



Fakultät für Medizin der Technischen Universität München

Klinik und Poliklinik für Hals-, Nasen- und Ohrenheilkunde
des Klinikums rechts der Isar
der Technischen Universität München

**Änderungen der peripheren und zentralen
Schallverarbeitungsleistungen mit dem Alter**

Dominik Laurin Pürner

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Medizin der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Medizin
genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr. Ernst J. Rummeny
Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr.-Ing. Thomas Janssen
2. Prof. Dr. Dr. Klaus-Dietrich Wolff

Die Dissertation wurde am 17.09.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und
durch die Fakultät für Medizin am 20.03.2019 angenommen.

Für meine Familie.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Anatomische und physiologische Grundlagen des Hörprozesses.....	3
1.1.1	Periphere Schallverarbeitung: Äußeres Ohr, Mittelohr, Innenohr, Hörnerv.....	3
1.1.1.1	Anatomie und Physiologie.....	3
1.1.1.2	Wichtige Untersuchungsverfahren	5
1.1.1.2.1	Überblick.....	5
1.1.1.2.2	Otoakustische Emissionen (OAE).....	5
1.1.2	Zentrale Schallverarbeitung: Hirnstamm und Gehirn.....	9
1.1.2.1	Anatomie und Physiologie.....	9
1.1.2.2	Wichtige Untersuchungsverfahren	10
1.1.2.2.1	Brainstem evoked Response Audiometry (BERA).....	11
1.1.2.2.2	Sprachtests.....	12
1.1.2.2.3	Zentrale Tondiskriminationstests	13
1.2	Presbyakusis - Altersschwerhörigkeit.....	16
1.2.1	Begriffsklärung und Epidemiologie.....	16
1.2.2	Ätiopathogenese der Presbyakusis.....	17
1.2.3	Symptome und Komplikationen der Presbyakusis	23
1.2.4	Diagnostik bei Presbyakusis	24
1.2.5	Therapie der Presbyakusis	25
1.3	Zielsetzung und Studienkonzept	26
2	Material und Methoden.....	28
2.1	Studienpopulation	28
2.1.1	Kontrollkollektiv	31
2.1.2	Ü60-Kollektiv mit Subkollektiven.....	32
2.2	Verwendete Messgeräte	33
2.3	Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12.....	35

2.4	Hearing Handicap Inventory for the Elderly - Screening Version (HHIE-S).....	36
2.5	Otoskopie	37
2.6	Subjektive Messmethoden	38
2.6.1	Tonschwellenaudiogramm (PTA).....	38
2.6.2	Sprachverständnistests	39
2.6.2.1	Oldenburger Satztest (OLSA).....	39
2.6.2.2	Speech Understanding in Noise (SUN)-Test.....	40
2.6.3	Zentrale Tondiskrimination: Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik (LIPP)	41
2.7	Objektive Messmethoden.....	45
2.7.1	Tympanometrie	45
2.7.2	Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen (DPOAE)	46
2.7.3	Hirnstammaudiometrie (Brainstem evoked Response Audiometry, BERA).....	48
2.8	Überblick über den Untersuchungsablauf.....	49
2.9	Automatisiertes Auslesen der Messdaten	50
2.10	Methoden zur statistischen Auswertung der Messdaten	50
3	Ergebnisse.....	55
3.1	Charakteristika der Studienpopulation.....	56
3.1.1	Altersverteilung der Subkollektive	56
3.1.2	Durchschnittlicher Hörverlust gemäß modifizierter WHO-Klassifikation und Hörschwellenverläufe im Tonschwellenaudiogramm	58
3.1.3	Risikofaktoren für Gehörschädigung: Ergebnisse des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12.....	62
3.2	Ergebnisse der einzelnen Messmethoden	66
3.2.1	Hearing Handicap Inventory for the Elderly - Screening Version (HHIE-S).....	66
3.2.2	Ergebnisse der subjektiven Messmethoden	68
3.2.2.1	Sprachverständnistests	68
3.2.2.1.1	Oldenburger Satztest (OLSA)	68
3.2.2.1.2	Speech Understanding in Noise (SUN)-Test.....	70

3.2.2.2	Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik (LIPP).....	73
3.2.3	Ergebnisse der objektiven Messmethoden.....	79
3.2.3.1	DPOAE-Schwellen.....	79
3.2.3.2	Hirnstammaudiometrie (BERA).....	83
3.3	Korrelationsanalyse.....	85
3.3.1	Einflussfaktoren auf den HHIE-S-Score: Korrelation mit Alter, Tonschwellenaudiogramm (PTA) und OLSA	85
3.3.2	Korrelation von OLSA und SUN-Test.....	88
3.3.3	Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik: Korrelation mit PTA 1kHz, BERA III-V und OLSA	88
3.3.4	Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellenschätzung: Korrelation mit subjektivem Tonschwellenaudiogramm (PTA).....	90
3.3.5	Durchschnittshörverlust bei 0,5-4kHz versus Durchschnittshörverlust bei 0,5-8kHz: Korrelation mit Sprachverständnistests und HHIE-S	95
4	Diskussion	97
4.1	Bewertung des Studienkollektivs.....	97
4.2	Bewertung der einzelnen Methoden in Hinblick auf Alters- und Schwerhörigkeitseffekte	102
4.2.1	Äußere Haarzellfunktion - DPOAE-Schwelle	102
4.2.2	Hörnerv- und Hirnstammfunktion - BERA	105
4.2.3	Zentrale Tondiskriminationsfähigkeit - LIPP-Testbatterie	108
4.2.4	Veränderungen des Sprachverständnisses - OLSA.....	114
4.2.5	Einschätzung des Hörhandicaps - HHIE-S	116
4.2.6	Zusammenfassung.....	121
4.3	Ausgewählte praxisrelevante Aspekte der Hörstudie	121
4.3.1	Exaktheit der DPOAE-Hörschwellenschätzung im Vergleich zur subjektiven Tonaudiometrie.....	121
4.3.2	Anwendbarkeit der LIPP-Testbatterie in der Routinediagnostik.....	125
4.3.3	Trainingseffekte bei den Sprachverständnistests	126
4.3.4	Aussagekraft von OLSA und SUN-Test im Vergleich.....	126

4.3.5	Das HHIE-S als sinnvolle Ergänzung zur Standardhördiagnostik.....	127
4.3.6	Die WHO-Klassifikation des Hörvermögens: Limitationen.....	129
5	Zusammenfassung und Ausblick.....	130
6	Literaturverzeichnis.....	132
7	Anhang.....	145
7.1	Einzelergebnisse aller Messmethoden	145
7.2	Übersicht über die Einzelkorrelationen aller Messmethoden	155
7.3	Ergebnisse der binauralen LIPP-Präsentationsart	159
7.4	Tonaudiometrische Hörschwelle des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs..	159
7.5	Standardisierte Testanweisungen.....	160
7.6	Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12.....	163
7.7	Einzelfragen des HHIE-S.....	164
7.8	Anmerkung zur Wiedergabe der DIN-Normen	164
8	Danksagung	165

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Vergleich der тонаudiometrischen Hörschwellen einer sudanesischen und US-amerikanischen Bevölkerungskohorte	1
Abbildung 1.2: Schema zum Entstehungsmechanismus der DPOAE	7
Abbildung 1.3: Auswertung der DPOAE über DP-Wachstumsfunktion, -Kochleogramm und -Steigungsprofil.....	8
Abbildung 1.4: Schematische Darstellung der zentralen Hörbahn	10
Abbildung 1.5: Präsentationsarten der zentralen Tondiskriminationstests am Beispiel einer Dreitonserie	15
Abbildung 1.6: Ätiopathogenese und Klinik der Presbyakusis	22
Abbildung 1.7: Mediane Hörschwellenabweichung der Normalbevölkerung nach E DIN EN ISO 7029:2014-09 für Männer (A) und Frauen (B)	24
Abbildung 2.1: Otobox und Sentiero Advanced	34
Abbildung 2.2: Adaptiver Algorithmus der verwendeten LIPP-Version zur Bestimmung der Diskriminationsschwellen	43
Abbildung 2.3: Grundlegendes Flussschema der statistischen Auswertung der Messdaten	53
Abbildung 3.1: Altersverteilung der drei Subkollektive der Studienpopulation	57
Abbildung 3.2: Hörschwellenverläufe der drei Subkollektive im Tonschwellenaudiogramm.....	60
Abbildung 3.3: Nach Geschlechtern getrennte Hörschwellenverläufe der Subkollektive (A), Scatterplot zur Überprüfung des Symmetriekriteriums von rechtem und linkem Ohr (B).....	62
Abbildung 3.4: Ergebnisse des HHIE-S	67
Abbildung 3.5: 50%-Sprachverständlichkeitsschwellen im OLSA bei Übungsliste und gewerteter Testliste	69
Abbildung 3.6: Ergebnisse und Trainingseffekt beim SUN-Test.....	71
Abbildung 3.7: Tondauerdiskriminationsschwellen im LIPP-Test.....	73
Abbildung 3.8: Pegeldiskriminationsschwellen im LIPP-Test.....	75
Abbildung 3.9: Frequenzdiskriminationsschwellen im LIPP-Test.....	76
Abbildung 3.10: DPOAE-Schwellen bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz.....	80
Abbildung 3.11: Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V in der BERA.....	83
Abbildung 3.12: Zusammenhang zwischen HHIE-S und Durchschnittshörverlust 500-4000Hz bzw. OLSA	86

Abbildung 3.13: Prozentuale Verteilung der Hörhandicapschweregrade, eingeteilt nach den ermittelten Grenzwerten für den Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz bzw. die OLSA-Sprachverständlichkeitsschwelle	88
Abbildung 3.14: Durchschnittliche subjektive und objektive Hörschwellenverläufe der drei Subkollektive	92
Abbildung 3.15: Absolutdifferenzen zwischen objektiv und subjektiv ermittelter Hörschwelle	93
Abbildung 4.1: Vergleich der Durchschnittshörschwellen der Subkollektive mit der erwarteten Hörschwellenverteilung gemäß E DIN EN ISO 7029:2014-09.....	99

