Kalibrierung wird im Folgenden näher eingegangen.

3.2.1. Kopfhörerpräsentation

Bei der ersten Kondition handelt es sich um die Kopfhörerübertragung. Die Messsignale wurden aus der OMA direkt auf dem Kopfhörer abgespielt. Vor den Messungen stellte sich die Frage, welcher Kopfhörer für die Messungen genutzt werden sollte, um ein reproduzierbares und bestmögliches Ergebnis zu erzielen. Zur Auswahl standen die Kopfhörer HDA200 und HDA280 der Firma Sennheiser. Aus anderen Studien war schon bekannt, dass der HDA200 genutzt wurde, z.B. bei der Aufnahme der Referenzwerte der OLSA-Messung [3]. Der HDA280 wurde dagegen schon in der vorangegangenen Studie zur Windgeräuschunterdrückung verwendet [6]. Daher wurden beide Kopfhörer getestet, indem sie auf dem jeweiligen Kuppler (Brüel & Kjær 4152 und 4153), dem KEMAR und auf der Kopfhörer-Testfixture platziert wurden und eine Übertragungsfunktion mit Hilfe eines Sinus-Sweeps bei 80dB SPL gemessen wurde. Die Messung wurde zehnmal wiederholt und zwischen den Wiederholungen wurde der Kopfhörer neu aufgesetzt. Das Ziel der Messung war es, zu überprüfen, welcher Kopfhörer am besten auf den Ohren des KEMAR und der Kopfhörer-Testfixture sitzt, also welcher Kopfhörer die geringere Streuung in den Messungen aufweist. Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Messungen.

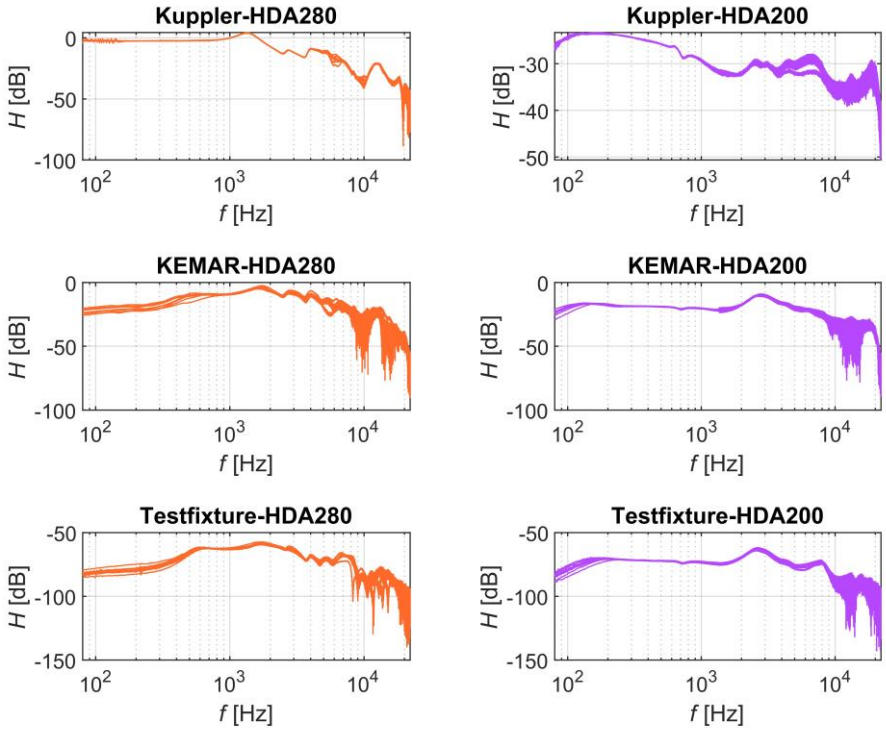


Abbildung 8: Messergebnisse der Vergleichsmessung der Kopfhörer HDA200 und HDA280. Der Kopfhörer HDA200 zeigt in den Messungen über den KEMAR und über die Kopfhörer Testfixture weniger Streuung.

Letztendlich hatte sich der HDA200 durch seinen Sitz, seine beständige Übertragung und die häufige Verwendung in Studien durchgesetzt und wurde für die vorliegende Arbeit verwendet. Streuungen, die bei der Messung auf dem Kuppler aufgetreten sind, wurden umgangen, indem der Kopfhörer immer exakt auf die gleiche Stelle platziert wurde (durch Markierungen gekennzeichnet).

Die Stimuli wurden von der OMA direkt über den Kopfhörer abgegeben. Um sicherzustellen, dass der richtige Pegel abgegeben wurde, wurde der Kopfhörer vor einer Messung über die Kalibrieroberfläche in der OMA kalibriert. Dazu wurde das künstliche Ohr mit Hilfe eines Pistonphones Typ 4228 der Firma Brüel & Kjær in MatLab kalibriert. Danach wurde der Kopfhörer mit dem richtigen Anpressdruck auf das künstliche Ohr (Brüel & Kjær Artificial Ear Typ 4153) gesetzt (siehe Abbildung 9) und über die OMA ein Pegel von 80dB SPL abgespielt. Über den Kuppler wurde nachgemessen, ob der eingestellte Pegel erreicht wurde. Gegebenenfalls wurde der Pegel in der OMA nachgestellt und der Pegel erneut am Kuppler gemessen. Dies wurde im Vorweg mit allen Stimuli gemacht, die in den technischen Messungen und Probandenmessungen verwendet wurden. Während der Messungen in der OMA war eine Filterung integriert, die die Übertragungsfunktion des HDA200 auf die Gf-Gc Werte anpasst. In den Soundkarteneinstellungen wurde während dieser Kondition sichergestellt, dass die Übertragung vom KEMAR nicht aktiv ist. Die Kondition wird im Folgenden als Kopfhörer-Kondition oder Kopfhörerübertragung bezeichnet.

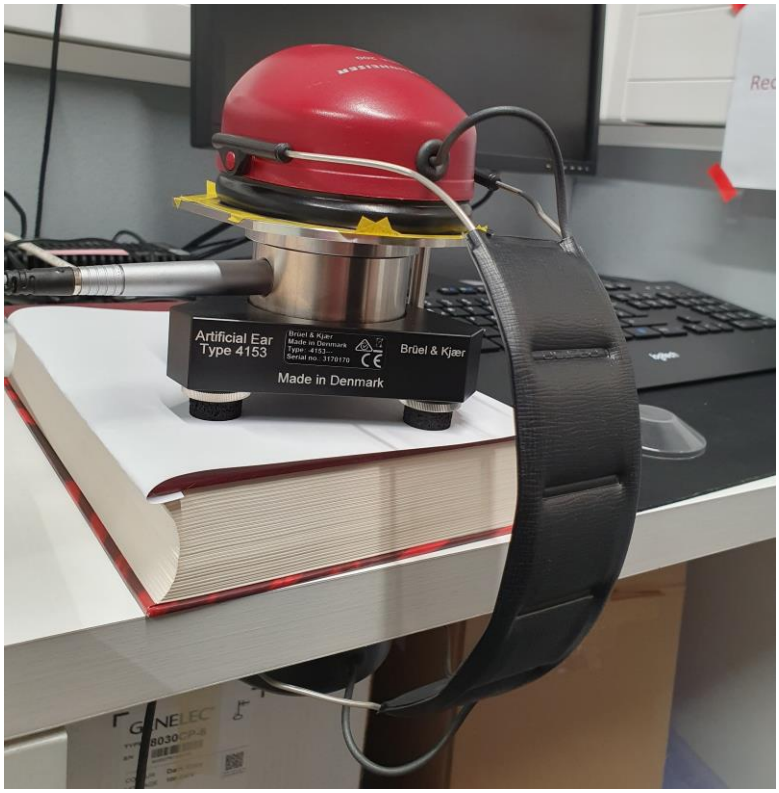


Abbildung 9: Messung des Kopfhörers auf dem künstlichen Ohr.

3.2.2. Lautsprecherpräsentation

Bei der zweiten Kondition handelt es sich um die Lautsprecherübertragung. Die Messsignale wurden aus der OMA direkt auf dem Lautsprecher (sowohl im KEMAR Raum als auch im Probandenraum) abgespielt. Auch hier wurde im ersten Schritt sichergestellt, dass der richtige Pegel über den Lautsprecher abgespielt wurde. Dazu wurde in einem Meter Entfernung ein Referenzmikrofon aufgestellt. Das Mikrofon war in einem Winkel von 0° zum Lautsprecher und in einer Höhe von 1.30m positioniert. Das Mikrofon wurde mit Hilfe eines Pistonphones in MatLab kalibriert. Aus der Kalibrieroberfläche der OMA wurden dann die Stimuli, die auch in den weiteren Messungen verwendet wurden, einzeln abgespielt und auf 80dB SPL gebracht. Nachgemessen wurde der Pegel über das Referenzmikrofon. Gegebenenfalls wurde der Pegel in der OMA nachgestellt und der Pegel erneut am Referenzmikrofon gemessen. Während der Messungen in der OMA war eine Filterung implementiert, die die Übertragungsfunktion des Lautsprechers flach entzerrt. Das heißt, dass alle Frequenzen mit demselben Pegel wiedergegeben wurden. Bei der Präsentation eines breitbandigen Stimulus mit 80dB SPL ergibt sich eine flache Übertragungsfunktion, bei der die Pegel über alle Frequenzen bei 80dB SPL liegen. Die Kondition wird im Folgenden als Lautsprecher-Kondition oder Lautsprecherübertragung bezeichnet.

3.2.3. KEMAR-Präsentation

Bei den letzten drei Konditionen handelt es sich um die KEMAR-Konditionen. Das heißt, im Raum G002 (KEMAR Raum) wurde über den Lautsprecher das Messsignal flach entzerrt abgegeben und vom KEMAR aufgenommen.

Von dort aus wurde es in den Raum G001 (Probandenraum) in Echtzeit übertragen und, bevor es über den Kopfhörer am Probandenohr ankommt, über den Equalizer (DSP) gefiltert. Bevor die Filter implementiert wurden, wurde sichergestellt, dass der Übertragungsweg kalibriert war. Dazu wurden aus der Kalibrieroberfläche der OMA die Stimuli bei 80dB SPL abgespielt und über das künstliche Ohr aufgenommen. Gegebenenfalls wurden Korrekturen vorgenommen. Der Lautsprecher war wie in Kapitel 3.2.2 über die OMA flach entzerrt. Das künstliche Ohr war wie in Kapitel 3.2.1 beschrieben mit einem Pistonphon zuvor kalibriert worden.

Um den Eindruck einer Lautsprecherpräsentation zu schaffen, wurden drei verschiedene Filterungen verglichen und in den DSP implementiert. Bei dem ersten Filter handelt es sich um eine Filterung nach den RETSPL-Korrekturwerten [7]. Die Übertragungskette vom Lautsprecher über den KEMAR bis zum Kopfhörer auf dem Probandenohr soll sich anhören wie eine Kopfhörerpräsentation mit einem RETSPL-Filter. Um den Filter zu erstellen, wurde in MatLab über den gesamten Übertragungsweg (vom flach entzerrten Lautsprecher über den KEMAR auf den Kopfhörer und das künstliche Ohr) eine Übertragungsfunktion eines rosa Rauschens bei 80dB SPL aufgenommen. Diese wurde mit einer flachen Übertragungsfunktion eines rosa Rauschens verglichen und die RETSPL-Werte sowie die Hörschwellenwerte wurden abgezogen. Über einen FIR-Filter konnte dann der Filter, der in den Equalizer implementiert wurde, berechnet werden. Im Folgenden wird die Kondition als KEMAR-RETSPL Kondition bezeichnet.