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1: Ein- und Ausschlusskriterien für die Hörstudie.....	31
Tabelle 2.2: Stimulusparameter für Referenz-, Test- und Rauschsignal	45
Tabelle 2.3: Empirische Korrekturfaktoren zur Transformation der DPOAE-Schwellen (in dB SPL) in subjektive Hörschwellen (in dB HL)	47
Tabelle 3.1: Altersverteilung der drei Subkollektive der Studienpopulation.....	57
Tabelle 3.2: Nach Geschlechtern getrennte Altersverteilung der Subkollektive der Studienpopulation	58
Tabelle 3.3: Durchschnittlicher Hörverlust der drei Subkollektive der Studienpopulation gemäß modifizierter WHO-Klassifikation	59
Tabelle 3.4: Nach Geschlechtern getrennter durchschnittlicher Hörverlust der Subkollektive gemäß modifizierter WHO-Klassifikation	59
Tabelle 3.5: Hörschwellen der drei Subkollektive im Tonschwellenaudiogramm.....	61
Tabelle 3.6: Gesamtrisikoscore für Gehörschädigung aus dem Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12	63
Tabelle 3.7: Risikosubscores für Gehörschädigung aus dem Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12	63
Tabelle 3.8: Einzelergebnisse der scorerelevanten Fragen des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12	64
Tabelle 3.9: Signifikanzanalyse zum HHIE-S	66
Tabelle 3.10: Ergebnisse des HHIE-S.....	68
Tabelle 3.11: 50%-Sprachverständnisschwellen der gewerteten Testliste im OLSA.....	69
Tabelle 3.12: Signifikanzanalyse zum OLSA	69
Tabelle 3.13: Trainingseffekt beim OLSA zwischen erster und zweiter Messung	70
Tabelle 3.14: Ergebnisse des SUN-Tests	71
Tabelle 3.15: Signifikanzanalyse zum SUN-Test	72
Tabelle 3.16: Trainingseffekt beim SUN-Test zwischen erstem und zweitem Testohr	72
Tabelle 3.17: Tondauerdiskriminationsschwellen im LIPP-Test.....	74
Tabelle 3.18: Signifikanzanalyse zur Tondauerdiskrimination im LIPP-Test.....	74
Tabelle 3.19: Pegeldiskriminationsschwellen im LIPP-Test	75
Tabelle 3.20: Signifikanzanalyse zur Pegeldiskrimination im LIPP-Test	76
Tabelle 3.21: Frequenzdiskriminationsschwellen im LIPP-Test	77
Tabelle 3.22: Signifikanzanalyse zur Frequenzdiskrimination im LIPP-Test	77

Tabelle 3.23: Steigerungsfaktoren der Diskriminationsschwellen der Ü60-Subkollektive im Vergleich zur Referenzschwelle.....	78
Tabelle 3.24: Anzahl und Anteil valider DPOAE-Schwellen.....	79
Tabelle 3.25: DPOAE-Schwellen bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz.....	81
Tabelle 3.26: Signifikanzanalyse zu den DPOAE-Schwellen	81
Tabelle 3.27: DPOAE-Schwellen des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz	82
Tabelle 3.28: Signifikanzanalyse zu den DPOAE-Schwellen bei strengerer Definition für normales Hörvermögen beim Ü60-Kollektiv	82
Tabelle 3.29: Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V in der BERA.....	84
Tabelle 3.30: Signifikanzanalyse zu den BERA-Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V.....	84
Tabelle 3.31: Korrelation des HHIE-S-Scores mit Alter, Tonschwellenaudiogramm und OLSA	85
Tabelle 3.32: Verteilung der Handicapschweregrade, eingeteilt nach den ermittelten Grenzwerten für den Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz bzw. die OLSA-Sprachverständlichkeitsschwelle	87
Tabelle 3.33: Korrelation vom OLSA mit dem SUN-Test	88
Tabelle 3.34: Korrelation des LIPP mit der 1kHz-Hörschwelle, der BERA und dem OLSA.....	89
Tabelle 3.35: Korrelation von subjektiver und objektiver Hörschwelle.....	91
Tabelle 3.36: Durchschnittliche subjektive und objektive Hörschwellen der drei Subkollektive	91
Tabelle 3.37: Absolutdifferenzen zwischen objektiv und subjektiv ermittelter Hörschwelle, subkollektiv- und frequenzgetrennt	94
Tabelle 3.38: Korrelation von Sprachverständnistests und HHIE-S mit Durchschnittshörverlust bei 0,5-4kHz bzw. bei 0,5-8kHz	96
Tabelle 4.1: Überblick über Alters- und Schwerhörigkeitseffekte bei den Hörleistungen.....	120

Abkürzungsverzeichnis

a.e.	am ehesten
AEP	akustisch evozierte Potenziale
ANOCOVA	Analysis of Covariance
ANOVA	Analysis of Variance
ARHL	Age-related Hearing Loss; Altersschwerhörigkeit
ASHA	American Speech-Language-Hearing Association
AVCN	anteroventral cochlear nucleus; anteroventraler Anteil des Nucleus cochlearis
BERA	Brainstem evoked Response Audiometry; Hirnstammaudiometrie
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
CANS	Central auditory nervous system; zentraler Hörbahnabschnitt
CAPD	Central Auditory Processing Disorder; zentral-auditives Verarbeitungsdefizit
COAST	Combined Otoacoustic Emissions and Auditory Steady State Thresholds (siehe 2.7.2)
daPa	Dekapascal, 10Pa
dB	Dezibel
dB HL	Dezibel Hearing Level
dB SL	Dezibel Sensation Level
dB SNR	Dezibel Signal-to-Noise Ratio
dB SPL	Dezibel Sound Pressure Level
DCN	dorsal cochlear nucleus; dorsaler Anteil des Nucleus cochlearis
DD	Tondauerdiskrimination (Testmodus der LIPP-Testbatterie)
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DNLL	dorsal nucleus of the lateral lemniscus; Nucleus dorsalis des Lemniscus lateralis
DPOAE	Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen
EEG	Elektroenzephalogramm

EN	Europäische Norm
engl.	englisch
etc.	et cetera
FAEP	frühe akustisch evozierte Potenziale
FD	Frequenzdiskrimination (Testmodus der LIPP-Testbatterie)
FGF	Fibroblast Growth Factor
f_1 bzw. f_2	Frequenz des Primärtons 1 bzw. 2 zur Auslösung der DPOAE
GABA	Gamma-Amino-Buttersäure
ggf.	gegebenenfalls
h	Stunde
HHIE	Hearing Handicap Inventory for the Elderly
HHIE-S	Hearing Handicap Inventory for the Elderly - Screening Version
HNO	Hals-Nasen-Ohrenheilkunde
Hz	Hertz
IC	inferior colliculus; Colliculus inferior
ICD	International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems
ICF	International Classification of Functioning, Disability and Health
i.e.S.	im engeren Sinne
ILD	interaural level difference
inf.	Inferior
inkl.	inklusive
IPL	Interpeaklatenz in der BERA
ITD	interaural time difference
JND	just noticeable difference
kHz	Kilohertz
LD	Pegeldiskrimination (Testmodus der LIPP-Testbatterie)
L_{dp}	Schalldruckpegel der DPOAE
Lig.	Ligamentum
LIPP	Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik

LSO	lateral superior olive; laterale obere Olive
L ₁ bzw. L ₂	Schalldruckpegel des Primärtons 1 bzw. 2 zur Auslösung der DPOAE
MGB	medial geniculate body; Corpus geniculatum mediale
mind.	mindestens
ml	Milliliter
MNTB	medial nucleus of the trapezoid body; medialer Kern des Corpus trapezoideum
ms	Millisekunde
MSO	medial superior olive; mediale obere Olive
MW	Mittelwert
N.	Nervus
n	numerus (Anzahl in den Ergebnistabellen)
Nucl.	Nucleus
OAE	otoakustische Emissionen
o.g.	oben genannt
OLSA	Oldenburger Sprachtest
Pa	Pascal (Druckeinheit)
PC	Personal Computer
PD	Pegeldiskrimination (Testmodus der LIPP-Testbatterie)
PTA	Pure Tone Audiometry; Reintonaudiometrie
PTA 1kHz	Subjektive Hörschwelle in der Tonaudiometrie bei 1kHz
PTA 500-4000Hz	Durchschnittshörverlust bei den Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz beider Ohren in der Tonaudiometrie
PTA 500-8000Hz	Durchschnittshörverlust bei den Frequenzen 500, 1000, 2000, 4000, 6000 und 8000Hz beider Ohren in der Tonaudiometrie
PVCN	posteroventral cochlear nucleus, posteroventraler Anteil des Nucleus cochlearis
RGE	Ratio of good estimations (DPOAE-Hörschwellenschätzung)
ROS	Reactive Oxygen Species; reaktive Sauerstoffspezies
s	Sekunde
SD	Standardabweichung (engl. Standard Deviation)

SNR	Signal-to-Noise Ratio; Signal-Störabstand
s.o.	siehe oben
SOAE	spontane otoakustische Emissionen
sog.	sogenannt
s.u.	siehe unten
SVS L ₅₀	50%-Sprachverständlichkeitsschwelle (OLSA)
TEOAE	transitorisch evozierte otoakustische Emissionen
Tukey HSD	Tukey-Kramer-Verfahren
Ü60 NH _{mWHO}	normalhörendes Ü60-Subkollektiv
Ü60 SH	schwerhöriges Ü60-Subkollektiv
Ü60-(Sub-)Kollektiv	über-60-Jährigen-(Sub-)Kollektiv
Ü60 15dB _{1-4kHz}	subselektiertes normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Unterkollektiv des normalhörenden Ü60-Subkollektivs mit maximalem тонаudiometrischen Hörverlust von 15dB HL in den DPOAE-relevanten Frequenzen 1kHz bis 4kHz
u.a.	unter anderem
u.g.	unten genannt
V	Volt (Einheit der elektrischen Spannung)
VCV	vowel-consonant-vowel; Tripletfolge Vokal-Konsonant-Vokal
VNLL	ventral nucleus of the lateral lemniscus; Nucleus ventralis des Lemniscus lateralis
vs.	versus
WHO	World Health Organization
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil
3AFC-Verfahren	Three-Alternative-Forced-Choice-Verfahren
3IFC-Paradigma	Three-Interval-Forced-Choice-Paradigma
$\Delta f / L / t$	Frequenz- / Pegel- (engl. Level) / Tondauerunterschied beim LIPP

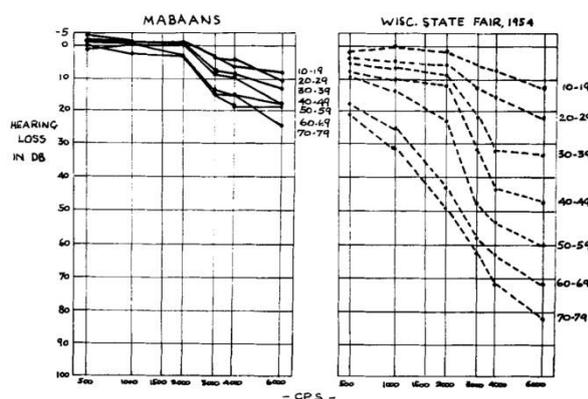
1 Einleitung

Societatis vinculum ratio et oratio. - Das Band der Gesellschaft sind Vernunft und Sprache.

Cicero, De officiis.

Hören ist ein integraler Bestandteil unseres Alltags. Ein intaktes Hörvermögen ist ab der Geburt erforderlich, um Sprache als basales Element zwischenmenschlicher Kommunikation zu erlernen und damit zugleich die Grundlage für Lernen und kognitive Prozesse zu schaffen (Klinke *et al.* 2005). Lesen und Schreiben benötigen als unabdingbare Voraussetzung ein funktionierendes Gehör. Auch im kulturellen Bereich spielt Hören bei Musik, Theater und für das Verständnis geschriebener Sprache in der Literatur eine zentrale Rolle. Mit steigendem Alter kommt es jedoch in unserer Gesellschaft zu einer zunehmenden Höreinschränkung. Epidemiologische Studien gehen davon aus, dass etwa die Hälfte aller 80-Jährigen in Europa unter einer relevanten sensorineuralen Schwerhörigkeit mit Einschränkung des Sprachverständnisses leidet, die als *Altersschwerhörigkeit* (engl. *age-related hearing loss, ARHL*) oder *Presbyakusis* bezeichnet wird (Roth *et al.* 2011).

(A) Männer



(B) Frauen

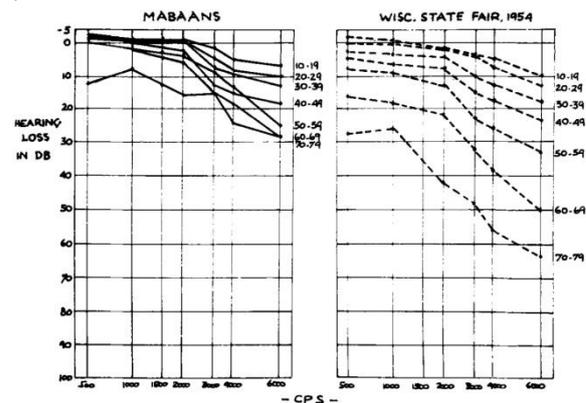


Abbildung 1.1: Vergleich der tonaudiometrischen Hörschwellen einer sudanesischen und US-amerikanischen Bevölkerungskohorte

Die Männer (A) bzw. Frauen (B) der sudanesischen Stammesgruppe der Mabaans (jeweils linkes Diagramm) wiesen im Median mit zunehmendem Alter in den entsprechenden dekadenweise zusammengefassten Altersgruppen (Beschriftung jeweils rechts neben den einzelnen Diagrammen) ein deutlich besseres Hörvermögen auf als die Besucher der US-amerikanischen Wisconsin State Fair 1954 (jeweils rechtes Diagramm). Frequenzbereich der Abszisse 500Hz bis 6000Hz. Quelle: Rosen *et al.* (1962).

Dieser Begriff darf jedoch nicht darüber hinwegtäuschen, dass Altern nicht zwangsläufig mit einem ausgeprägten Hörverlust verbunden sein muss: Bereits 1960 / 1961 untersuchten Rosen und Mitarbeiter das Hörvermögen einer abgelegenen lebenden Stammesgruppe im Sudan, der Mabaans (Rosen *et al.* 1962). Das vom Entwicklungsstand etwa der Spätsteinzeit geprägte Volk wies auch im hohen Alter von über 90 Jahren ein kaum beeinträchtigtes Tonaudiogramm mit wesentlich geringerem Hochtonhörverlust im Vergleich zu einer auf der Wisconsin State Fair rekrutierten US-amerikanischen Kohorte auf (siehe **Abbildung 1.1**). Als mögliche Erklärung hierfür führten Rosen

und Mitarbeiter neben der unterschiedlichen ethnischen Zugehörigkeit mit anderem genetischen Hintergrund vor allem das wesentlich geringere Umgebungsgeräuschniveau bei den Mabaans (meist unter 40dB) und das weitgehende Fehlen kardiovaskulärer Risikofaktoren an.

Zunehmendes Alter an sich scheint folglich nicht obligat zu ausgeprägtem Hörverlust zu führen. Zahlreiche Studien in den letzten Jahrzehnten haben sich daher mit der Ätiopathogenese der Presbyakusis beschäftigt, um wesentliche Risikofaktoren für die Entstehung einer relevanten Schwerhörigkeit zu identifizieren. Trotz der Häufigkeit des Krankheitsbildes verbleiben jedoch bis zum aktuellen Zeitpunkt Unklarheiten. Insbesondere ist es bislang umstritten, ob zusätzlich zum peripheren Hörverlust des Innenohres unabhängige zentrale Degenerationsprozesse stattfinden (d.h. eine eigenständige zentrale Presbyakusiskomponente existiert; engl. *central effect of biological aging, CEBA*) oder ob die im Alltag typischerweise beklagten Sprachverständnisprobleme nur Folge des kochleären Hörverlustes sind (engl. *central effect of peripheral pathology, CEPP*) (American Academy of Audiology 2012, Humes *et al.* 2012, Profant *et al.* 2014). Durch die Koexistenz multipler pathogenetischer Faktoren ist es zudem schwierig, eine klare Abgrenzung von Alterseffekten und schwerhörigkeitsassoziierten Prozessen mit Beeinträchtigung unterschiedlicher Hörleistungen vorzunehmen (Billings *et al.* 2012). Nicht zuletzt spiegeln sich die unternommenen Anstrengungen bislang nicht in einer merklichen Beeinflussung der Häufigkeit der Presbyakusis als Zeichen effektiver ursachenorientierter Prävention wider: Eine Studie zur Entwicklung des Hörvermögens jeweils 75-Jähriger über drei Dekaden konnte keine relevante Besserung zwischen 1976 und 2005 nachweisen und rechnet, ganz im Gegenteil, aufgrund der demografischen Entwicklung der Weltbevölkerung mit einer zunehmenden Prävalenz relevanter Altersschwerhörigkeit in den nächsten Jahrzehnten (Rosenhall *et al.* 2013).

In diesem Kontext wurde im Rahmen der vorliegenden Dissertation eine Hörstudie durchgeführt, die mithilfe einer topodiagnostisch orientierten Testbatterie und durch gezielte Kollektivauswahl eine möglichst scharfe Differenzierung zwischen alters- und schwerhörigkeitsbedingten Veränderungen der Hörleistungen aller Stationen des Hörsystems vornehmen soll. Hierdurch soll ein Beitrag zum ätiopathogenetischen Verständnis der Presbyakusis geleistet werden, das ggf. auch für präventive und therapeutische Strategien genutzt werden kann. Nach einem einleitenden Teil zu anatomischen und physiologischen Grundlagen des Hörens, dem aktuellen Kenntnisstand bei der Presbyakusis und nach einer detaillierten Erläuterung der verwendeten Methodik werden die Studienergebnisse im Einzelnen dargestellt und zuletzt unter Berücksichtigung bereits vorliegender Vorstudien diskutiert.

1.1 Anatomische und physiologische Grundlagen des Hörprozesses

1.1.1 Periphere Schallverarbeitung: Äußeres Ohr, Mittelohr, Innenohr, Hörnerv

1.1.1.1 Anatomie und Physiologie

Zum *äußeren Ohr* gehören Ohrmuschel und Gehörgang. Diese dienen der Schallbündelung und -zuleitung zum Mittelohr; zugleich verändert die spezielle Form der Ohrmuschel die spektrale Zusammensetzung des Schallreizes in einer intraindividuell charakteristischen Art, was für das Richtungshören von Bedeutung ist (Lenarz und Boenninghaus 2012, Middlebrooks 2015, Pickles 2015). Das *Mittelohr*, zu dem Trommelfell, Paukenhöhle mit Gehörknöchelchen (Hammer [Malleus], Amboss [Incus], Steigbügel [Stapes]), Tuba auditiva und die pneumatischen Räume des Felsenbeins zählen, überträgt die Schallenergie weiter über das ovale Fenster an das Innenohr. Wichtigste Aufgabe ist hierbei die Impedanzanpassung: Da der Schallwellenwiderstand (Impedanz) in Luft wesentlich geringer ist als in den flüssigkeitsgefüllten Räumen des Innenohres, würde bei direkter Luft-Flüssigkeitsübertragung ca. 99% der Schallenergie durch Reflexion verloren gehen. Aufgrund des Flächenverhältnisses von Trommelfell (ca. 60mm²) und Stapesfußplatte im ovalen Fenster (ca. 3mm²) und aufgrund der Hebelwirkung der Gehörknöchelchen wird eine etwa 60-80-fache Druckverstärkung am ovalen Fenster erreicht, so dass die Reflexion auf etwa 75% reduziert werden kann, was einem Hörgewinn von 10-20dB entspricht. Zwei Sinnesorgane bilden das *Innenohr*: das Gleichgewichtsorgan, auf das an dieser Stelle nicht näher eingegangen wird, und das Hörorgan, die Cochlea (Schnecke). Letztere besteht aus drei Etagen, die sich in zweieinhalb Windungen spiralig um den zentralen Modiolus legen: der oberen Scala vestibuli mit Beginn am ovalen Fenster, der unteren Scala tympani mit Ende am runden Fenster und der mittleren Scala media = Ductus cochlearis, die von der Scala vestibuli durch die Reissner-Membran und von der Scala tympani durch die Basilarmembran abgetrennt wird. Scala vestibuli und Scala tympani stehen an der Schneckenspitze (Helicotrema) miteinander in Verbindung und sind mit Perilymphe, einer der extrazellulären Flüssigkeit ähnelnden natriumreichen und kaliumarmen Lösung, gefüllt. Die Endolymphe der Scala media dagegen, die von einer wandständigen Zellschicht (Stria vascularis) gebildet wird, weist mit einem hohen Kaliumgehalt und geringen Natriumgehalt eine mit der intrazellulären Flüssigkeit vergleichbare Elektrolytkonstellation auf. Die unterschiedliche Elektrolytkonzentration beider Lymphen ist die Grundlage eines elektropositiven Potentials von ca. +80mV zwischen Endo- und Perilymphraum (endokochleäres Potential). Auf der Basilarmembran sitzt das sensorische Corti-Organ. Getragen von Stützzellen finden sich dort eine Reihe innerer Haarzellen und drei Reihen äußerer Haarzellen, an deren der Endolymphe zugewandten Oberfläche