Bei dem zweiten Filter handelt es sich um eine Filterung nach den Gf-Gc-Korrekturwerten [8]. Die Übertragungskette sollte sich in dem Fall anhören wie eine Kopfhörerpräsentation mit einem Gf-Gc-Filter. Auch hier wurde der Filter mit Hilfe von MatLab erstellt. Um den Filter zu erstellen, wurde in MatLab über den gesamten Übertragungsweg eine Übertragungsfunktion eines rosa Rauschens bei 80dB SPL aufgenommen. Diese wurde mit einer flachen Übertragungsfunktion eines rosa Rauschens verglichen und die Gf-Gc-Werte addiert. Über einen FIR-Filter konnte dann der Filter, der in den Equalizer implementiert wurde, berechnet werden. Im Folgenden wird die Kondition als KEMAR Gf-Gc-Kondition bezeichnet und zusammen mit der KEMAR RETSPL Kondition bilden sie die audiologischen Filter. Bei dem letzten Filter handelt es sich um eine flache Entzerrung am Kopfhörer [1]. Der Lautsprecher ist dabei schon entzerrt wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben und man geht sicher, dass die Übertragung vom Kopfhörer auf das Ohr des Probanden auch flach entzerrt ist, sodass die KEMAR Übertragung nicht beeinflusst wird. Auch dieser Filter wurde in MatLab erstellt. Um den Filter zu erstellen, wurde in MatLab über den gesamten Übertragungsweg eine Übertragungsfunktion eines rosa Rauschens bei 80dB SPL aufgenommen. Diese wurde mit einer Übertragungsfunktion eines flach entzerrten Kopfhörers an der Testfixture verglichen und die Differenz als Filter in den Equalizer implementiert. Im Folgenden wird der Filter als KEMAR-Kopfhörer-flach-entzerrt-Kondition oder als technischer Filter bezeichnet.

Alle Filter wurden für jedes Ohr individuell erstellt. Wurde eine KEMAR Präsentation angewendet, so wurde darauf geachtet, dass in der Benutzeroberfläche der Soundkarte die AES3 Übertragung aktiv war und dass in der Benutzeroberfläche des Equalizers der richtige Filter ausgewählt war.

3.3. Technische Messungen

Vor den Probandenmessungen wurden technische Messungen am Messaufbau vorgenommen und auch während der Probandenmessungen wurden wöchentliche Technikchecks durchgeführt.
Als Erstes wurden die Übertragungseigenschaften und das Eigenrauschen in allen Konditionen gemessen. Die Messung sollte Aufschluss darüber geben, wie die frequenzabhängigen Übertragungseigenschaften der Konditionen sind. Für die Messung der Übertragung wurden in allen Konditionen die frequenzabhängigen Pegel bei einem Pegel von 80dB SPL für fünf Sekunden mit Hilfe eines rosa Rauschens aufgenommen. Bei dem Lautsprecher wurde die Aufnahme über ein Freifeldmikrofon realisiert. Die Kopfhörer- und KEMAR-Übertragungseigenschaften wurden an der Testfixture gemessen. Die gemessenen Daten wurden über MatLab ausgewertet. Die Kurven wurden auf das Trommelfell bezogen dargestellt. Das heißt, dass alle Kurven auf eine Freifeldübertragung angepasst sind (siehe Kapitel 3.2) und zusätzlich auf das Trommelfell bezogen sind, also unter der Berücksichtigung der Real Ear Unaided Gain (REUG). Bei der Messung des Eigenrauschen wurde in der jeweiligen Kondition fünfsekündige Aufnahmen in Ruhe gemacht. Diese wurden nicht weiter verändert.
Die zweite technische Messung war die Messung der Dynamik. Hierfür wurde in der jeweiligen Kondition der Ist-Pegel gemessen bei einem ausgegebenen Soll-Pegel von 0, 10, 20, 30, 50, 70, 80, 90 und 100dB SPL. Für die Messung wurden dieselben Testsignale wie in Kapitel 3.2 genutzt: Schmalbandrauschen bei 250, 1000, 4000Hz und OlNoise. Die Messung sollte Aufschluss über mögliche Kompressionen der Wiedergabemedien geben und aufzeigen, welchen Einfluss das Eigenrauschen in der Dynamik spielt.
Zusätzlich wurden wöchentliche Checks durchgeführt. Hier wurden zuerst die Positionierung und die Aufnahme des KEMAR überprüft, indem die (Open Ear Gain (OEG)) gemessen wurde. Die Referenzkurve wurde in der Vergangenheit schon bestimmt. Des Weiteren wurde im wöchentlichen Check die Kalibrierung des Messequipments in der OMA überprüft. Dabei wurden die Messsignale bei einem Pegel von 80dB SPL wiedergegeben und am jeweiligen Kuppler oder Messmikrofon wurde geprüft, ob wirklich die 80dB SPL abgegeben werden. Zuletzt wurden im Rahmen des wöchentlichen Checks die Filter überprüft. Dazu wurden die Differenz zwischen der gewünschten Übertragungsfunktionen und den aktuellen Übertragungsfunktionen bestimmt.

3.4. Probandenkollektiv

Die Probanden mussten mindestens 18 Jahre alt sein und keinen Hörverlust haben. Das bedeutet, dass die Hörschwelle der Probanden bei den Frequenzen 125, 250, 500, 1000, 2000, 3000, 4000, 6000 und 8000Hz maximal 20dB HL oder weniger betragen durfte. Es wurde sichergestellt, dass die Probanden Deutsch als Muttersprache sprachen und dass sowohl der OLSA als auch der ACALOS nicht bekannt waren. Gesundheitlich sollten die Probanden nicht durch einen Tinnitus oder vergangene, audiologisch relevante Operationen eingeschränkt sein. Die Probanden sollten außerdem konzentrationsfähig sein und sollten in den letzten 24 Stunden keinem übermäßigen Lärm ausgesetzt gewesen sein.
Insgesamt nahmen 20 Probanden an der Studie teil, die die Kriterien erfüllten. Dies entspricht der Anzahl der Konditionsvariationen (Anzahl Präsentationsmodi x Anzahl Messungen), welche Balancierung von Reihenfolgeeffekten mittels randomized Latin Square Verfahren ermöglichte. Von den 20 Probanden waren

sechzehn weiblich und vier männlich. Die Probanden hatten ein durchschnittliches Alter von 23,85 Jahren und waren bis auf zwei Ausnahmen alle Studierende an den benachbarten Universitäten. Die Hörschwelle aller Probanden bewegte sich zwischen -5dB HL und 20dB HL und lag damit im zuvor festgelegten Bereich. Bestimmt wurde die Hörschwelle mit Hilfe einer Tonschwellenaudiometrie mit Hilfe der ACAM. Die Unbehaglichkeitsschwelle aller Probanden lag im Bereich zwischen 80dB HL und 120dB HL (siehe Abbildung 10).

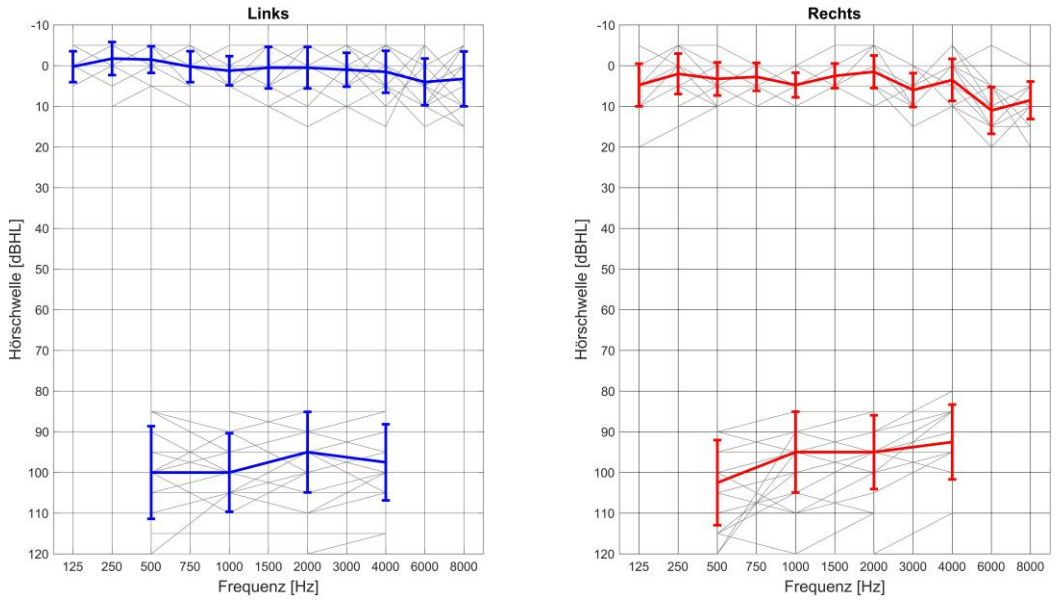


Abbildung 10: Audiogramm-Daten der Probanden.

3.5. Messdurchführung

Zu Beginn der Studie wurden jedem Probanden eine Probandeninformation, eine Einwilligungserklärung zur Teilnahme und eine Datenschutzerklärung vorgelegt (siehe Anhang). Es folgte eine kurze Anamnese, bei der das Alter der Probanden, die Muttersprache und die Bekanntheit der Testmaterialien erfragt wurden. Zusätzlich gab es noch Fragen zum aktuellen Befinden und zur Lärmexposition in den vergangenen 24 Stunden. Auf die Anamnese folgte eine Otoskopie, bei der das Ohr auf Auffälligkeiten an der Ohrmuschel, der Gehörgangswand und dem Trommelfell untersucht wurde. Bei einer Tonaudiomertie wurde die Normalhörigkeit der Probanden bei den Frequenzen 125, 250, 500, 1000, 1500, 2000, 3000, 4000, 6000 und 8000Hz überprüft. Eine Aufnahme der Unbehaglichkeitsschwelle gab zusätzlich erste Auskunft über eine mögliche Lärmempfindlichkeit. Die eigentliche Messung begann mit der Einweisung. Die Konditionen wurden, um Reihenfolge-Effekte zu minimieren, in ihrer Messreihenfolge mit Hilfe des Latin Square Verfahrens randomisiert. In jeder Kondition (Lautsprecher, Kopfhörer, KEMAR RETSPL, KEMAR Gf-Gc, flacher Frequenzgang KEMAR) wurden jeweils die vier Messungen (OLSA in Ruhe, OLSA im Störgeräusch, ACALOS schmalbandig, ACALOS breitbandig) durchgeführt. Die Randomisierung wurde einmal durchgeführt und in einer Tabelle festgehalten. Ein Beispiel für die Randomisierung von Proband 1 bis 5 findet sich im Anhang A.5. Während des Termins wurden zwei Pausen von

jeweils fünf bis zehn Minuten eingehalten, um den Probanden nicht zu stark zu ermüden. Im Folgenden werden die Messungen näher erläutert.

3.5.1. Durchführung OLSA

Bei dem Oldenburger Satztest wurden die Probanden eingewiesen, dass sie kurze, deutsche Sätze hören werden, welche aus einem Namen, einem Verb, einer Zahl, einem Adjektiv und einem Objekt bestehen. In jedem Durchgang waren es 20 Sätze. Die Probanden waren angehalten die Sätze spontan nachzusprechen und gegebenenfalls zu raten. Je nach Test wurden die Probanden aufgeklärt, dass der Test wahlweise mit oder ohne Hintergrundrauschen präsentiert wird. Bei dem Rauschen handelte es sich um ein 60dB OlNoise. Um einen Lerneffekt zu minimieren, welcher vor allem in den ersten beiden Testlisten auftritt, wurde den Probanden ein Training von jeweils 20 Sätzen in Ruhe und 20 Sätzen im Störgeräusch präsentiert, welche die Probanden nachsprechen sollten. Bei der Messung wurde, wie in Kapitel 2.4 beschrieben der SRT50 gemessen, also die Schwelle, bei der die Probanden 50% der präsentierten Sprache verstanden haben.

3.5.2. Durchführung ACALOS

Bei der Lautheitsskalierung wurden die Probanden eingewiesen, dass sie kurze Rausch- oder Tonschnipsel hören werden. Bei den Rauschschnipseln handelte es sich um das Oldenburger Rauschen (OlNoise) und bei den Tonschnipseln wurde ein Schmalbandrauschen bei 250, 1000 und 4000Hz vorgespielt. Alle Stimuli wurden in ihrem Pegel randomisiert abgespielt und bei der Messung mit den Tonschnipseln wurde darauf geachtet auch die Tonhöhe zu randomisieren. Eine Messung mit dem OLSA-Rauschen hat dabei zwischen 20-30 Präsentationen gebraucht und die Messung mit den Schmalbandsignalen etwa 60-72 Präsentationen. Nach jeder Präsentation waren die Probanden angehalten, das Testmaterial zu bewerten. Zur Bewertung hatten die Probanden einen Touchscreen neben sich, auf dem eine Skala mit den Kategorien *nicht gehört* bis *zu laut* zu sehen war. Auch Zwischenkategorien konnten gewählt werden (siehe Abbildung 11).