Stereovilli aufragen, deren Spitzen durch Proteinfäden (Tip links) verbunden sind. Im Falle der äußeren Haarzellen reichen die Stereozilien teilweise bis in die gallertige Tektorialmembran oberhalb des Zellverbandes. Während des Hörvorgangs pflanzen sich die vom Stapes übertragenen Schwingungen in Form einer Wanderwelle entlang der Basilarmembran in Richtung Helicotrema fort. Aufgrund der speziellen Resonanzeigenschaften der Basilarmembran mit Abnahme der Steifigkeit und Zunahme der Breite in Richtung Schnecken Spitze nimmt die Schwingungsamplitude der Wanderwelle frequenzabhängig an einem Ort der Membran deutlich zu; dieser liegt für hohe Frequenzen nahe der Schneckenbasis, für tiefe Frequenzen nahe des Helicotrema. Durch diese sog. Frequenz-Orts-Transformation bzw. Tonotopie wird der Schallreiz bereits auf der Basilarmembran passiv in seine spektralen Komponenten aufgeteilt. Da nicht nur die Basilarmembran, sondern auch die Tektorialmembran durch die Wanderwelle auf- und abschwingt, kommt es am frequenzspezifischen Ort des Wanderwellenmaximums zu einer Abscherbewegung der in die Tektorialmembran ragenden Stereovilli der äußeren Haarzellen. Diese Scherbewegung führt bei Aufwärtsbewegung beider Membranen tip-link-vermittelt zur Öffnung von Ionenkanälen der Stereozilien; aufgrund des endokochleären und endozellulären Potentials strömen Kaliumionen aus der Endolymphe in die äußeren Haarzellen und bewirken so eine schwingungssynchrone Depolarisation. Das dadurch oszillierende Membranpotential wiederum sorgt über das spezielle potenzialsensitive Protein Prestin für aktive schwingungssynchrone Längenänderungen der äußeren Haarzellen, die die Schwingungsamplitude der Wanderwelle am Wanderwellenmaximum aktiv erhöhen. Hierdurch wird nicht nur die Empfindlichkeit des Corti-Organs für leise Schallreize um 40-60dB, sondern insbesondere die Frequenzabstimmung und dadurch die Trennschärfe verbessert; das Schwingungsverhalten der Basilarmembran wandelt sich von einem passiven, linearen Prozess zu einem aktiven, nichtlinearen System. Zuletzt werden durch die aktiv verstärkten Schwingungen am Wanderwellenmaximum auch die Stereovilli der eigentlichen Sinneszellen, der inneren Haarzellen, abgebogen, die ihrerseits über einen vergleichbaren Depolarisationsmechanismus schwingungssynchron mittels Glutamatausschüttung die innervierten Hörnervenfasern aktivieren. Insgesamt vollzieht sich damit der Signaltransduktionsvorgang in der Kochlea in drei Schritten: (1) Passive spektrale Zerlegung des Schallreizes durch die Eigenschaften der Basilarmembran mit Ausbildung eines frequenzabhängig gelegenen Wanderwellenmaximums. (2) Aktive Verstärkung der Schwingungen am Wanderwellenmaximum durch schwingungssynchrone Längenänderungen der äußeren Haarzellen. (3) Signaltransduktion i.e.S. am Wanderwellenmaximum durch schwingungssynchrone Depolarisation und Transmitterausschüttung der inneren Haarzellen. Der *Hörnerv* leitet das elektrische Signal der Sinneszellen zum zentralen Nervensystem weiter. Äquivalent zur Frequenz-Orts-Transformation der Kochlea besitzt jede Nervenfasern des Hörnervs,

deren Nervenzellkörper im Spiralganglion des Modiolus liegt, eine optimale Reizfrequenz (sog. charakteristische Frequenz), bei der sie am empfindlichsten auf Schallreize anspricht. Weicht die Frequenz des Schallreizes von der charakteristischen Frequenz ab, sind höhere Schalldrücke zur Aktivierung nötig. Die Frequenz eines Schallreizes wird also bereits durch das Aktivitätsmuster der Nervenfasern kodiert (Ortsprinzip). Da die Depolarisation der inneren Haarzellen und damit die Transmitterausschüttung zudem schwingungssynchron stattfinden, kann auch über die Periodizität der Nervenaktionspotenziale auf die Reizfrequenz rückgeschlossen werden (Periodizitätsprinzip). Über Häufigkeit und Aktivierungsmuster der Nervenfasern können zudem Informationen zum Schallpegel kodiert und an das zentrale Nervensystem weitergeleitet werden (Klinke *et al.* 2005, Lehnhardt und Laszig 2009, Lenarz und Boenninghaus 2012, Pickles 2015).

Eine detailliertere Erläuterung von Richtungshören, Frequenz- und Intensitätskodierung im peripheren und zentralen Hörbahnanteil findet sich im Rahmen der Diskussion (siehe 4.2.3).

1.1.1.2 Wichtige Untersuchungsverfahren

1.1.1.2.1 Überblick

Zu den wesentlichen Untersuchungsverfahren des peripheren Hörsystems gehören neben der Inspektion inkl. Otoskopie u.a. die Reintonaudiometrie unter Berücksichtigung von Luft- und Knochenleitungsschwelle, die Impedanzaudiometrie mittels Tympanometrie und Stapediusreflex (wobei letzterer auch zentrale Hörbahnanteile erfasst) und die Messung otoakustischer Emissionen, auf die im Folgenden aufgrund der Wichtigkeit für diese Studie näher eingegangen wird (Musiek und Chermak 2015). Die Hirnstammaudiometrie, die neben zentralen Hörbahnanteilen auch die Hörnervenfunktion erfasst, wird im Rahmen der zentralen Schallverarbeitung erläutert.

1.1.1.2.2 Otoakustische Emissionen (OAE)

Der aktive nichtlineare Verstärkungsprozess der äußeren Haarzellen generiert Schallenergie, die retrograd über Mittelohr und Trommelfell in Form von minimalen Schallsignalen, den sog. otoakustischen Emissionen (OAE), abgegeben wird. Diese lassen sich mit einem hochempfindlichen Mikrofon im Gehörgang registrieren und spiegeln folglich unmittelbar und selektiv die Funktion der äußeren Haarzellen und des kochleären Verstärkers wider (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

Zwei OAE-Klassen werden unterschieden: *Spontane OAE (SOAE)* entstehen durch spontane Kontraktionen äußerer Haarzellen ohne externe Schalleinwirkung. Sie treten bei etwa der Hälfte der

normalhörenden Bevölkerung auf, spielen jedoch in der Diagnostik keine Rolle. *Evozierte OAE* werden durch ein äußeres Schallereignis ausgelöst. Zu diesen gehören *Transitorisch evozierte OAE (TEOAE)* und *Distorsionsprodukte Otoakustischer Emissionen (DPOAE)* (Janssen und Müller 2008, Kemp 2008, Janssen 2009).

TEOAE werden durch kurze Schallreize (sog. Transienten; Klicks, Chirps, Tonimpulse) ausgelöst (Kemp 1978). Sie lassen grobe Rückschlüsse auf die Intaktheit der äußeren Haarzellen in einem weiten Bereich der Basilarmembran zu. *TEOAE* sind bis zu einem Hörverlust von etwa 30dB nachweisbar (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

DPOAE sind die Folge von mechanischen Verzerrungen, die bei Anregung der Kochlea mit zwei Primärtönen benachbarter Frequenzen (f_1, f_2 , mit $f_2 \approx 1,2f_1$) entstehen. Aufgrund des nichtlinearen aktiven Verstärkungsprozesses der äußeren Haarzellen kommt es zu einer Interaktion der Primärtöne auf der Basilarmembran, die zur Entstehung zusätzlicher Verzerrkomponenten (Distorsionsprodukten) und deren Emission führt (Janssen 2009). Beim Menschen hat die kubische Distorsionsproduktemission der Frequenz $2f_1 - f_2$ die größte Schallamplitude und spielt daher in der Diagnostik die wichtigste Rolle (Gorga *et al.* 2000). Deren Entstehung ist in **Abbildung 1.2** schematisch dargestellt. Beide Primärtöne generieren auf der Basilarmembran Wanderwellen mit maximaler Auslenkung an den Orten x_1 und x_2 , die aufgrund der Ähnlichkeit der Frequenzen f_1 und f_2 teilweise überlappen (grauer Bereich). Im Überlappungsbereich der Wanderwellen werden die äußeren Haarzellen zu Schwingungen und Kontraktionen der Frequenz $2f_1 - f_2$ angeregt, die zu otoakustischen Emissionen gleicher Frequenz im Gehörgang führen (*primäre DPOAE-Quelle*). Zusätzlich verursacht die primäre DPOAE-Quelle eine kleine Wanderwelle, die den weiter apikal gelegenen Kochleaort x_p mit der Eigenfrequenz $2f_1 - f_2$ in Schwingungen versetzt. Dieser Kochleaort trägt zusätzlich, jedoch nur zu einem kleineren Teil, zu den DPOAE bei (*sekundäre DPOAE-Quelle*); hier wird das Distorsionsprodukt durch die Oszillation der inneren Haarzellen zudem subjektiv als Ton wahrnehmbar. Da der Hauptentstehungsort x_e der DPOAE praktisch mit x_2 zusammenfällt, erlaubt der Nachweis der DPOAE einen Rückschluss auf die Intaktheit der äußeren Haarzellen am Kochleaort x_2 , der physiologischerweise die Frequenz f_2 repräsentiert. DPOAE ermöglichen somit eine frequenzspezifische Kochleadiagnostik am Kochleaort x_2 . Sie sind bis zu einem Hörverlust von etwa 50dB nachweisbar (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

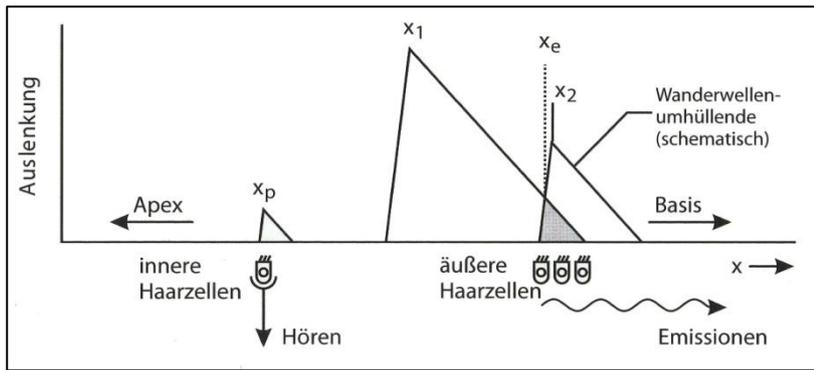


Abbildung 1.2: Schema zum Entstehungsmechanismus der DPOAE

Erläuterungen siehe Haupttext. Quelle: Janssen (2000), modifiziert.