Abbildung 11: Messaufbau mit Proband

Bei der Lautheitsskalierung wurden Lautheitsfunktionen des Probanden aufgenommen. Es können sowohl einzelne Werte als auch die Fit-Funktion ausgelesen werden. Der Fit wurde während der Messung automatisch bestimmt und war in den meisten Fällen LinBez2x3B.

4. Ergebnisse

4.1. Übertragungsverhalten

Abbildung 12 zeigt die gemessenen frequenzabhängigen Pegel in den Konditionen bei Verwendung des sprachmodelierten Rauschen (OlNoise), bezogen auf das Trommelfell. Gemessen wurde bei 80dB SPL und im Frequenzbereich zwischen 100Hz und 10000Hz. Der Trommelfellbezug wurde realisiert, indem auf die Referenzkurve (digital erzeugtes OlNoise) und die Lautsprecherübertragung die REUG [27] frequenzabhängig addiert wurde.

Zu sehen ist, dass die Kopfhörer-Kondition und die Konditionen KEMAR-RETSPL und KEMAR-GfGc sich sehr ähnlich sind. Die Kondition KEMAR-RETSPL weicht lediglich zwischen 400Hz und 600Hz ab. Auch bei ganz hohen Frequenzen ab 6000 Hz entfernen sich die drei Konditionen voneinander. Die Übertragungseigenschaften der Konditionen Lautsprecher und flach-entzerrter-Kopfhörer-am-KEMAR sehen sich bis auf einige Ausnahmen ähnlich. Im mittleren Frequenzbereich um 1000Hz und um 2000Hz liegt die Kondition flach-entzerrter-Kopfhörer-am-KEMAR leicht unter den frequenzabhängigen Pegeln des Lautsprechers. Die zwei audiologischen Filter und der Kopfhörer weisen einen höheren Pegel auf als die Lautsprecherübertragung und der technische Filter am KEMAR. Lediglich im Bereich zwischen 500 Hz und 800 Hz liegen die beiden Gruppen und vor allem der Kopfhörer und der Lautsprecher nah beieinander.

Auch beim Eigenrauschen bestehen gewisse Unterschiede. Der Lautsprecher weist mit einem Pegel von 19.39dB(A) das geringste gemessene Eigenrauschen aller Konditionen auf. Im Gegensatz zu den anderen Konditionen wurde das Eigenrauschen des Lautsprechers über ein Freifeldmikrofon aufgenommen. Der Kopfhörer hat mit 23.49dB(A) ein deutlich höheres Eigenrauschen. Das höchste Eigenrauschen weisen die KEMAR-Konditionen, im speziellen in Verbindung mit den audiologischen Filtern, auf. Sie haben ein Eigenrauschen zwischen 24.97dB(A) und 27.17dB(A). Unterschiede im Verlauf bestehen vor allem in den tiefen Frequenzen, hier gibt es in allen Konditionen einen deutlichen Anstieg unter 200Hz. Zu den hohen Frequenzen liegen vor allem die KEMAR-Konditionen fast übereinander. Eine große Lücke besteht konstant zwischen dem Lautsprecher und dem Kopfhörer.

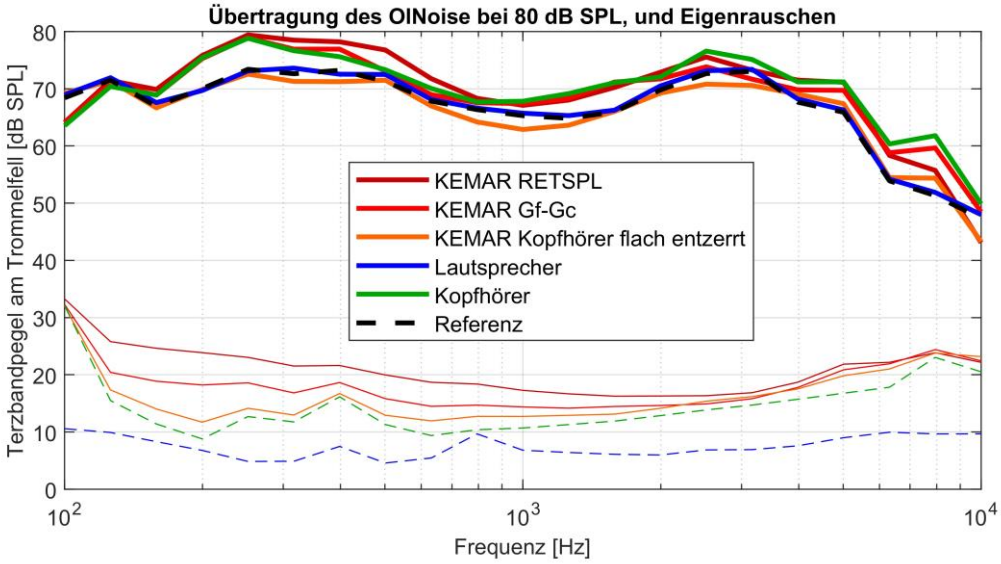


Abbildung 12: Ergebnisse der Übertragungseigenschaften des Oldenburger Rauschens. Das Eigenrauschen ist in dünnen Linien mit eingezeichnet.

4.2. Dynamikbereich

Die Dynamikmessungen in Abbildung 13 zeigen den Dynamikbereich der Messkonditionen bei den genutzten Stimuli (schmalbandige Testsignale und OlNoise). Angegeben wurden die ausgegebenen Soll-Pegel von 0, 10, 20, 30, 50, 70, 80, 90 und 100dB SPL auf der Abszisse und die gemessenen Ist-Pegel in dB SPL auf der Ordinate. Angegeben ist außerdem eine Referenzkurve, welche linear ansteigt. Das Eigenrauschen der Mikrofone wurde bei dieser Messung nicht durch einen Tiefpassfilter herausgefiltert, sodass der Messbereich nicht eingeschränkt wurde.

Bei 250 Hz ist zu sehen, dass bei den Konditionen Lautsprecher und flach-entzerrter-Kopfhörer-am-KEMAR, die gemessenen Ist-Pegel linear zu den abgegebenen Soll-Pegeln ansteigen. Die beiden Dynamiklinien liegen im Bereich zwischen 20dB SPL und 100dB SPL Soll-Pegel auf der Referenzkurve. Etwas höher liegen die Konditionen Kopfhörer und die audiologischen Filter am KEMAR. Die Dynamiklinien der drei Konditionen liegen etwa 5dB SPL über den Dynamiklinien der anderen beiden Konditionen. Ähnliches lässt sich auch bei 1000Hz und beim sprachmodulierten Rauschen feststellen. Auch hier liegen die Dynamiklinien der Konditionen Kopfhörer und die audiologischen Filter am KEMAR leicht über den Dynamiklinien des Lautsprechers und der technischen Entzerrung am KEMAR. Lediglich bei der Dynamikmessung bei 400Hz liegen alle Konditionen dicht beieinander. Auch hier ist jedoch eine leichte Abweichung der Dynamiklinien von Kopfhörer und den audiologischen Filtern am KEMAR von etwa 1-2dB SPL erkennbar. Dies deckt sich mit den Ergebnissen der Messung zum Übertragungsverhalten.

Auffällig bei der Messung sind die Abweichungen von der Referenzkurve bzw. die abweichende Linearität. Vor allem bei kleinen Soll-Pegeln kommt es zu relativ hohen Ist-Pegeln über alle Konditionen hinweg. Im Bereich zwischen 0dB SPL und 30dB SPL Soll-Pegel liegt der Ist-Pegel in allen Konditionen zwischen 20dB SPL und 30dB SPL. Die Abweichung ist dabei konditions- und frequenzabhängig.

Eine weitere Auffälligkeit zeigt sich bei 4000Hz. Hier steigt der Ist-Pegel der Lautsprecher und lautsprecherabhängigen KEMAR-Konditionen ab einem Soll-Pegel von 90dB nicht mehr linear an und die Dynamikkurve fällt unter die Referenzkurve.

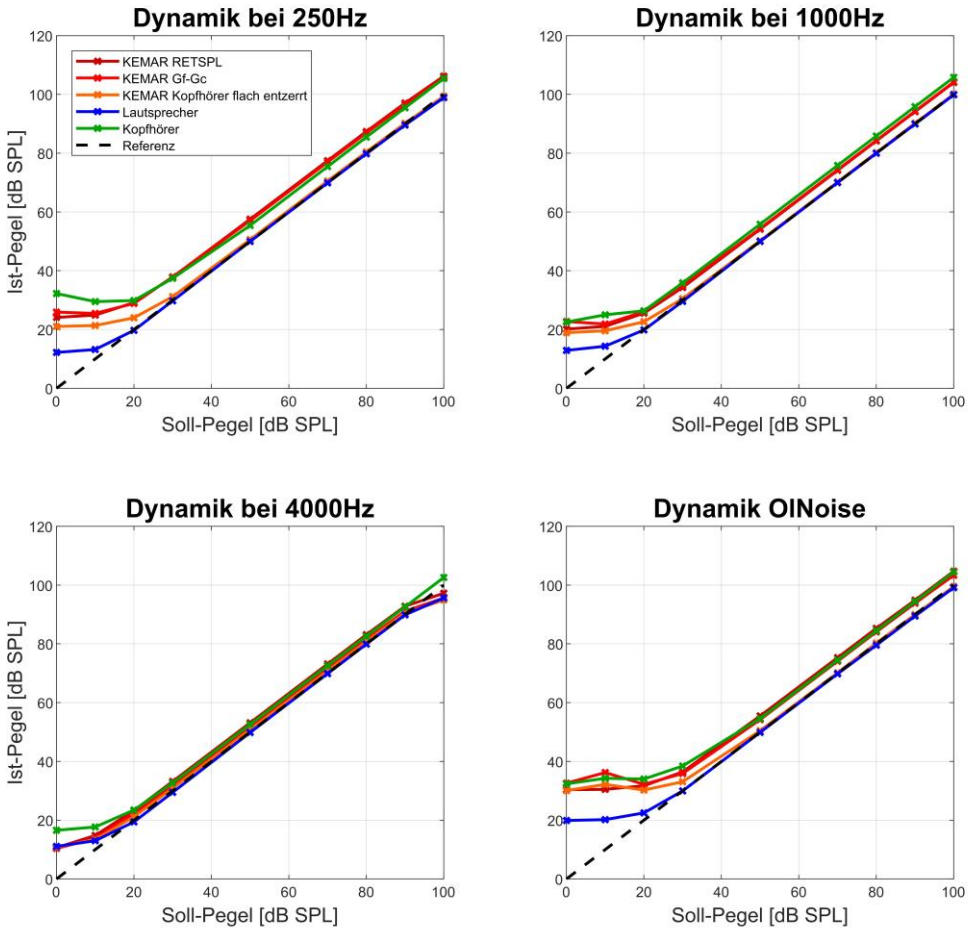


Abbildung 13: Ergebnisse der Dynamikmessung

4.3. Sprachverständlichkeit

Für die Sprachverständlichkeitsmessungen wurde der OLSA in Ruhe und im Störgeräusch gemessen und für jeden Probanden der SRT50 bestimmt, das heißt der Pegel oder das Verhältnis zwischen Störgeräusch und Testsignal, bei dem der Proband 50% verstanden hat.

In Abbildung 14 sind die SRT50 Werte in Ruhe in dB SPL bei den jeweiligen Konditionen als Boxplots dargestellt. Neben den Boxplots wurden auch die Referenzwerte eingetragen. Für den Oldenburger Satztest in Ruhe liegt der Referenzwert bei 19,9dB SPL mit einer Standardabweichung von 2,8dB SPL [3].