Zur Aufzeichnung der DPOAE wird eine Ohrsonde verwendet, die die Primärtöne ausgibt und die DPOAE über ein Mikrofon registriert. Bei einem Frequenzverhältnis $f_2:f_1=1,2$ werden maximale Pegel des kubischen Distorsionsprodukts $2f_1-f_2$ dann erzielt, wenn die Pegel der Primärtöne L_1 und L_2 gemäß der Formel $L_1=0,4L_2+39\text{dB}$ eingestellt werden (Pegelschere (Kummer *et al.* 1998, Kummer *et al.* 2000)). Da der Pegel der Emissionen stets sehr klein (bis max. 20dB SPL) ist, werden Verfahren zur Störgeräuschunterdrückung eingesetzt, um einen ausreichenden Signal-Stör-Abstand (Signal-to-Noise Ratio, SNR) von mind. 6dB SPL zu gewährleisten (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

Registriert man für eine feste Frequenz f_2 den Pegel der DPOAE L_{dp} bei unterschiedlichen Primärtonpegeln L_2 , erhält man eine sog. *DP-Wachstumsfunktion* (Abbildung 1.3a). Diese lässt Rückschlüsse auf das nichtlineare kompressive Verhalten des kochleären Verstärkers zu: Beim Normalhörenden steigt die Wachstumsfunktion als Zeichen der ausgeprägten Verstärkeraktivität der äußeren Haarzellen bei niedrigen Primärtonpegeln steil an; im Bereich höherer Primärtonpegel erfolgt eine Abflachung als Zeichen der abnehmenden Verstärkeraktivität der äußeren Haarzellen (Nichtlinearität, Kompressivität; siehe $f_2=1\text{kHz} / 2\text{kHz}$ in **Abbildung 1.3a**). Bei gestörter Kochleafunktion hingegen kommt es zu einer Linearisierung der Wachstumsfunktion über einen weiten Primärtonpegelbereich; die Steigung $s=\Delta L_{dp}/\Delta L_2$ der Wachstumsfunktion ist generell höher (Linearität, Kompressionverlust, siehe $f_2=3\text{kHz}$ in **Abbildung 1.3a**). Während diese beim Normalhörenden bei Primärtonpegeln zwischen 40 und 60dB SPL etwa 0,2dB/dB beträgt, nimmt die Steigung bei gestörter Innenohrfunktion Werte um 1dB/dB an. Das Ausmaß des Kompressionsverlusts lässt sich am *DP-Steigungsprofil* ablesen (siehe **Abbildung 1.3c rechts**) (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

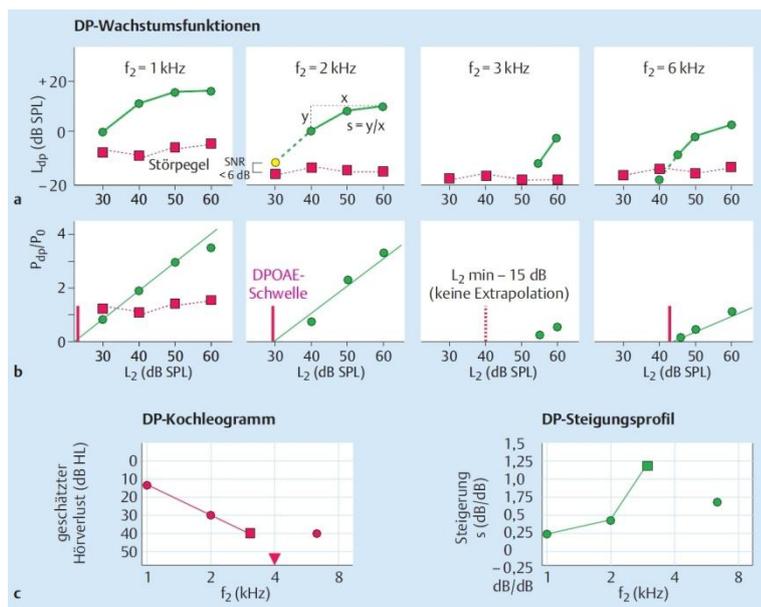


Abbildung 1.3: Auswertung der DPOAE über DP-Wachstumsfunktion, -Kochleogramm und -Steigungsprofil

Durch Registrierung der DPOAE-Amplitude L_{dp} (dB SPL) bei unterschiedlichen Primärtonpegeln L_2 erhält man die DP-Wachstumsfunktion **(a)**, deren Verlauf und Steigung s - für verschiedene Frequenzen im DP-Steigungsprofil **(c, rechts)** dargestellt - Rückschlüsse auf das nichtlineare, kompressive Funktionsverhalten der äußeren Haarzellen zulässt. Bei halblogarithmischer Darstellung kommt es zu einer Linearisierung der DP-Wachstumsfunktion **(b)**. Über den Schnittpunkt der entsprechenden Regressionsgeraden mit der Primärtonpegelachse **(b, 1kHz, 2kHz, 6kHz; Kreissymbol in c)** bzw. eine einfache Schätzung bei ungenügender Zahl an Messpunkten **(b, 3kHz; Quadratsymbol in c)** lassen sich die DPOAE-Schwelle in dB SPL und nach Konvertierung in dB HL der tonaudiometrische Hörschwellenverlauf abschätzen **(DP-Kochleogramm; c, links)**. Dreieck: Nicht messbare DPOAE. Bezugsschalldruck $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Pa. Quelle: Janssen (2009).

Mithilfe extrapolierter DP-Wachstumsfunktion ist zudem eine Hörschwellenschätzung möglich (siehe **Abbildung 1.3b**): Verwendet man statt des Schalldruckpegels L_{dp} im Diagramm den Schalldruck p , so nimmt die Wachstumsfunktion einen linearen Verlauf an. Legt man durch die Messpunkte mittels linearer Regression eine Gerade, so korreliert der dB-Wert des Geradenschnittpunktes mit der L_2 -Achse (die extrapolierte DPOAE-Schwelle) mit der subjektiven tonaudiometrischen Hörschwelle in dB SPL (Boege und Janssen 2002, Gorga *et al.* 2003, Janssen 2009). Die Zulässigkeit dieser Extrapolation ist an Bedingungen geknüpft, u.a. eine Mindeststeigung der Regressionsgeraden und das Vorliegen von mind. 3 Messpunkten (Boege und Janssen 2002). Liegen weniger als 3 Messpunkte vor, so ist eine sinnvolle Regression nicht möglich; stattdessen wird die DPOAE-Schwelle anhand des kleinsten Primärtonpegels abzüglich eines empirischen Korrekturfaktors geschätzt (**Abbildung 1.3b, 3kHz**). Nach Transformation der ermittelten DPOAE-Schwellenschätzwerte in die Einheit dB HL lässt sich der geschätzte Hörschwellenverlauf analog zur subjektiven Tonaudiometrie im *DP-Kochleogramm* (**Abbildung 1.3c links**) darstellen (Janssen 2009).

Klinische Anwendung finden OAEs bisher vor allem beim Neugeborenenhörscreening, zur Überwachung des Hörvermögens bei Therapie mit ototoxischen Medikamenten und zur objektiven

Hörprüfung. Als spezifisches Korrelat der Funktion der äußeren Haarzellen spielen sie zudem eine wichtige Rolle in der Topodiagnostik unklarer Hörstörungen (Probst *et al.* 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

1.1.2 Zentrale Schallverarbeitung: Hirnstamm und Gehirn

Zum zentralen Anteil der Hörbahn gehören der Hirnstamm mit unterschiedlichen Kerngebieten sowie di- und telenzephal Komponenten des Hörsystems (Lenarz und Boenninghaus 2012).

1.1.2.1 Anatomie und Physiologie

Der zentrale Anteil der Hörbahn (engl. *central auditory nervous system*, CANS) extrahiert aus dem Aktionspotenzialmuster beider Hörnerven eine Vielzahl unterschiedlicher Informationen über den Schallreiz, u.a. Schallquellenlokalisierung, Lautstärke, komplexe auditive Muster und nicht zuletzt den Inhalt gesprochener Sprache. Hierzu existieren in Hirnstamm, Di- sowie Telenzephalon komplexe, teilweise parallel geschaltete, auf multiplen Ebenen auch bilateral kreuzende Neuronenschaltkreise in multiplen Kerngebieten (siehe **Abbildung 1.4**). Die tonotope, d.h. frequenzspezifische Anordnung der Nervenfasern des Hörnervs wird innerhalb dieser Schaltkreise und Kerngebiete bis einschließlich des auditorischen Kortex beibehalten. Die Afferenzen des Hörnervs werden im Nucleus cochlearis erstmals auf den zentralen Hörbahnanteil umgeschaltet. Der Nucleus cochlearis besteht aus einem anteroventralen (engl. *anteroventral cochlear nucleus*, AVCN), posteroventralen (engl. *posteroventral cochlear nucleus*, PVCN) und einem dorsalen (engl. *dorsal cochlear nucleus*, DCN) Anteil. Vereinfachend zusammengefasst verlaufen ab dem Nucleus cochlearis zwei parallele, funktionell unterschiedliche Hörbahnanteile: (1) Das ventrale System verläuft über den AVCN, teilweise gekreuzt über den medialen Kern des kontralateralen Corpus trapezoideum (engl. *medial nucleus of the trapezoid body*, MNTB), ipsi- und kontralaterale Oliva superior mit ihrerseits zwei Unterkernen (lateraler und medialer Kern; engl. *lateral/ medial superior olive*, LSO/ MSO) und Lemniscus lateralis mit dessen dorsalem Kern (engl. *dorsal nucleus of the lateral lemniscus*, DNLL) zum Colliculus inferior (engl. *inferior colliculus*, IC) der Vierhügelplatte. Dieses System dient hauptsächlich der Schallquellenlokalisierung in der Horizontalen, d.h. rechts vs. links, über die Auswertung von Laufzeit- und Intensitätsunterschieden der Eingangssignale beider Ohren. (2) Das dorsale System verläuft über PVCN bzw. DCN und Lemniscus lateralis mit dessen ventralem Kern (engl. *ventral nucleus of the lateral lemniscus*, VNLL) ebenfalls zum IC und extrahiert mittels Spektral- und Zeitanalyse sowie spezieller Verschaltungen insbesondere Informationen über die Schallquellenlokalisierung in der Vertikalen, vorne und hinten sowie komplexere auditive Muster. Im IC konvergieren die vorextrahierten Informationen beider Systeme

und werden zudem mit Signalen weiterer somatosensorischer Systeme (z.B. Sehsystem) kombiniert und weiterverarbeitet. Die höheren Ebenen der zentralen Hörbahn, die vom IC über das Corpus geniculatum mediale des Thalamus (engl. *medial geniculate body*, MGB) zum primären und sekundären Hörcortex mit entsprechenden Assoziationsarealen verläuft, nutzen diese vorverarbeiteten Schallinformationen, um eine endgültige Muster- und Objekterkennung vorzunehmen, beispielsweise Phonemerkennung oder Inhaltszuordnung gesprochener Sprache. Insgesamt werden in der zentralen Hörbahn folglich durch spezielle mehrstufige Neuronenschaltkreise spezifische, immer komplexere Schallinformationen herausgearbeitet und gelangen auf Ebene des Cortex ins Bewusstsein (Klinke *et al.* 2005, Mrowinski 2009, Hackett 2015, Pickles 2015).