Bei der Probandenmessung wurde über die Kondition Kopfhörer der niedrigste SRT50 Wert erreicht. Hier haben die Probanden im Mittel noch bei einem Sprachpegel von 10,75dB SPL die Sätze zu 50% verstanden, jedoch ist hier auch die Standardabweichung mit 1,84dB SPL die höchste. Relativ nah beieinander liegen die Konditionen

Lautsprecher und audiologische Filter am KEMAR. Die mittleren SRT50 Werte bei der Verwendung der Präsentationsarten liegen zwischen 16,19dB SPL und 17,25dB SPL. Der höchste SRT50 Wert wurde bei der KEMAR-Übertragung und Anwendung des technischen Filters gemessen. Bei der KEMAR-Kondition mit dem flach entzerrten Kopfhörer wurde im Mittel ein SRT50 Wert von 19,28dB SPL gemessen.

Deutlich zu sehen ist, dass alle Konditionen im Mittel unterhalb des Referenzwertes von 19,9dB SPL liegen. Lediglich der technische Filter am KEMAR kommt in die Nähe des Referenzwertes. Der Referenzwert liegt hier noch innerhalb des Boxplots, also noch innerhalb des 75%-Perzentils. Anteilig liegen auch die audiologischen Filter am KEMAR und die Lautsprechermessung im Referenzbereich. Eine deutlich höhere Abweichung vom Referenzwert hat die Kondition Kopfhörer. Um die signifikanten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen zu bestimmen, wurde über alle Konditionen eine ANOVA angewendet. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Haupteffekt ($F(1,4)=92.29$, $p<0.001$). Da der Wert weit unter 0,05 liegt, wurde eine Post-hoc-Analyse durchgeführt. Bei der Post-hoc-Analyse wurden, mit Hilfe einer Bonferronie-Korrektur, die Unterschiede zwischen den Konditionen auf Signifikanz überprüft. Signifikante Unterschiede bestehen vor allem zum technischen Filter und zum Kopfhörer. Kein signifikanter Unterschied besteht zwischen Lautsprecherpräsentation und Präsentation über KEMAR mit GF-GC, bzw. RETSPL-Entzerrung. In der Abbildung 14 sind die signifikanten Abweichungen als Klammern dargestellt.

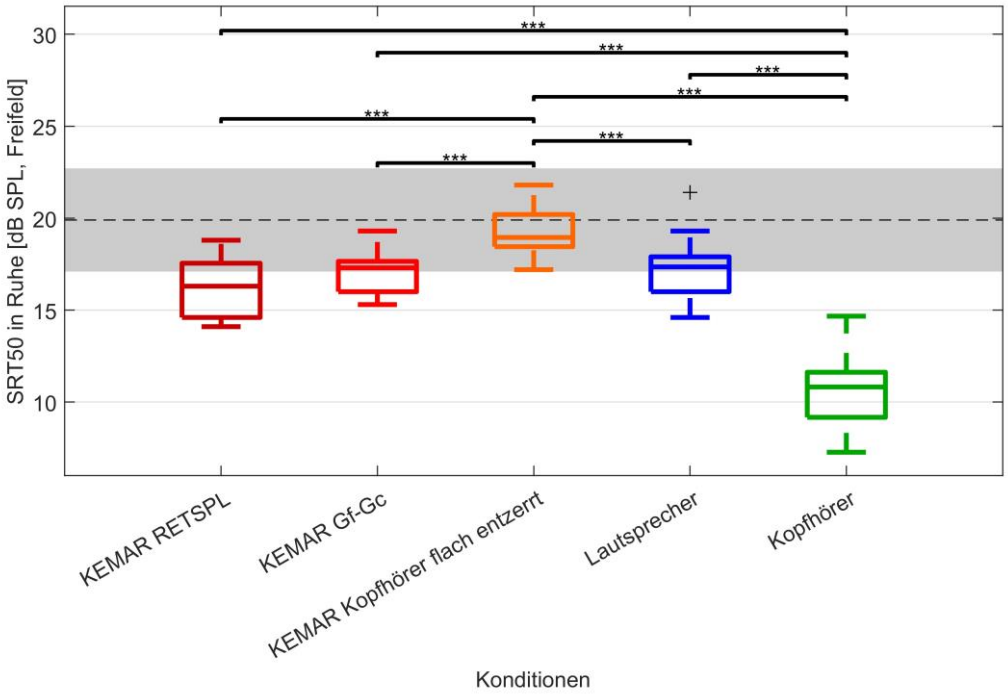


Abbildung 14: Ergebnisse der OLSA-Messungen in Ruhe. Die Boxplots zeigen das 25% und 75%-Perzentil an der oberen und unteren Box Kante, sowie den Median, welcher durch eine waagerechte Linie im Inneren der Box kenntlich gemacht wird. Das Minimum und Maximum werden durch die Whisker abgebildet und Ausreißer, die außerhalb der Whisker liegen, werden durch kleine Kreuze sichtbar gemacht.

In der Abbildung 15 sind die SRT50-Werte im Störgeräusch in dB SNR bei den jeweiligen Konditionen als Boxplots dargestellt. Das heißt, auf der Ordinate sind die Verhältnisse zwischen Sprache und Störgeräusch angegeben. Auch in dieser Abbildung sind wieder die Referenzwerte eingetragen. Der Referenzwert für den Oldenburger Satztest im Störgeräusch liegt bei -7,1dB SNR mit einer Standardabweichung von 1,1dB SPL [3]. Es ist zu erkennen, dass die Konditionen Lautsprecher, audiologische Filter am KEMAR und der technische Filter am KEMAR nahe beieinander und dicht am Referenzwert liegen. Die Konditionen Lautsprecher und KEMAR liegen zwischen -6,79dB SNR und -7dB SNR. Eine deutliche Abweichung zeigt der Kopfhörer. Über diesen wurde der SRT50 im Mittel bei -9,6dB SNR gemessen. Die größte Standardabweichung kann dabei bei der Kondition Gf-Gc Filter am KEMAR beobachtet werden. Die Standardabweichung liegt bei 0.78dB SPL.
Um auch hier die signifikanten Abweichungen innerhalb der Faktorstufen zu bestimmen, wurde über alle Konditionen eine ANOVA angewendet. Die ANOVA zeigte einen signifikanten Haupteffekt ($F(1,4)=88.81$, $p<0.001$). Im Anschluss wurde eine Post-hoc-Analyse durchgeführt. Auch hier wurde mit Hilfe der Bonferroni-Korrektur bestimmt, ob es signifikante Abweichungen gibt. Signifikante Abweichungen liegen bei der OLSA-Messung im Störgeräusch zwischen dem Kopfhörer und allen anderen Konditionen vor. In Abbildung 15 sind die signifikanten Abweichungen als Klammern dargestellt.

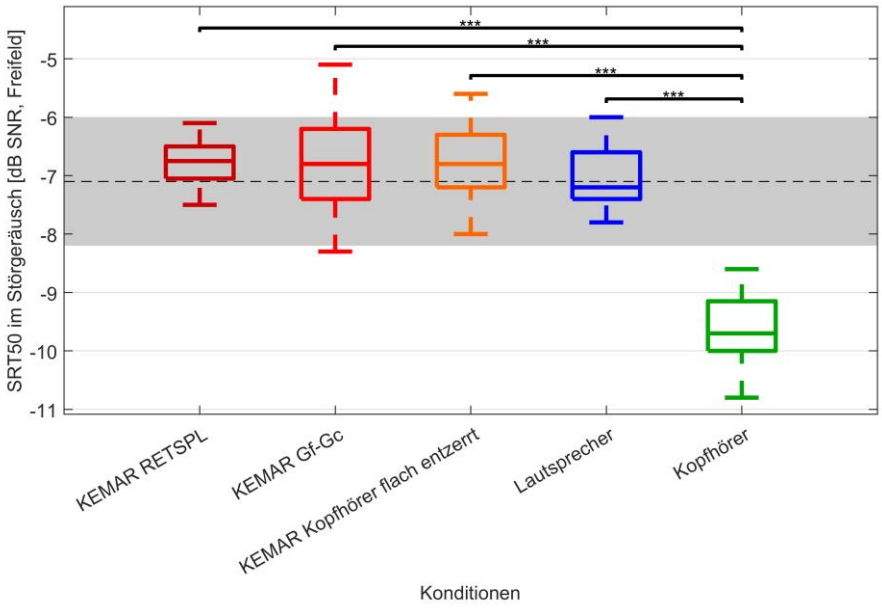


Abbildung 15: Ergebnisse der OLSA-Messungen im Störgeräusch. Die Boxplots zeigen das 25% und 75%-Perzentil an der oberen und unteren Box Kante, sowie den Median, welcher durch eine waagerechte Linie im Inneren der Box kenntlich gemacht wird. Das Minimum und Maximum werden durch die Whisker abgebildet.

Zum besseren Auslesen der Werte wurden die SRT-Mittelwerte in einer Tabelle dargestellt (siehe Tabelle A.1). Hier werden die Referenzwerte und die gemessenen Werte gegenübergestellt.

4.4. Lautheitsskalierung

Um die Lautheitsempfindung der Probanden zu bestimmen, wurden die gefitteten Daten aus der Oldenburger Messsoftware ausgelesen und mit Hilfe eines MatLab Skripts verarbeitet. Während der Messung sollten die Probanden die Lautheit eines Stimulus auf einer Skala in eine von elf Kategorien einordnen. Der Übersichtlichkeit halber wurden im Folgenden die Lautheiten CU0, CU15, CU25, CU35 und CU50 näher betrachtet. Diese entsprechen den Empfindungen *nicht gehört*, *leise*, *mittel*, *laut* und *zu laut.* Abbildung 16 zeigt die gefitteten, mittleren Lautheitsfunktionen in den fünf Konditionen. Jedem Stimulus ist ein Plot zugeordnet. Zusätzlich sind in grau die bekannten Referenzbereiche für die schmalbandigen Messungen eingezeichnet [22]. Neben den Lautheitsfunktionen wurde zur besseren Veranschaulichung die Abweichung der Kondition normalisiert zum Pegel-Mittelwert über alle Konditionen bei der jeweiligen Lautheitsstufe als Boxplots dargestellt.

Es ist zu erkennen, dass alle gemessenen Kurven innerhalb der bekannten Referenzbereiche liegen. Für die Lautheitsskalierung mit dem OlNoise kann hierzu keine Aussage getroffen werden. Innerhalb der Konditionen ist auffällig, dass die Lautheitsfunktion der Kopfhörerpräsentation etwas über den Lautheitsfunktionen der anderen Konditionen liegt. Die audiologischen Filter am KEMAR weisen ähnliche Lautheitsfunktionen auf wie

die Lautsprecherpräsentation. Die Kondition flach-entzerrter-Kopfhörer-am-KEMAR hat, bis auf bei 4000Hz, eine Lautheitsfunktion, die unterhalb der anderen Lautheitsfunktionen verläuft. Wenn man sich die Boxplots der Konditionen ansieht, fällt auf, dass auch hier die audiologischen Filter am KEMAR und die Lautsprecherpräsentation eng zusammen liegen. Abweichend davon verlaufen die Konditionen Kopfhörer und flach-entzerrter-Kopfhörer-am-KEMAR. Frequenz- und pegelabhängig streut die Abweichung vom Mittelwert. Je lauter und je leiser ein Ton wahrgenommen wurde, desto höher fallen die Abweichungen bzw. die Whisker der Boxplots aus.

Für die statistische Auswertung wurde jeweils eine Analysis of Variance (ANOVA) über die Konditionen bei allen Lautheitsstufen (CU0, CU15, CU25, CU35 und CU50) durchgeführt und bei signifikanten Ergebnissen wurde mit Hilfe einer Bonferroni-Korrektur die Signifikanzen zwischen den einzelnen Konditionen bestimmt. Signifikante Unterschiede bestehen vor allem zum technischen Filter und zum Kopfhörer.

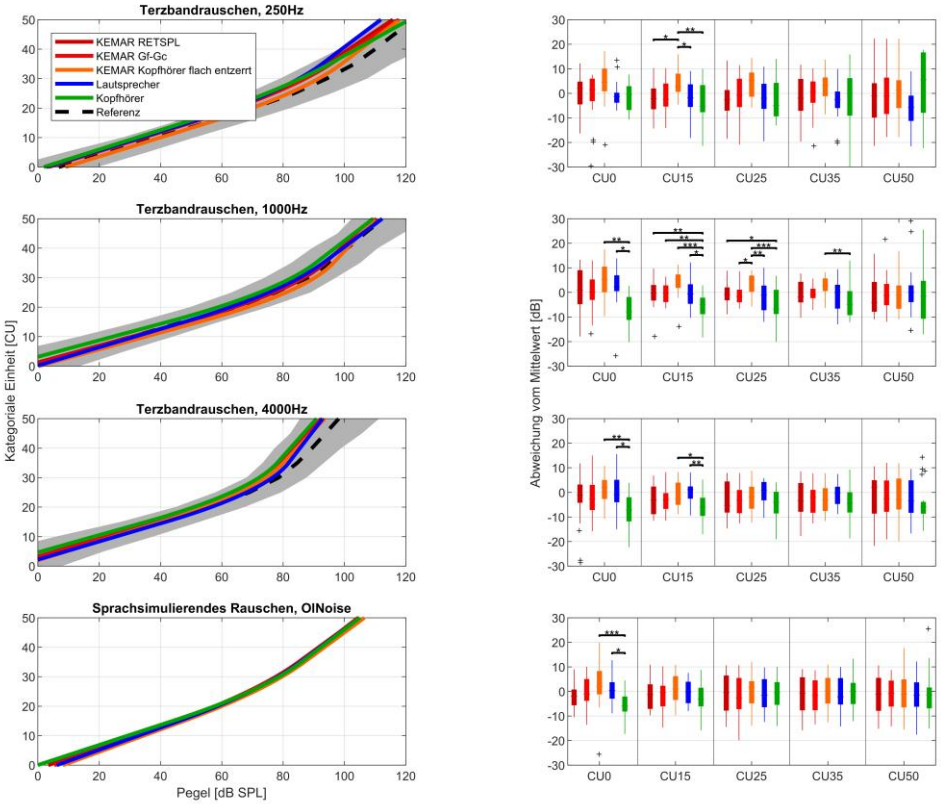


Abbildung 16: Ergebnisse der ACALOS Messungen mit schmalbandigen und breitbandigen Rauschsignalen.

Die einzelnen Werte können auch in den Tabellen A.2 bis A.5 im Anhang entnommen und nachvollzogen werden.

5. Diskussion

5.1. Bewertung der Technischen Messungen

Im Rahmen der Studie sollte evaluiert werden, ob es möglich ist, eine Freifeldpräsentation über einen KEMAR zu simulieren. Dazu wurden in den technischen Messungen die Übertragungseigenschaften, das Eigenrauschen und die Dynamik in den einzelnen Konditionen gemessen.

In den Messungen fällt auf, dass sowohl bei den Übertragungseigenschaften (Abbildung 12), als auch in der Dynamikmessung (Abbildung 13) die gemessenen Werte des technischen Filters am KEMAR und der Kopfhörerpräsentation über den Werten der Lautsprecherpräsentation und der audiologischen Filter am KEMAR liegen. Die gemessenen Werte der Kopfhörerpräsentation liegen über denen der Lautsprecherpräsentation, da die Messungen an das Freifeld angepasst wurden. Bei einer Freifeldanpassung muss der Pegel des Kopfhörers höher eingestellt sein als der des Lautsprechers, um als gleich laut wahrgenommen zu werden [15]. Bei der Ausgabe des Signals durch die Messsoftware (OMA) wurden dabei die Gf-Gc-Werte berücksichtigt, um den Eindruck einer Freifeldpräsentation zu schaffen. Die Gf-Gc-Werte wurden dabei aufaddiert, sodass der Pegel des Kopfhörers leicht erhöht war im Gegensatz zum Lautsprecher. Ähnliches passiert auch bei den audiologischen Filtern. Der Pegel vom Lautsprecher zum KEMAR war auf 80dB SPL kalibriert. Durch den Korrekturfilter mit den Gf-Gc-Werten oder den RETSPL-Werten stieg der Pegel am Kopfhörer über die 80dB hinaus. Daher ähneln sich die Konditionen audiologische Filter am KEMAR und der Kopfhörer. Zusammenfassen lässt sich dazu also sagen, dass die Differenz der Konditionen zu der Lautsprecherpräsentation den Normwerten Gf-Gc bzw. RETSPL entsprechen. Der technische Filter wurde dagegen vollkommen einem flachen Frequenzgang angepasst. Dabei machte es kaum einen Unterschied, ob der flache Frequenzgang am Kopfhörer oder am Lautsprecher eingestellt wurde. Da der Frequenzgang am Lautsprecher über die Messsoftware auch flach war, ähneln sich die beiden Konditionen sowohl in der Übertragung als auch in der Dynamik.

Neben den Übertragungseigenschaften wurde auch noch das Eigenrauschen aller Konditionen gemessen (Abbildung 12). Zu sehen ist, dass die Höhe des Eigenrauschens abhängig vom Übertragungsmedium ist. Die Ergebnisse der Messungen in den KEMAR-Konditionen weisen das höchste Eigenrauschen auf, da diese sowohl vom Lautsprecher als auch den KEMAR Mikrofonen abhängig sind. Der KEMAR selbst hatte ein tieffrequentes Eigenrauschen von 27.34dB A, welcher im Rahmen der Studie als Zwischenmessung mit aufgenommen wurde. Dazu kommt das Eigenrauschen des Lautsprechers, welcher baugleich zum Lautsprecher im Probandenraum ist. Daher wird von einem Grundrauschen von 19.39dB A allein durch den Lautsprecher ausgegangen. Obwohl der Lautsprecher in der Messung das geringste Eigenrauschen aufweist, ist zu bezweifeln, dass die Messung wirklich die ruhigste für den Probanden in der aktiven Anwendung ist. Zu bedenken sind zum einen die körpereigenen Geräusche des Probanden und des Versuchsleiters. Zum anderen wurden in der Zeit der Probandenmessungen im Institut Lärmmessungen an Hörsystemen durchgeführt. Diese Messungen umfassen hohe tieffrequente Pegel, die möglicherweise aus den nebenliegenden Räumlichkeiten auch einen Einfluss auf diese Messung hatten.

Betrachtet man nun nochmal die Dynamikmessung (Abbildung 13), so ist auffällig, dass vor allem bei niedrigen Soll-Pegeln schon ein hoher Ist-Pegel zu sehen ist. Dies ist auf das Eigenrauschen zurückzuführen, welches

frequenzabhängig mal höher und mal niedriger ausfällt, wie auch in den Messungen der Übertragungseigenschaften. Je nach Kondition und je nach Frequenz fällt das Eigenrauschen zum Beispiel bei 100Hz etwas leiser aus als bei 250 Hz oder breitbandig betrachtet. Auch in den hohen Soll-Pegeln ist eine kleine Abweichung bei 4000 Hz zu sehen. Die Dynamik des Lautsprechers scheint hier eingeschränkt zu sein, da der Pegel ab 90dB SPL Soll-Pegel nicht mehr linear ansteigt. Der Pegel steigt zwar noch weiter an, jedoch mit einer Kompression. Ein Sättigungsbereich wurde im Rahmen der Arbeit nicht bestimmt. Diese Erkenntnis deckt sich auch mit Messergebnissen, die in der Vergangenheit intern über den Genelec Lautsprecher gemessen wurden. Auf die KEMAR-Konditionen hat dies auch einen Einfluss, da auch hier die Dynamik komprimiert ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Kondition von der Übertragung des baugleichen Lautsprechers auf den KEMAR abhängig ist. Für zukünftige Messungen wäre es interessant, bei noch höheren Soll-Pegeln zu messen, um die Grenzen der Messkonditionen zu testen und den Aufbau so für Messungen mit hörbeeinträchtigen Menschen weiter zu evaluieren.

5.2. Bewertung der Sprachverständlichkeitsmessungen

In den audiologischen Messungen wurde das Sprachverstehen in Ruhe und im Störgeräusch mit Hilfe des OLSA gemessen (Abbildungen 14, 15). In Ruhe zeigen sich signifikante Unterschiede aller Präsentationsarten zur Kopfhörerkondition und zum technischen Filter am KEMAR. Der SRT-Wert bei einer Messung über den Kopfhörer liegt bei 10.8dB SPL und der SRT-Wert bei der Verwendung des technischen Filters am KEMAR liegt bei 18.9dB SPL. Im Gegensatz dazu liegt der SRT-Wert bei Verwendung des audiologischen Filters am KEMAR und des Lautsprechers relativ dicht beieinander, zwischen 16.3dB SPL und 17.35dB SPL. Der Unterschied in den Messergebnissen lässt sich auf die Einstellung der Filter und die technischen Messungen zurückführen. Die audiologischen Filter bzw. die Korrekturwerte Gf-Gc und RETSPL sollen dem Hören über das Freifeld nachempfunden sein [8]. Indem die Filter bei der Entzerrung angewendet werden, hört der Proband ähnlich einer wirklichen Freifeldpräsentation. Die Notwendigkeit der Filter wurde schon im Kapitel 2.2 angesprochen. Der Pegel am Kopfhörer muss höher eingestellt sein, um gleich laut empfunden zu werden wie eine Lautsprecherpräsentation. In den technischen Messungen war zu sehen, dass dies sowohl in der Messung der Übertragungseigenschaften als auch in der Dynamikmessung eingehalten wurde (siehe Kapitel 5.1). Der technische Filter am KEMAR wurde dagegen etwas anders implementiert. Er soll einem flach entzerrten Kopfhörer nachempfinden, wodurch der Schalldruck am KEMAR an den Ohren des Probanden repliziert, wird [1]. Dies und ein deutlich höheres Eigenrauschen als das des Kopfhörers und des Lautsprechers können zu einem signifikanten Unterschied führen. Ein eher unerwartetes Verhalten weist das Ergebnis einer Kopfhörerpräsentation auf. Durch die Anwendung der Gf-Gc-Werte in der Messsoftware während der Messung wäre anzunehmen gewesen, dass sich die Werte der Lautsprecher und Kopfhörerpräsentation nicht allzu stark unterscheiden. Die Annahme wird dadurch bestärkt, dass die Referenzwerte für den OLSA mit dem gleichen Kopfhörer gemessen wurde wie in dieser Studie von Wagner et al. [3]. Jedoch zeigt Abbildung 14, dass der SRT des Kopfhörers deutlich besser ist und sich signifikant von der Lautsprecherpräsentation unterscheidet. Während der Messung sollte immer das Eigenrauschen im Auge behalten werden. Das Eigenrauschen in den KEMAR-Konditionen war im Vergleich zum Lautsprecher und zum Kopfhörer relativ

hoch. Da die Messung des Sprachverstehens in Ruhe eine Messung an der Hörschwelle darstellt und diese teilweise mit dem Eigenrauschen überlappt, sind die Messergebnisse mit Vorsicht zu interpretieren. Trotzdem gab es jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen Lautsprecher- und KEMAR-Präsentation bei passender Entzerrung. Nach Absprache mit dem Oldenburger Hörzentrum kann jedoch vor allem die Anwendung des Speech-Level-Offsets (den standardmäßig angewendeten Gf-Gc-Werten) eine Rolle spielen. Die Anwendung dieser Werte sollte bei der Messung des OLSA mit einem HDA200 wegfallen. Es ist bekannt, dass die Anwendung dieser Werte zu der starken Abweichung von der Lautsprecherpräsentation führt. Zusätzlich wurden die Referenzwerte für den OLSA in Ruhe monaural aufgenommen. Während der binauralen Messung ist es voraussichtlich zu einer binauralen Summation gekommen (Die Sprach wurde lauter wahrgenommen und konnte bei noch leiseren Pegeln gehört werden).