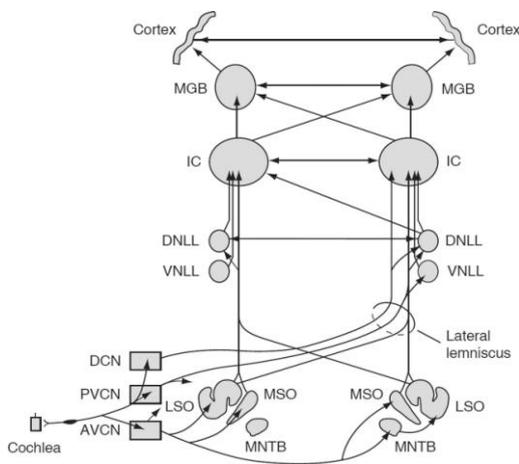


Abbildung 1.4: Schematische Darstellung der zentralen Hörbahn

Erläuterungen und Abkürzungen siehe Haupttext. Auf multiplen Ebenen existieren bilaterale Verschaltungen, nur die relevanten Bahnsysteme sind eingezeichnet. Quelle: Pickles (2015).

Neben diesen afferenten Bahnsystemen existieren auch kortikofugale, efferente Projektionen zu allen Ebenen der Hörbahn, beispielsweise das mediale olivokochleäre System, das den aktiven Verstärkungsprozess der äußeren Haarzellen in der Cochlea reguliert (Mrowinski 2009, Musiek und Chermak 2015, Pickles 2015).

Weitere Erläuterungen zu Sprachverarbeitung bzw. Richtungshören, Frequenz-, Lautstärke- und Tondauerdiskrimination finden sich in anderen Kapiteln dieser Dissertation (1.1.2.2.3 bzw. 4.2.3).

1.1.2.2 Wichtige Untersuchungsverfahren

Im Wesentlichen werden psychoakustische und elektrophysiologische Verfahren eingesetzt, um Verarbeitungsstörungen auf zentraler Ebene (*central auditory processing disorder*, CAPD) diagnostizieren zu können (Musiek und Chermak 2015). Die Grundlagen zentraler Testverfahren, die für diese Studie relevant sind, werden im Folgenden erläutert.

1.1.2.2.1 **Brainstem evoked Response Audiometry (BERA)**

Die bei der Verarbeitung eines akustischen Reizes durch De- und Repolarisation von Neuronengruppen entstehenden elektrischen Potenzialschwankungen lassen sich analog zur konventionellen Elektroenzephalografie (EEG) an der Kopfhaut als *akustisch evozierte Potenziale* (AEP) ableiten. Durch Mittelungsverfahren (Averaging) ist es möglich, die im Vergleich zur Gesamt-EEG-Aktivität des restlichen Gehirns sehr kleinen AEP zur Darstellung zu bringen: Appliziert man repetitiv einen gleichförmigen akustischen Reiz und addiert das EEG-Signal in hierzu synchronen Zeitabschnitten, so summiert sich die bei jedem Reiz gleiche EEG-Antwort des auditiven Systems und wird sichtbar, wohingegen sich die reizunabhängige und zufällige EEG-Aktivität des restlichen Gehirns gegenseitig aufhebt und in den Hintergrund tritt (Probst *et al.* 2008, Mrowinski 2009, Mrowinski und Scholz 2011).

Abhängig von der Zeitverzögerung (Latenz) zwischen Reiz und evozierten Potenzialen fasst man unterschiedliche Potenzialgruppen zusammen, die bestimmten Strukturen der Hörbahn zugeordnet werden können. Die sog. *frühen akustisch evozierten Potenziale* (FAEP) treten mit einer Latenz von bis zu 10ms auf und werden durch die synchrone elektrische Aktivität von Neuronen in Hörnerv und Hirnstamm hervorgerufen. Das technische Messverfahren zu ihrer Aufzeichnung wird als Hirnstammaudiometrie (Brainstem evoked Response Audiometry, BERA) bezeichnet (Probst *et al.* 2008, Mrowinski 2009, Lenarz und Boenninghaus 2012).

Bei der *BERA* wird ein Klickreiz ca. 1000-2000mal wiederholt über einen Kopfhörer in hoher Reizrate dargeboten und das EEG-Signal mittels zumeist an Mastoid und Vertex positionierten Elektroden abgeleitet und reizsynchron gemittelt. Zudem kommen Verfahren zur Unterdrückung von Störsignalen zum Einsatz. Beim Hörgesunden zeigen sich die FAEP als fünf bis sieben Potenziale mit charakteristischer Wellenform und Latenz, die nach ihrem Erstbeschreiber Jewett (1970) mit J1-J7 bzw. mit den römischen Zahlen I-VII benannt werden. Wellen I-V können definierten Ursprungsorten zugeordnet werden: Welle I - distaler Hörnerv, Welle II - Hörnerv am Porus acusticus internus, Welle III - Nucleus cochlearis, Welle IV und V - obere Olive und Lemniscus lateralis (Janssen 1989, Probst *et al.* 2008, Mrowinski 2009).

Für die klinische Bewertung der BERA sind neben den Amplituden vor allem die Latenzen der FAEP relevant, wobei zumeist die am deutlichsten hervortretenden Wellen I, III und V betrachtet werden. Man unterscheidet Absolutlatenzen und Interpeaklatenzen. Als *Absolutlatenz* wird die zeitliche Verzögerung zwischen Reizbeginn und Auftreten des Potentials bezeichnet. Neben Reizparametern (Polarität, Reizrate, Reizpegel) beeinflussen u.a. Pathologien des Mittel- und

Innenohres, im Fall der Wellen III bis V zudem noch Veränderungen im Bereich von Hörnerv bzw. Hirnstamm die Absolutlatenz (Janssen 1989, Mrowinski 2009, Mrowinski und Scholz 2011); eine unmittelbare Interpretation in Hinblick auf isolierte Veränderungen von Hörnerv oder Hirnstamm ist folglich schwierig. Die *Interpeaklatenz* (IPL) hingegen, der Zeitabstand zwischen zwei Potentialen, wird von der Laufzeit des Signals zwischen den die beiden Potentiale verursachenden Hörbahnstrukturen bestimmt und ermöglicht somit eine unmittelbare Aussage über den entsprechenden Hörbahnabschnitt: IPL I-III repräsentiert die Signalleitung im Hörnerv und pontinen Hirnstamm (distaler Hörnerv bis Nucleus cochlearis, s.o.), IPL III-V die Signalverarbeitung im Hirnstamm bis zum Mesenzephalon (Nucleus cochlearis bis Lemniscus lateralis), IPL I-V fasst beide Abschnitte zusammen; Verlängerungen der jeweiligen IPL über die Norm deuten auf eine Pathologie des entsprechenden Hörbahnabschnittes hin. Für die isolierte retrokochleäre Hörbahndiagnostik sind die Interpeaklatenzen daher besser geeignet als die Absolutlatenzen (Probst *et al.* 2008, Mrowinski 2009, Mrowinski und Scholz 2011, Legatt 2012).

Klinisch wird die BERA vor allem zur retrokochleären Hörbahndiagnostik und zur objektiven Hörschwellschätzung eingesetzt (Probst *et al.* 2008, Lenarz und Boenninghaus 2012).

1.1.2.2 Sprachtests

Sprache ist das zentrale Kommunikationsmedium des Menschen. Sprachlauten (Phonemen) wird dabei eine inhaltliche Bedeutung zugeordnet, die zur Kommunikation genutzt werden kann. Physikalisch ist Sprache aus zeitlich mehrdimensionalen Einheiten zusammengesetzt: Aus Vokalen, die ihrerseits aus Stimmgrundfrequenz und Resonanzen (Formanten) bestehen, sowie geräuschähnlichen Konsonanten werden Phoneme kombiniert, die ihrerseits in Kombination Wörter bzw. durch Wortkombination Sätze bilden. Die zeitliche Struktur der Sprache wird insbesondere durch langsame Modulationen des zeitgleich variierten Frequenzspektrums unter 20Hz, die sog. Hüllstruktur (engl. envelope), und schnelle Modulationen zwischen 70Hz und 1000Hz, die sog. zeitliche Feinstruktur (engl. temporal fine structure), beschrieben. Zu den entscheidenden Aufgaben des sprachverarbeitenden Systems zählt es daher, das simultan amplituden- und frequenzmodulierte Sprachsignal mehrdimensional zu analysieren (Klinke *et al.* 2005, Lehnhardt und Laszig 2009, Arnal *et al.* 2015).

Das „*dual-route*“-Modell der zentralen Sprachprozessierung unterscheidet anatomisch und physiologisch zwei basale Aspekte der Sprache: Sprachproduktion und Sprachverständnis. Während die Sprachproduktion vereinfacht beschrieben u.a. in einem Teil des linken Frontallappens, dem Broca-Sprachzentrum, verortet wird, liegen die Areale für das Sprachverständnis bilateral

insbesondere im Temporallappen mit den auditorischen Kortices inkl. des linkshemisphärischen Wernicke-Sprachzentrums. Die hierarchischen Ebenen der Sprache - Phoneme, lexikalisch-semantic Bedeutung etc. - werden dabei a.e. entlang eines von posterior nach anterior und von medial nach lateral angeordneten Kortexsystems prozessiert und extrahiert. Beide Komponenten des zentralen Sprachsystems stehen über multiple Bahnen miteinander in Verbindung, was insbesondere für die korrekte Sprachproduktion von essenzieller Bedeutung ist (Trepel 2008, Friederici 2015, Hickok und Poeppel 2015, de Heer *et al.* 2017).

Sprachverarbeitung ist folglich eine der Hauptaufgaben des zentralen Hörbahnanteils. Für einfache *Sprachverständnistests* konnte jedoch gezeigt werden, dass deren Ergebnisse aufgrund der hohen intrinsischen (mehrere parallele Verarbeitungssysteme) und extrinsischen (mehrdimensionale zeitliche Modulation) Redundanz des Sprachsignals weniger von Defiziten der zentral-auditiven Verarbeitung, als vielmehr entscheidend vom peripheren Hörvermögen bestimmt werden, diese also eher peripheren Hörtests entsprechen. Sprachtests werden erst durch zusätzliche Reduktion der extrinsischen Redundanz zu zentral-auditiven Tests „sensibilisiert“, die Defizite des zentralen Hörbahnanteils (d.h. verminderte intrinsische Redundanz) aufdecken können. Typische Strategien hierfür sind die Präsentation des Sprachsignals in einem konkurrierenden Störsignal (z.B. Sprachtests mit Störgeräusch), Tiefpassfilterung oder zeitliche Kompression des Sprachsignals. Allerdings sind auch die Ergebnisse dieser „sensibilisierten“ Sprachtests, sofern nicht gegenteilig bewiesen, von peripheren Höreinschränkungen mitbestimmt, da diese ebenfalls die extrinsische Redundanz vermindern (American Academy of Audiology 2012, Musiek und Chermak 2015).