Anders sieht es bei der Messung des Sprachverstehens im Störgeräusch aus (Abbildung 15). Hier wurde nicht mehr an der Hörschwelle gemessen, sondern bei einem Rauschpegel von 60dB SPL. Zu sehen ist hier, dass die SRT-Werte sowohl über den KEMAR unter Anwendung von Filtern gemessen als auch über den Lautsprecher gemessen, ähnlich ausfallen. Die Werte liegen zwischen 6.75dB SNR und 7.2 dB SNR. Auch hier weicht der SRT-Wert bei der Verwendung einer Kopfhörerpräsentation signifikant ab, jedoch nur um 2.5dB. Dies bestärkt die Annahme, dass die Kopfhörerpräsentation richtig durchgeführt wurde und die Abweichungen andere Gründe haben. Nach Absprache mit dem Oldenburger Hörzentrum, lassen sich die signifikanten Unterschiede der SRT-Werte, gemessen über den Kopfhörer und den Lautsprecher, dadurch erklären, dass die Referenzwerte mit einem diotischen (beidseits gleiches) Rauschen gemessen wurden. Bei der hier vorliegenden Arbeit wurde die Messung mit einem dichotischen (beidseits unterschiedlichen) Rauschen gemessen. Diese Einstellung war standardmäßig eingestellt. Bei einem diotischen Rauschen kommt es zu einer binauralen Summation, wodurch das Rauschen etwa 3dB lauter wahrgenommen wird als bei einem dichotischen Rauschen, bei dem es nicht zu einer internen binauralen Summation kommt. Für die KEMAR-Konditionen unter Anwendung der Filter hat dies keinen Einfluss, da dieser Art der Übertragung die Lautsprecherpräsentation zu Grunde liegt. Im Gegensatz zum OLSA in Ruhe, kann die Abwesenheit von relevanten Eigenrauschen ein Grund sein, warum im Störgeräusch alle KEMAR-Konditionen nah am Lautsprecher liegen und der technische Filter am KEMAR nicht ausreißt.

Insgesammt lässt sich erkennen, dass eine KEMAR-Übertragung ähnliche Ergebnisse bei einer Sprachverständlichkeitsmessung bringt wie eine Lautsprecher Präsentation. Wichtig ist dabei, auf den richtigen Filter zu achten und das Eigenrauschen der Übertragungsarten im Blick zu behalten. Vor allem die Filter auf Grundlage von RETSPL und Gf-Gc bieten sich für die Messung an. Zusätzlich sollten die richtigen Messbedingungen eingehalten werden. Für die Zukunft wäre eine Wiederholung der Messungen denkbar, bei der die neuen Erkenntnisse, die durch den Austausch mit dem Oldenburger Hörzentrum gewonnen wurden, in die Planung der Messungen mit einbezogen werden.

5.3. Bewertung der Lautheitsskalierung

In den audiologischen Messungen wurde außerdem eine Lautheitsskalierung von schmalbandigen und breitbandigen Rauschsignalen durchgeführt (Abbildung 16). Bei allen präsentierten Signalen ist zu sehen, dass

die Lautheitsfunktion des Kopfhörers über den anderen Lautheitsfunktionen liegt. Das heißt, dass die Kopfhörermessung generell als lauter wahrgenommen wurden. Dies macht sich auch in der Ansicht von Pegeln gleicher Lautheit bemerkbar, dadurch dass die Boxplots der Kopfhörerübertragung unter den Boxplots der anderen Konditionen liegen (also bei einem niedrigeren Pegel schon als gleich laut wahrgenommen werden). Die Lautsprecherkondition weist bis auf einige Ausnahmen ähnliche Werte wie die Referenzkurve auf. Vor allem bei 1000Hz liegen die Kurven fast aufeinander. Die Konditionen der audiologischen Filter am KEMAR weisen wie in den vorherigen Messungen ähnliche Werte auf wie die Lautsprecher-Kondition. Die Lautheitsfunktion des technischen Filters am KEMAR liegen größtenteils unter den anderen Kurven. Die Lautheitsfunktion liegt vor allem bei den als *mittellaut* und *laut* wahrgenommenen Kategorien bei 250 Hz und 1000 Hz unter den anderen Kurven. Das heißt, dass die Stimuli bei gleichem Pegel als leiser wahrgenommen wurden. Die Abweichung des technischen Filters am KEMAR vom Mittelwert ist daher häufig positiv, da bei einem höheren Pegel als bei den anderen Konditionen die jeweilige Lautheitskategorie gewählt wurde. Anders sieht es jedoch bei der Messung mit dem Sprachsimulierten Rauschen (OlNoise) aus. Bei diesem lagen die Lautheitsfunktionen aller Konditionen dicht beieinander.

Die signifikanten Abweichungen der Konditionen wurden mit Hilfe von Klammern zu den jeweiligen Boxplots kenntlich gemacht. Es ist zu sehen, dass die meisten signifikanten Unterschiede bei den Kategorien CU0 und CU15 auftreten. Diese sollten nicht vernachlässigt, jedoch mit Vorsicht interpretiert werden. In diesem Bereich liegt in den meisten Fällen das Eigenrauschen, welches bei den unterschiedlichen Konditionen unterschiedlich ausfällt und Signale möglicherweise überdeckt. Es handelt sich außerdem um gefittete Kurven, bei denen die Kategorien *nicht gehört* und *zu laut* möglicherweise nicht exakt nach Probandenangabe wiedergegeben werden. Signifikante Abweichungen treten außerdem vor allem bei 1000 Hz auf und in der Regel nur zu den Konditionen Kopfhörer und technischer Filter am KEMAR.

Es sind außerdem signifikante Abweichungen der Lautheitsfunktionen zum Referenzwert bei hohen Pegeln ab 80dB SPL erkennbar. Diese treten bei 250 Hz und 4000 Hz auf und vermehrt bei den Lautsprecher- und KEMAR-Konditionen. Diese Abweichungen, vor allem bei 4000 Hz, sind vermutlich auf die eingeschränkte Dynamik des Lautsprechers zurückzuführen, welche sich schon in Abbildung 12 gezeigt hat. Die dadurch entstandenen Verzerrungen ab einem bestimmten Pegel können für die leicht verfälschte Lautheitsempfindung verantwortlich sein. Dieses ist sowohl den Probanden als auch der Versuchsdurchführenden aufgefallen.

Insgesamt lässt sich sagen, dass auch in dieser Messung eine Präsentation, die einer Lautsprecherpräsentation ähnelt, über den KEMAR möglich. Es sollte dabei auf eine Korrektur nach RETSPL oder Gf-Gc-Werten zurückgegriffen werden.

6. Fazit und Ausblick

Das Ziel der Arbeit war die Evaluation einer simulierten Freifeldpräsentation in Echtzeit. Zu diesem Zweck wurden Lautsprecherpräsentation, Kopfhörerpräsentation und eine Präsentation über einen KEMAR mit drei verschiedenen Filtern miteinander verglichen. Bei der letzten Präsentation wurde die Stimuli über einen KEMAR aufgenommen, in Echtzeit gefiltert und über einen Kopfhörer abgegeben. Es wurden technische Messungen sowie audiologische Messungen verglichen, mit dem Ziel zu evaluieren, ob eine KEMAR Präsentation einer Lautsprecherpräsentation ähnelt.

Nach dem Vergleich der Messungen lässt sich sagen, dass es möglich ist, eine Freifeldpräsentation über einen KEMAR in Echtzeit zu simulieren. In den Messungen wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Ergebnissen der KEMAR-Präsentation mit audiologischen Filtern und der Lautsprecherpräsentation festgestellt. Aber auch der technische Filter, also der flach entzerrte Kopfhörer am KEMAR hat, zumindest in Messungen oberhalb der Hörschwelle und etwas frequenzabhängiger als die audiologischen Filter, zu einer lautsprecherähnlichen Präsentation geführt. Probleme traten vor allem bei den hörschwellennahen Tests auf, da hier der Einfluss vom Eigenrauschen der Übertragungsmedien relevant ist. Vor allem bei den KEMAR Messungen tritt ein Eigenrauschen abhängig vom Lautsprecher, vom KEMAR Mikrofon und vom Mikrofonvorverstärker auf. Im Verlauf der Messungen wurden überraschende Unterschiede zwischen einer Kopfhörer- und einer Lautsprecherpräsentation gefunden. Mit dem Kopfhörer wurden niedrigere Sprachverständlichkeitsschwellen in Ruhe gemessen, was nach Rücksprache mit dem Oldenburger Hörzentrum jedoch auf unterschiedliche Messmethoden zurückzuführen ist. In der Lautheitsskalierung wurde der Kopfhörer als lauter empfunden. Dies ist durch die Einstellung des Kopfhörers bedingt, welcher bei Betrachtung der Messungen des Übertragungsverhaltens und der Dynamik, lauter eingestellt war als der Lautsprecher.

Zusammengefasst kommt es bei einer simulierten Freifeldpräsentation vor allem auf die richtige Entzerrung und den richtigen Filter an, welcher teilweise frequenzabhängig gewählt werden sollte. Auch die technischen Limitationen des Messequipments können bei der Durchführung eine Rolle spielen. Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es möglich ist eine audiologische Messung über einen KEMAR durchzuführen. Das heißt, dass der Proband nicht im selben Raum sitzen muss, in dem die Messungen stattfinden, sondern dass die Stimuli über einen KEMAR aufgenommen, in Echtzeit übertragen, gefiltert und über einen Kopfhörer an den Probanden übertragen werden. Für diese Messungen sollten Filter nach RETSPL oder Gf-Gc verwendet werden, um den Eindruck einer Freifeldpräsentation zu schaffen. In der Zukunft wäre es interessant zu klären, wie sich die Messergebnisse der Kopfhörerpräsentation ändern, wenn man des Design der Studie noch weiter nach dem Empfehlungen des Oldenburger Hörzentrums anpasst. Außerdem ist es für weitere Studien mit hörbeeinträchtigten Menschen sinnvoll zu ermitteln, wo weitere Grenzen des Versuchsaufbaus liegen, wie beispielsweise in der Dynamik. Auch wäre es interessant den Messaufbau weiter zu verwenden und mit Hörsystemen zu evaluieren.

Literaturverzeichnis

[1] Møller, Henrik. "Fundamentals of binaural technology." *Applied acoustics* 36.3-4 (1992): 171-218.

[2] Hörzentrum Oldenburg: *Bedienungsanleitung Oldenburger Satztest*, Januar 2022.

[3] Kirsten Carola Wagener: *Factors influencing sentence intelligibility in noise*. Bibliotheks- und Informationssystem der Universität Oldenburg, 2004.

[4] Harvey Dillon, Gitte Keidser, Anna O'Brien und Heidi Silberstein: *Sound quality comparisons of advanced hearing aids*. The Hearing Journal, 56:30–40, April 2003.

[5] Florian Denk, Birger Kollmeier und Stephan M A Ernst: *High-Fidelity Hearing Instruments: Evaluating Listening Quality of a new Prototype using a Method for Evaluating Modified Listening*. Conference on Headphone Technology, 2016.

[6] H Husstedt, R Tänzer, L Wiederschein und F Denk: *Evaluation of digital wind noise reduction in hearing aids with test subjects without direct wind exposure*. 45. DGA-Jahrestagung, 2023.

[7] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN 60645-1 Akustik – Audiometer – Teil 1: Reinton Audiometer*, August 2017.

[8] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 389-8 Äquivalente Bezugs-Schwellenschalldrukpegel für reine Töne und circumaurale Kopfhörer

[9] Stephan Paul: *Binaural Recording Technology: A Historical Review and Possible Future Developments*. Acta Acustica united with Acustica, 95:767–788, September 2009.

[10] Francis Rumsey: *Spatial Audio*. Focal Press, 2001.

[11] Henrik Møller, Clemen Boje, Dorte Hammershøi und Michael Friis Sørensen: *Evaluation of artificial heads in listening tests*. 1997.

[12] Brüel & Kjaer: *Technical Documentation - Microphone Handbook*, Band 1. 2019.

[13] K Genuit: *Untersuchung der Psychoakustischen Eigenschaften von Hörereignissen bei der Kopfhörerwiedergabe*. Fortschritt der Akustik - DAGA, 1986.

[14] S Meunier, J Chatron und T Bonetto-Lemaire: *The Missing 6dB: Perceptual or Procedural Effect?* Forum Acusticum, 2020.

[15] Florian Denk, Michael Kohnen, Josep Llorca-Bofí, Michael Vorländer und Birger Kollmeier: *The "Missing 6 dB" Revisited: Influence of Room Acoustics and Binaural Parameters on the Loudness Mismatch Between Headphones and Loudspeakers*. Frontiers in Psychology, 12, März 2021.

[16] Stanley A. Gelfand: *Essentials of Audiology*. Thieme, 2016

[17] HörTech: *Oldenburger Sprachtests Überblick & Praktische Durchführung*. Technischer Bericht, HörTech Kompetenzzentrum für Hörgeräte-Systemtechnik, 2012.