1.1.2.2.3 Zentrale Tondiskriminationstests

Die Verarbeitung der basalen akustischen Signalparameter Frequenz, Pegel und Tondauer spielt eine wesentliche Rolle bei praktisch allen auditorischen Wahrnehmungsprozessen und erfolgt auf zentraler Ebene (Biedermann *et al.* 2008). Tondiskriminationstests, also psychoakustische Untersuchungsverfahren, die gerade noch wahrnehmbare Frequenz-, Pegel- und Tondauerdifferenzen abprüfen (*just noticeable differences*, JNDs), schätzen folglich zentrale Schallverarbeitungsleistungen ein. Bei geeigneter Präsentationsart der Stimuli (dichotisch, interaural, s.u.) besteht zudem eine Testspezifität für bestimmte Hirnstrukturen (Hirnstamm vs. Großhirn) (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009, Musiek und Chermak 2015).

Bei *dichotischen* Testprozeduren werden beiden Ohren gleichzeitig jeweils unterschiedliche Stimuli dargeboten (Musiek und Chermak 2015). Im Falle der in dieser Studie angewandten dichotischen

Tondiskriminationstests werden auf dem Testohr Serien von Tonsignalen (Trials) abgespielt, auf dem kontralateralen Ohr simultane Serien von Rauschsignalen (siehe **Abbildung 1.5A**). Ein Tonsignal (Testsignal) jedes Trials weicht von den restlichen identischen Referenzsignalen in Frequenz/ Pegel/ Dauer ab; es gilt, dieses zu erkennen. Die Position des Testsignals im Trial ist randomisiert. Durch Variation der Tonunterschiedsgröße zwischen Test- und Referenzsignalen im Laufe der Trials kann die JND für den jeweiligen Parameter bestimmt werden, bei der das abweichende Testsignal gerade noch erkannt wird, und damit die zentrale Verarbeitungsleistung eingeschätzt werden (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009).

Unter physiologischen Bedingungen ist eine unilaterale Hemisphärenaktivierung aufgrund der bilateralen Verschaltung auf unterschiedlichen Ebenen des Hörsystems (siehe **1.1.2.1**) nicht möglich. Monaural (nur auf einem Ohr präsentierte) Stimuli erregen stets beide Hemisphären (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Neumann und Rübsamen 2005, Biedermann *et al.* 2008). Die kontralaterale Hemisphäre wird jedoch stärker aktiviert als die ipsilaterale (Biedermann *et al.* 2008). Bei der dichotischen Präsentationsart dominiert folglich in der dem Testohr gegenüberliegenden Hemisphäre die Repräsentation des Tonsignals; das von ipsilateral kommende und daher schwächer zugeleitete Rauschsignal wird vom Tonsignal maskiert. In der zum Testohr ipsilateralen Hemisphäre sind die Verhältnisse genau umgekehrt: hier überwiegt die Repräsentation des Rauschens; dieses maskiert das Tonsignal. Es erfolgt also eine quasi-unilaterale Repräsentation des Tonsignals in der zum Testohr kontralateralen Hemisphäre. Studien zeigen, dass die JND in dichotischen Tests bei zum Testohr kontralateralen kortikalen und subkortikalen Läsionen beeinträchtigt ist, nicht aber bei ipsilateralen Läsionen oder Läsionen des Hirnstamms. Dichotische Tondiskriminationstests repräsentieren folglich spezifisch die Verarbeitungsleistung der kontralateralen thalamokortikalen Strukturen (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Musiek und Chermak 2015).

Im Gegensatz dazu bleibt die *interaurale* Diskriminationsleistung für Frequenz-, Pegel- und Tondauerunterschiede bei di- oder telenzephalen Läsionen unauffällig (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008). Bei den in dieser Studie angewandten interauralen Tondiskriminationstests wird das Rauschsignal der dichotischen Tests durch eine Serie von Referenzsignalen ersetzt (siehe **Abbildung 1.5B**). Die Eingangssignale beider Ohren in der Serie sind also, mit Ausnahme des Testsignals, stets identisch (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009). Die interaurale Präsentationsart für Frequenz-, Pegel- und Tondauerdifferenzen spricht aufgrund der zentralen Fusion der beidseits präsentierten Tonsignale Mechanismen des Richtungshörens und der Raumwahrnehmung an, die ja ebenfalls auf Phasen-,

Pegel- und Tondauerdifferenzen gründen (siehe 1.1.2.1 bzw. 4.2.3). Während das Perzept der identischen Referenzsignalpaare vom Probanden in Kopfmittle lokalisiert wird, weist das Signalpaar aus Testsignal und kontralateralem Referenzsignal einen anderen Raumeindruck in der Horizontalen auf: Bei der Pegeldiskrimination lateralisiert das Fusionsperzept zur Seite des lautereren Signals, bei der Frequenzdiskrimination erfolgt eine „Schallausbreitung“ des Perzepts, bei der Tondauerdiskrimination wandert das Perzept zur Seite des kürzeren Stimulus . Das abweichende Signalpaar wird anhand des Raumeindrucks erkannt, nicht durch die abweichende Qualität (Tonhöhe, Pegel, Tondauer) des Testsignals (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009). Da Rauminformationen hauptsächlich im Hirnstamm verarbeitet werden, spiegeln interaurale JND-Tests daher hauptsächlich Prozessierungsleistungen des Hirnstammes wider; in entsprechenden Studien konnte eine Spezifität für den Nachweis von Hirnstammläsionen gezeigt werden (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Musiek und Chermak 2015).

Bei *binauralen* Tondiskriminationstests wird auf beiden Ohren simultan jeweils eine identische Signalserie aus Referenzsignalen und Testsignal abgespielt (siehe **Abbildung 1.5C**). Alle Signalpaare fusionieren zu einem mittig im Kopf wahrgenommenen Perzept, da beide Ohren stets dasselbe Eingangssignal erhalten. Das abweichende Signalpaar kann folglich im Gegensatz zur interauralen Präsentation nicht am Raumeindruck erkannt werden, sondern nur über die abweichende Signalqualität (Tonhöhe, Pegel, Tondauer). Ob binaurale JND-Tests eine Spezifität für die Verarbeitungsleistung bestimmter zentraler Strukturen aufweisen, ist bisher nicht bekannt.



Abbildung 1.5: Präsentationsarten der zentralen Tondiskriminationstests am Beispiel einer Dreitonserie
 Erläuterungen siehe Text. **(A)** Dichotische, **(B)** interaurale, **(C)** binaurale Präsentationsart. Die Position des Testsignals in der Dreitonserie - hier stets an zweiter Stelle dargestellt - wird von Trial zu Trial randomisiert. Das Testsignal weicht in Frequenz/ Pegel/ Tondauer vom Referenzsignal ab. Abbildung orientiert an Ludwig (2009).

Zusammenfassend ermöglicht die Verwendung dichotischer und interauraler Tondiskriminationstest folglich eine Topodiagnostik zentraler Schallverarbeitungsleistungen (dichotisch: kontralaterale

Großhirnstrukturen; interaural: Hirnstamm); für binaurale Tests liegen diesbezüglich bisher keine Erkenntnisse vor.

1.2 Presbyakusis - Altersschwerhörigkeit

1.2.1 Begriffsklärung und Epidemiologie

Der Begriff *Presbyakusis* (wörtlich: Altershörigkeit, Hesse (2015)) umfasst nach vorherrschender Definition alle altersphysiologischen und -pathologischen Veränderungen des menschlichen Hörorgans, die sich sowohl am peripheren als auch am zentralen Hörbahnanteil abspielen (Gates und Mills 2005, Lenarz und Boenninghaus 2012, Fischer *et al.* 2016). Demnach ist die Presbyakusis das Ergebnis aller endogenen und exogenen Einflüsse, die im Laufe eines Lebens auf das Hörsystem einwirken und die zu einem variabel ausgeprägten bilateralen sensorineuralen Hörverlust mit verringertem Sprachverständnis und herabgesetzter zentraler Schallverarbeitung führen. In den meisten Fällen wird Presbyakusis synonym zu Altersschwerhörigkeit (engl.: *age-related hearing loss*, ARHL) verwendet (Gates und Mills 2005, Fischer *et al.* 2016). Der Begriff wird jedoch nicht einheitlich gebraucht: Kritiker wenden ein, dass das Altern an sich nicht zwangsläufig zu einer Schwerhörigkeit führe, die Gleichsetzung von Presbyakusis mit Altersschwerhörigkeit also irrtümlicherweise einen obligaten altersbedingten Hörverlust annehmen lasse, und ziehen daher die wörtliche Übersetzung Altershörigkeit vor (Hesse 2015). Von manchen Autoren wird die Bezeichnung Presbyakusis zudem restriktiver ausschließlich für physiologische altersbedingte Hörveränderungen verwendet, die unabhängig von weiteren exogenen Einflüssen wie Lärm oder chemischen Noxen entstehen. Dies ist jedoch insofern problematisch, als sich in der Praxis reine Alterungsprozesse kaum von exogenen Faktoren trennen lassen, zumal diese zum Teil erst zeitlich versetzt zu Schäden am Hörsystem führen können (Gates und Mills 2005, Billings *et al.* 2012, Fischer *et al.* 2016).

Angaben zur *Epidemiologie* der Altersschwerhörigkeit schwanken aufgrund mangelnder Standardisierung der Datenerhebung, insbesondere in Bezug auf Alters- und Hörverlustgrenzen (Roth 2015, Fischer *et al.* 2016). In einer Literaturübersicht schätzen Roth *et al.* (2011) die Prävalenz der Altersschwerhörigkeit in Europa auf 20% bei 70-jährigen Frauen bzw. 30% bei 70-jährigen Männern, wenn als Hörverlustgrenze 30dB HL (Durchschnitt des besseren Ohres bei den Frequenzen 0,5, 1, 2 und 4kHz) oder mehr herangezogen werden. Bei den 80-Jährigen leiden bereits 45% der Frauen und 55% der Männer unter einem derartigen Hörverlust. Typischerweise tritt ein relevanter Hörverlust etwa ab der sechsten Lebensdekade auf (Lenarz und Boenninghaus 2012,

Ciorba *et al.* 2015). Aufgrund der hohen Prävalenz kommt der Presbyakusis eine erhebliche sozioökonomische Bedeutung zu.