[18] Kirsten Wagner, Volker Kühnel und Birger Kollmeier: *Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache 1: Design des Oldenburger Satztests*. Zeitschrift für Audiologie, (1/1999):4–15.

[19] Inga Holube, Sabine Blab, Katrin Fürsen, Silke Gürtler, Katrin Meisenbach, David Nguyen und Stefan Taesler: *Einfluss des Störgeräuschs und der Testmethode auf die Sprachverständlichkeitsschwelle von jüngeren und älteren Normalhörenden*. 11. Jahrestagung der Deutschen Gesellschaft für Audiologie, 2008.

[20] Kirsten Wagner, Thomas Brand und Birger Kollmeier: *Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache 3: Evaluation des Oldenburger Satztests*. Zeitschrift für Audiologie, 1999.

[21] Jens Ulrich und Eckhard Hoffmann: *Hörakustik 2.0 Theorie und Praxis*. DOZ Verlag Heidelberg, 2011.

[22] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN ISO 16832 2007-07 Lautheitsskalierung mit Hilfe von Kathegorien*, 2006.

[23] Hörzentrum Oldenburg: *Bedienungsanleitung "Kategoriale Lautheitsskalierung"KLS*, Januar 2022.

[24] Birger Kollmeier: *Hörflächenskalierung - Grundlagen und Anwendung der kategorialen Lautheitsskalierung für Hördiagnostik und Hörgeräteversorgung*. median-verlag von Killisch-horn GmbH, 1997.

[25] Dirk Oetting, Thomas Brand und Stephan D. Ewert: *Optimized loudness-function estimation for categoriacal loudness scaling data*. Hearing Research, Seiten 16–27, Oktober 2014.

[26] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 3745 Akustik – Bestimmung der*

Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Verfahren der Genauigkeitsklasse 1 für reflexionsarme Räume und Halbräume (ISO 3745:2012); Deutsche Fassung EN ISO 3745:2012.

[27] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: *DIN EN ISO 389-7 Bezugshörschwellen unter Freifeld und Diffusbedingungen*, 2019.

Anhang

A.1. Ethikvotum

TECHNISCHE HOCHSCHULE LÜBECK

Technische Hochschule Lübeck · Mönkhofer Weg 239 · 23562 Lübeck

Dr. Florian Denk
Fachbereich Angewandte Naturwissenschaften
Im Hause

Technische Hochschule Lübeck
Vizepräsident Forschung und Internationales
Mönkhofer Weg 239
Dienstgebäude 36
23562 Lübeck

Telefon +49 451 300-5431
Fax +49 451 300-5082
vpfi@th-luebeck.de
www.th-luebeck.de

Mein Zeichen: vo
Datum:12.05.2023

Stellungnahme der Ethikkommission

Titel der Studie: Evaluation von simulierter Freifeldpräsentation für Hörexperimente
Studienleiter: Dr. Florian Denk

Eingang Ethikkommission: 14.04.2023

Sehr geehrter Dr. Denk,

Die Ethikkommission der Technischen Hochschule Lübeck hat die von Ihnen eingereichten Unterlagen geprüft.

Es bestehen aus Sicht der Ethikkommission keine Bedenken gegen die Durchführung des o.g. Forschungsprojekts.

Wir weisen Sie darauf hin, dass die juristische Verantwortung des Leiters des Projektes entsprechend der Beratungsfunktion von dieser Stellungnahme unberührt bleibt und die ethische Verantwortung für die Durchführung des Projektes bei den jeweils am Projekt Beteiligten und der Leiterin/dem Leiter des Projektes verbleibt.

Mit freundlichen Grüßen

Prof. Dipl.-Ing. Frank Schwartze
Vorsitzender der Ethikkommission der
Technischen Hochschule Lübeck

Anlage:
Mitgliederliste der Ethikkommission

A.2. Probandeninformation und Datenschutzerklärung

Deutsches Hörgeräte Institut GmbH
Anschützstr. 1
23562 Lübeck
Tel.: 0451 305051 0
Fax: 0451 305051 99
info@dhi-online.de

Liebe Versuchsteilnehmenden,

Vielen Dank für Ihr Interesse an unserer Studie „Evaluation von simulierter Freifeldpräsentation für Hörexperimente". Der Studienleiter ist Dr. Florian Denk.

Bei dieser Studie sind keine Medikamenteneinnahmen oder andere invasive Maßnahmen erforderlich. Im Folgenden erhalten Sie von uns einige grundlegende Informationen zur Studie und den geplanten Messungen. Außerdem informieren wir Sie über den Umgang mit den erhobenen Daten. Als Aufwandsentschädigung erhalten Sie 7 Euro Anfahrtspauschale und 7 Euro für jede angefangene Stunde.

Die Teilnahme an der Studie ist freiwillig. Sie können jederzeit und ohne Angabe von Gründen Ihr Einverständnis zur Teilnahme zurücknehmen, ohne dass Ihnen hieraus irgendwelche Nachteile entstehen.

Studienziele

Im Rahmen dieser Studie werden Sprachtests mit und ohne Störgeräusch, sowie eine Lautheitsbewertung durchgeführt. Die Tests werden in zufälliger Reihenfolge teils über einen Lautsprecher und teils über einen Kopfhörer präsentiert. Dazu werden Sätze und Töne präsentiert, über deren Wahrnehmung Sie Rückmeldung geben.
Die Ergebnisse dienen dazu, verschiedene Arten der Schallpräsentation über Lautsprecher und Kopfhörer für künftige audiologische Studien zu evaluieren.

Studienumfang und geplanter Ablauf

Die Studie wird von einer ausgebildeten Hörakustikergesellin im Rahmen einer Bachelorarbeit an der Technischen Hochschule Lübeck und dem Deutschen Hörgeräte Institut GmbH durchgeführt.

Die Studie findet an einem Versuchstag über einen Zeitraum von ca. zwei Stunden im Raum G001 der Deutsches Hörgeräte Institut GmbH in der Anschützstraße 1, 23562 Lübeck statt. Zu Beginn der Studie wird Ihr Ohr auf optische Auffälligkeiten überprüft und anschließend Ihre Reinton-Hörschwellen bestimmt. Zusätzlich findet eine kurze Anamnese statt.

Die eigentliche Messung beinhaltet einen Sprachverständlichkeitstest („Oldenburger Satztest"), wobei Ihnen kurze Sätze mit und ohne gleichzeitig laufendes Störgeräusch präsentiert werden, die Sie nachsprechen sollen. Dabei wird der Sprachpegel so eingestellt, dass ein Sprachverstehen von 50% erreicht wird. Zusätzlich wird eine Lautheitsskalierung durchgeführt, bei der die wahrgenommene Lautheit von verschiedenen Testtönen in Abhängigkeit ihres physikalischen Pegels ermittelt wird. Hierfür ist es nötig, dass pro Kondition einmal ein Testton abgespielt wird, der als „extrem laut" oder „zu laut" bewertet wird. Die Ausgangspegel sind nach geltenden Normen begrenzt und die Präsentation von hohen Pegels auf ein Minimum reduziert, sodass eine Gefährdung Ihres Gehörs durch Exposition von hohen Schallpegeln ausgeschlossen werden kann. Der maximale Pegel, der von der Messapparatur erzeugt werden kann, beträgt 110 dB

SPL. Die Testtöne werden abwechselnd sowohl über einen Kopfhörer als auch über einen Lautsprecher dargeboten.

Sollten Ihnen die akustischen Signale zu irgendeinem Zeitpunkt dennoch zu laut erscheinen, teilen Sie das bitte unverzüglich dem Testdurchführenden mit. Dieser befindet sich die gesamte Zeit vor Ort und wird die Messung dann umgehen unterbrechen. Sie haben auch selbst die Möglichkeit, das Experiment durch Abnehmen des Kopfhörers bzw. Verlassen des Raumes jederzeit zu beenden.

Die Messungen erfordern einen hohen Grad an Aufmerksamkeit, daher wird für regelmäßige Pausen gesorgt. Sollten Sie eine zusätzliche Pause wünschen, teilen Sie dies dem Versuchsleiter einfach mit.

Deutsches Hörgeräte Institut GmbH
Anschützstr. 1
23562 Lübeck
Tel.: 0451 305051 0
Fax: 0451 305051 99
info@dhi-online.de

Einwilligungserklärung zur Teilnahme an der Studie „Evaluation von simulierter Freifeldpräsentation für Hörexperimente"

☐ Ich bestätige hiermit, dass die im Rahmen der Studie erhobenen Daten und Studienbefunde auf Fragebögen und elektronischen Datenträgern aufgezeichnet werden und anonymisiert für wissenschaftliche oder historische Forschungszwecke verwendet werden.

☐ Ich erkläre mich hiermit einverstanden, dass meine erhobenen Daten in anonymisierter Form für Publikationszwecke in wissenschaftlichen Zeitschriften sowie auf Konferenzen präsentiert werden.

☐ Ich versichere hiermit, dass ich freiwillig an dieser Studie teilnehme, wobei mir vorbehalten ist, meine Mitwirkung jederzeit ohne Angabe von Gründen zu beenden. In diesem Fall werde ich für meine Teilnahme anteilig bezahlt.

☐ Ich habe eine schriftliche Information zur oben genannten Studie und die zutreffende Erklärung zum Datenschutz erhalten, gelesen und verstanden. Ich wurde über den Inhalt, die Vorgehensweise sowie die Risiken der Studie ausführlich und in verständlicher Form aufgeklärt. Meine Fragen wurden ausreichend beantwortet. Ich hatte genügend Zeit, mich gegen eine Teilnahme an der Studie zu entscheiden und willige hiermit in diese ein.

Lübeck, den _____

_____
Teilnehmer/in

_____ _____
Unterschrift Studiendurchführende/r

Die Einwilligung kann jederzeit widerrufen werden. Jedoch werden Verarbeitungen der Daten bis zum Widerruf der Einwilligung nicht berührt.
Eine Einsicht der temporär pseudonymisierten und später anonymisierten Daten ist für die betroffene Person auf schriftlichen Antrag an das Unternehmen jederzeit möglich. Eine Kopie der Einwilligungserklärung kann jederzeit durch die betroffene Person eingefordert werden.

Deutsches Hörgeräte Institut GmbH
Anschützstr. 1
23562 Lübeck
Tel.: 0451 305051 0
Fax: 0451 305051 99

Datenschutzerklärung zur Teilnahme an Studien

Danke, dass Sie sich bereit erklären, freiwillig an unseren Studien teilzunehmen.

Die Datenerhebung erfolgt zum Zweck des jeweiligen Studienziels, das mit der beiliegenden Erklärung ausführlich erklärt wird. Verantwortlich für die Datenspeicherung und Verarbeitung ist das Deutsche Hörgeräte Institut GmbH, Lübeck.

Die hierbei erhobenen Daten lassen sich in zwei Kategorien einteilen, die streng getrennt voneinander und unterschiedlich verarbeitet werden.

Personenbezogene Daten wie Name, Anschrift und weitere Kontaktdaten werden lediglich zur Kommunikation und Abwicklung der Aufwandsentschädigung benutzt. Diese Daten werden nach Abschluss der Studie und möglichen Folgestudien gelöscht, spätestens am Ende des dritten Kalenderjahrs nach Durchführung der Studie. Ihre Kontaktdaten werden nur in dem Fall darüber hinaus gespeichert, dass Sie separat eingewilligt haben, in unsere Probandendatenbank aufgenommen zu werden, um über die mögliche Teilnahme an künftigen Studien benachrichtigt zu werden.

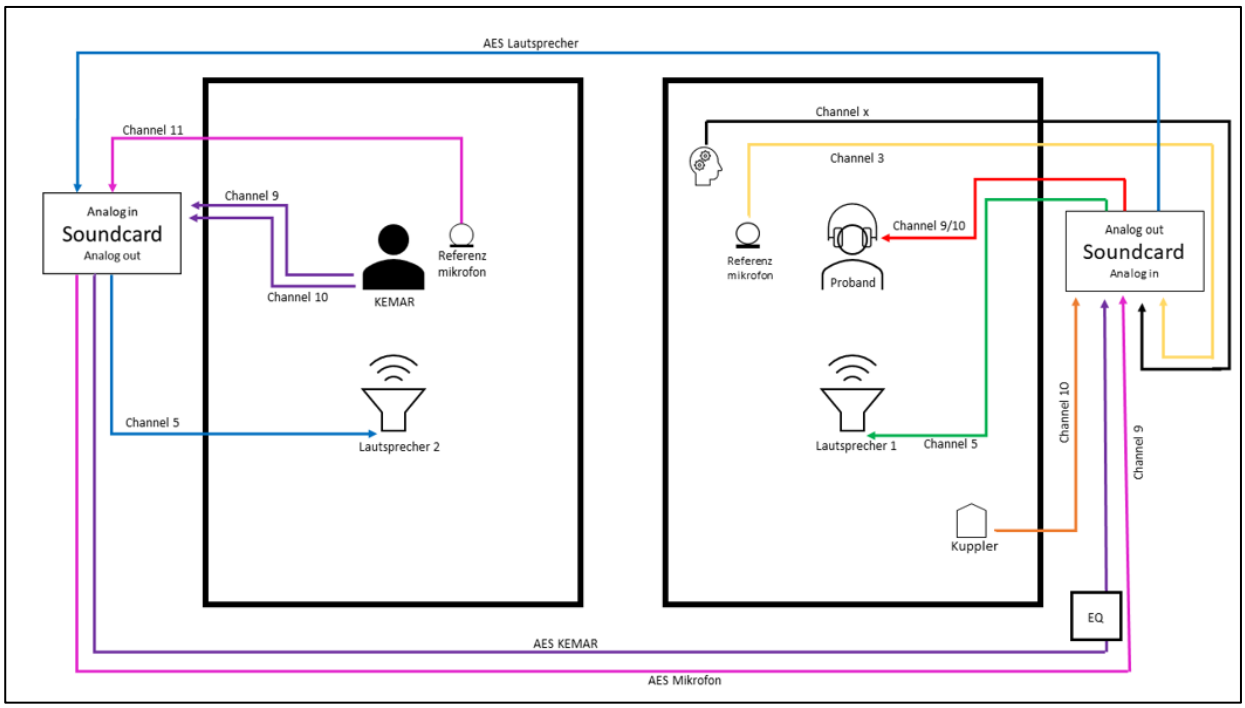
Studiendaten, wie in dieser Studie erzielten Daten über Ihr Gehör (Sprachverstehen, Hörfähigkeit bei psychoakustischen Experimenten) sowie Alter und Geschlecht werden unter Verwendung eines Pseudonyms und ohne Speicherung mit Bezug zu Ihrem Klarnamen erhoben. Das Pseudonym besteht in der Regel aus einer Nummern-Buchstabenkombination, die nicht mit Ihrem Namen in Verbindung steht.

Die Zuordnung zwischen den Pseudonymen und Klarnamen ist lediglich eine einzige Liste (die Code-Liste) möglich. Die Code-Liste wird separat, ausschließlich in Papierform und speziell gesichert abgelegt. Die Code-Liste wird nach Abschluss der Studie maximal zehn Jahre aufbewahrt, um eine Rückverfolgung der Daten innerhalb des Instituts, und eine Verbindung zu möglichen Folgestudien zu ermöglichen. Nach Vernichtung der Codierungsliste ist eine Zuordnung der Studiendaten zu den teilnehmenden Personen nicht mehr möglich. Bis zur Vernichtung der Code-Liste können Sie ohne Angabe von Gründen die Löschung der von Ihnen erhobenen Daten verlangen.

Die Studiendaten werden dauerhaft unter dem Pseudonym gespeichert und von Mitarbeitern des Deutschen Hörgeräte Instituts, und eventuell von anderen beteiligten Wissenschaftlern ausgewertet. Eine Veröffentlichung der Daten zu wissenschaftlichen Zwecken erfolgt ohne eine mögliche Zuordnung zu Ihrer Person.

Wenn Sie eine Rückmeldung nach der Studie erhalten möchten, so ist dies möglich. Wenden Sie sich dazu bitte an den Studiendurchführenden oder verwenden Sie die angegeben Kontaktdaten.

A.3. Messaufbau im Detail



A.4. Messergebnisse

Tabelle 2: Ergebnisse Oldenburger Satztest

Darbietung	RETSPL Pegel (dB SPL)	Gf-Gc Pegel (dB SPL)	flacher Frequenzgang Pegel (dB SPL)	Lautsprecher Pegel (dB SPL)	Kopfhörer Pegel (dB SPL)
Wert in Ruhe (dB SPL)	16.19	17.03	19.28	17.25	15.58
Standardabweichung (dB SPL)	1.59	1.14	1.23	1.53	1.84
Wert im Störgeräusch (dB SPL)	-6.79	-6.78	-6.80	-7.0	-9.66
Standardabweichung (dB SPL)	0.41	0.78	0.64	0.51	0.59

Tabelle 3: Ergebnisse Lautheitsskalierung breitbandig

Darbietung	RETSPL Pegel (dB SPL)	Gf-Gc Pegel (dB SPL)	flacher Frequenzgang Pegel (dB SPL)	Lautsprecher Pegel (dB SPL)	Kopfhörer Pegel (dB SPL)
CU 50 (zu laut)	104.43	104.73	106.50	104.98	109.85
CU 35 (laut)	85.68	85.0	86.96	85.59	90.81
CU 25 (mittel)	69.32	68.48	70.61	69.24	73.95
CU 15 (leise)	45.26	45.24	47.61	46.05	48.75
CU 0 (nicht gehört)	3.37	5.34	8.12	6.12	4.69

Tabelle 4: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 250Hz

Darbietung	RETSPL Pegel (dB SPL)	Gf-Gc Pegel (dB SPL)	flacher Frequenzgang Pegel (dB SPL)	Lautsprecher Pegel (dB SPL)	Kopfhörer Pegel (dB SPL)
CU 50 (zu laut)	115.77	117.69	117.97	111.86	125.65
CU 35 (laut)	94.31	95.56	99.04	92.69	99.64
CU 25 (mittel)	75.85	76.77	81.83	75.39	79.04
CU 15 (leise)	49.06	49.90	55.43	49.03	51.94
CU 0 (nicht gehört)	2.64	3.53	8.94	2.72	6.40

Tabelle 5: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 1000Hz

Darbietung	RETSPL Pegel (dB SPL)	Gf-Gc Pegel (dB SPL)	flacher Frequenzgang Pegel (dB SPL)	Lautsprecher Pegel (dB SPL)	Kopfhörer Pegel (dB SPL)
CU 50 (zu laut)	109.35	110.50	109.79	112.31	112.82
CU 35 (laut)	93.62	93.30	96.39	93.01	94.09
CU 25 (mittel)	77.01	76.27	80.97	75.28	75.78
CU 15 (leise)	48.14	48.11	52.55	47.80	45.82
CU 0 (nicht gehört)	-4.36	-2.46	0.19	-0.73	-7.87

Tabelle 6: Ergebnisse Lautheitsskalierung schmalbandig 4000 Hz

Darbietung	RETSPL Pegel (dB SPL)	Gf-Gc Pegel (dB SPL)	flacher Frequenzgang Pegel (dB SPL)	Lautsprecher Pegel (dB SPL)	Kopfhörer Pegel (dB SPL)
CU 50 (zu laut)	92.80	92.41	93.55	92.88	103.89
CU 35 (laut)	79.63	79.25	80.09	81.78	91.03
CU 25 (mittel)	64.92	64.72	65.66	68.07	76.06
CU 15 (leise)	38.36	38.68	40.29	41.74	48.31
CU 0 (nicht gehört)	-10.37	-9.02	-5.95	-7.23	-2.91

A.5. Verwendetes Equipment

Tabelle 7: Verwendetes Messequipment

Art	Firma	Typ	Seriennummer
Lautsprecher	Genelec	8351A DSP	No. 8351AP61003826, 8351AP61000779
Kopfhörer	Sennheiser	Typ HDA200	No. 027092
Referenzmikrofon	Brüel & Kjaer	Typ 2669	No. 2605254, 2902268
Kuppler	Brüel & Kjaer	Typ 4153	No. 2170170
Testfixture	G.R.A.S.	45CA	No. 251020
Mikrofon Power Supply	Brüel & Kjaer	2829	No. 3262624, 2889777
Equalizer	MiniDSP	Open DRC-DI	No. 202-2504
Soundkarte	RME Audio	FIREFACE 802	No. 23861608, 23742249
Sound & Vibration Power Module	G.R.A.S.	Typ 12AR	No. 359847

A.6. Randomisierung der Konditionen bei den Probandenmessungen am Beispiel von P1-P5

P1	KEMAR (Gf-Gc)	Kopfhörer	KEMAR (flacher Frequenzgang)	KEMAR (RETSPL-Entzerrung)	Lautsprecher
	OLSA in Ruhe	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (breitbandig)
	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe	OLSA im Störgeräusch	OLSA im Störgeräusch
	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)
	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe

P2	KEMAR (flacher Frequenzgang)	KEMAR (Gc-Gf)	KEMAR (RETSPL-Entzerrung)	Lautsprecher	Kopfhörer
	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)
	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)
	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe
	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch

P3	Lautsprecher	KEMAR (flacher Frequenzgang)	KEMAR (Gf-Gc)	Kopfhörer	KEMAR (RETSPL-Entzerrung)
	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe	OLSA in Ruhe	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)
	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch
	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe
	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)

P4	Kopfhörer	KEMAR (RETSPL-Entzerrung)	Lautsprecher	KEMAR (flacher Frequenzgang)	KEMAR (Gf-Gc)
	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch
	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)
	OLSA im Störgeräusch	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe
	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)

P5	KEMAR (RETSPL-Entzerrung)	Lautsprecher	Kopfhörer	KEMAR (Gf-Gc)	KEMAR (flacher Frequenzgang)
	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch
	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (breitbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (schmalbandig)	ACALOS (schmalbandig)
	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch	OLSA in Ruhe
	ACALOS (breitbandig)	OLSA im Störgeräusch	ACALOS (schmalbandig)	OLSA in Ruhe	ACALOS (breitbandig)

A.7. Einweisung OLSA

Mit diesem Test möchte ich Ihr 50%ige Sprachverstehensschwelle messen. Dazu werden Sie gleich über den (KEMAR, Lautsprecher, Kopfhörer) einen Sprecher hören. Dieser wird Sätze vorsprechen, die aus einem Namen, Verb, Zahlwort, Adjektiv und Objekt zusammengesetzt sind und keinen Sinn ergeben. Ein Beispiel für so einen Satz wäre: *Peter kauft acht nasse Sessel*. Ich möchte Sie bitten, die Sätze so gut es geht nachzusprechen, raten ist dabei auch erlaubt, falls Sie sich nicht sicher sind. Ich möchte Sie trotzdem bitten, möglichst spontan zu antworten. Der Test ist in 2 Blöcke aufgeteilt. In einem Block ist neben dem Sprecher auch ein Störgeräusch zu hören. Dieses ist immer gleichbleibend und die Sprache ist mal lauter und mal leiser und pegelt sich so ein, dass 50% verstanden werden. In dem anderen Block ist nur der Sprecher zu hören. Auch hier wird die Sprache so verändert, dass 50% verstanden werden. Vor der Messung machen wir ein kurzes Training, damit Sie sich an das Testmaterial und das Testdesign gewöhnen können. Haben Sie zu der Messung noch Fragen?

A.8. Einweisung ACALOS

Mit der Messung möchte ich Ihr Lautheitsempfinden messen. Dazu werden Sie gleich über den (KEMAR, Lautsprecher, Kopfhörer) unterschiedliche, kurze Rausch-Signale hören. Ich möchte Sie bitten die Signale zu bewerten. Auf dem Bildschirm neben Ihnen erscheint gleich eine Skala mit elf Kategorien von *extrem leise* bis *extrem laut*. Hier möchte ich Sie bitten eine Kategorie auszuwählen. Auch die Zwischenkategorien können

dabei genutzt werden, wenn Sie sich zwischen zwei Kategorien nicht entscheiden können. Ich möchte Sie bitten möglichst spontan zu antworten. Haben Sie zu der Messung noch Fragen?