1.2.2 Ätiopathogenese der Presbyakusis

Die Entstehung der Presbyakusis ist nach heutigem Wissensstand *multifaktoriell* bedingt, wobei aus ätiologischer Sicht neben dem Altern an sich vor allem genetische Faktoren, Lärmexposition, ototoxische Medikation, Infektionen, Lebensstil und kardiovaskuläre Risikofaktoren eine Rolle spielen (Gates und Mills 2005, Lenarz und Boenninghaus 2012, Roth 2015, Yang *et al.* 2015, Fischer *et al.* 2016). Diese Faktoren wirken synergistisch, so dass selbst bei geringem Beitrag der einzelnen Komponente insgesamt relevante Schädigungen des Hörsystems resultieren (Ruan *et al.* 2014).

Bei etwa 35-55% der Altersschwerhörigen liegt eine *genetische Assoziation* zugrunde, wobei Frauen stärker betroffen sind (Ruan *et al.* 2014, Fischer *et al.* 2016). In einer Zwillingsstudie zur Presbyakusis konnte gezeigt werden, dass genetische Faktoren bei Altersschwerhörigen ca. 25% der Varianz des Sprachverständnisses im Störgeräusch erklären (Momi *et al.* 2015). Durch genetische Assoziationsstudien bei syndromalen und nicht-syndromalen Schwerhörigkeiten sowie tierexperimentell wurden mögliche Kandidaten identifiziert, wobei ein über eine Assoziation hinausgehender kausaler Zusammenhang bisher für keines der Kandidatengene nachgewiesen werden konnte (Momi *et al.* 2015, Yang *et al.* 2015). Die potentiell assoziierten Gene lassen sich vereinfacht unterschiedlichen Kategorien zuordnen (Ruan *et al.* 2014, Ciorba *et al.* 2015, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016):

1. Seneszenzgene, z.B. klotho
2. Mit kochleären Strukturen / Funktionen assoziierte Gene: u.a. Gene für Zytoskelettkomponenten (z.B. Cadherin 23 der Stereozilien), Transkriptionsfaktoren (z.B. SOX 10), Ionenkanäle (z.B. den Kaliumkanal KCNQ4), Transportproteine (z.B. den Anionentransporter SLC26A4), Matrixkomponenten (z.B. Connexin 26 der Gap Junctions)
3. Gene des ROS (*reactive oxygen species*, reaktive Sauerstoffspezies)-Stoffwechsels, dessen Intaktheit für die Funktion der Cochlea essentiell ist (s.u.), z.B. für die Glutathion-Peroxidase (GPX1) bzw. Superoxid-Dismutase (SOD1)
4. Mitochondriale Gene (s.u.), z.B. MTRNR1

Möglicherweise könnten zudem epigenetische Veränderungen, wie z.B. DNA-Methylierung, bei der Entstehung der Presbyakusis beteiligt sein (Ruan *et al.* 2014).

Darüber hinaus spielen *Lärmexposition*, die Einnahme *ototoxischer Medikamente* (z.B. Aminoglykoside, Schleifendiuretika, Zytostatika), *Infektionen* beispielsweise des Mittelohres, *Lebensstil* sowie das Vorliegen *kardiovaskulärer Risikofaktoren* eine Rolle in der Genese der Presbyakusis (Gates und Mills 2005, Ruan *et al.* 2014, Roth 2015, Yang *et al.* 2015, Fischer *et al.* 2016). In einer multizentrischen Studie konnten Fransen *et al.* (2008) einen signifikanten Zusammenhang der Presbyakusis mit beruflicher Lärmexposition, Rauchen und einem hohen Body-Mass-Index belegen; weitere Studien identifizierten u.a. Diabetes mellitus, einen niedrigen Serum-HDL-Cholesterinspiegel und Hypertonie als Risikofaktoren für Altersschwerhörigkeit. Möglicherweise trägt ein erhöhtes kardiovaskuläres Risikoprofil über die Entstehung von Gefäßveränderungen zur Presbyakusis bei: Kurata *et al.* (2016) konnten in einer histopathologischen Analyse von Felsenbeinpräparaten bei Altersschwerhörigen verdickte Gefäßwände der A. cochlearis propria und der strialen Gefäße nachweisen und postulierten eine konsekutive Minderperfusion der Kochlea und der Stria vascularis bei Presbyakusis.

Die *pathophysiologischen Prozesse*, die zur konkreten Entstehung der spezifischen zellulären und funktionellen Veränderungen bei Presbyakusis führen, die also die Brücke zwischen ätiologischen Faktoren und klinischen Symptomen bilden, sind im Detail bisher noch nicht verstanden. Als wesentliche molekularpathologische Mechanismen bei Presbyakusis werden nach heutigem Kenntnisstand v.a. oxidativer Stress, mitochondriale Dysfunktion und z.T. auch eine Glutamat-Exzitotoxizität genannt (Ruan *et al.* 2014, Roth 2015, Yang *et al.* 2015):

Oxidativer Stress entsteht durch ein Ungleichgewicht zwischen der Produktion und Entgiftung von freien Radikalen, insbesondere reaktiven Sauerstoffspezies (*reactive oxygen species*, ROS) (Roth 2015). Diese Sauerstoffradikale fallen als Abfallprodukte bei physiologischen Enzymreaktionen in jeder Zelle an und werden im Normalfall durch endogene Antioxidantien entgiftet, um Zellschäden zu verhindern (Billings *et al.* 2012, Yang *et al.* 2015). Durch zahlreiche der o.g. ätiologischen Faktoren der Presbyakusis, u.a. Lärmexposition, Infektionen und chronische Entzündungsprozesse, aber auch durch eine verminderte Entgiftungskapazität, beispielsweise durch o.g. genetische Mutationen der engiftenden Enzyme Glutathion-Peroxidase bzw. Superoxid-Dismutase, resultiert eine gesteigerte ROS-Bildung und damit vermehrter oxidativer Stress im Hörsystem. Auf zellulärer Ebene akkumulieren hierdurch Schäden an multiplen intrazellulären Komponenten, u.a. DNA,

Mitochondrien, intrazellulären Signalkaskaden und Proteinen, so dass es zur Zelldysfunktion mit frühzeitiger Zellalterung bis hin zum Zelltod kommt (Roth 2015, Fischer *et al.* 2016).

Mitochondrien spielen eine entscheidende Rolle bei der Energieversorgung der Zelle durch oxidative Phosphorylierung mit Adenosintriphosphatbildung, aber auch bei der Entgiftung von ROS (Roth 2015). Die zirkuläre mitochondriale DNA ist besonders anfällig für Schädigung durch Umwelteinflüsse oder o.g. Mutationen, da ihr im Vergleich zur nukleären DNA ein effizientes Reparatursystem und schützende Histone fehlen (Yang *et al.* 2015). Ein Zusammenhang zwischen mitochondrialer Dysfunktion und der Entstehung der Presbyakusis konnte inzwischen sowohl tierexperimentell als auch durch Nachweis eines z.T. maternalen Erbgangs bzw. konkreter mitochondrialer DNA-Mutationen bei Altersschwerhörigen belegt werden (Roth 2015, Yang *et al.* 2015, Fischer *et al.* 2016). Mögliche Mechanismen, über die eine mitochondriale Dysfunktion zur Presbakusis führt, sind neben einem intrazellulären Energiemangel (z.B. für den Ionentransport zur Aufrechterhaltung des endokochleären Potenzials) eine verminderte ROS-Entgiftung mit gesteigertem oxidativen Stress, aber auch die direkte Freisetzung proapoptotischer Metabolite (z.B. Cytochrom C) mit Zelluntergang im Hörsystem (Lee 2013, Ruan *et al.* 2014, Roth 2015).

Glutamat ist der wichtigste exzitatorische Neurotransmitter im peripheren und zentralen Hörsystem. Eventuell könnten erhöhte Glutamat-Level über eine gesteigerte intrazelluläre Calcium-Freisetzung und konsekutiven Zelltod (*Glutamat-Exzitotoxizität*) eine Rolle in der Entstehung der Presbyakusis spielen (Ruan *et al.* 2014).

Die gemeinsame Endstrecke aller drei vorgenannten pathophysiologischen Mechanismen ist eine Induktion von *Zellapoptose* bzw. *-nekrose*, die im Tiermodell der Presbyakusis bestätigt werden konnte (Yang *et al.* 2015, Fischer *et al.* 2016).

Histopathologische Veränderungen an multiplen Strukturen *des peripheren auditorischen Systems* bei Altersschwerhörigkeit konnten bereits im letzten Jahrhundert nachgewiesen werden. Der Wegbereiter in der Analyse von Felsenbeinpräparaten, Harold F. Schuknecht, hatte seit 1955 anhand mikroskopischer Studien an tierischen und humanen Felsenbeinen eine systematische Klassifikation der mikromorphologischen Veränderungen des peripheren Hörsystems bei Presbyakusis vorgenommen und versucht, strukturelle Änderungen mit spezifischen Audiogrammverläufen in Verbindung zu bringen (Schuknecht 1955, Schuknecht und Gacek 1993). Insgesamt unterschied *Schuknecht* im Verlauf *sechs Typen der Presbyakusis*: sensorische (*Sensory presbycusis*), neurale (*Neural presbycusis*), striale bzw. metabolische (*Strial presbycusis*) und mechanische (*Cochlear conductive presbycusis*) Presbyakusis sowie Mischformen dieser

Kategorien (*Mixed presbycusis*) bzw. nicht diesen Kategorien zuordenbare Formen der Presbyakusis (*Indeterminate presbycusis*). Schuknecht erwähnte zudem bereits weitere Veränderungen wie eine Atrophie des Lig. spirale und der Reissnerschen Membran (Schuknecht und Gacek 1993). Unter Berücksichtigung neuerer Forschungsergebnisse stellt sich die Schuknecht-Klassifikation der Presbakusis aktuell wie folgt dar (Gates und Mills 2005, Nadol Jr 2010, Lee 2013, Hesse 2015, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016):

(1) *Sensorische Presbyakusis (Sensory presbycusis)*: Als Kriterium für diesen Typ wurde ein vollständiger Verlust der Haarzellen auf einer Länge von mindestens 10mm an der basalen Schneckenwindung festgelegt (Schuknecht und Gacek 1993). Der pathologische Haarzellverlust betrifft zunächst die äußeren, später auch die inneren Haarzellen bis zu einer vollständigen Atrophie des Corti-Organs, und schreitet von basal nach apikal fort. Entsprechendes tonaudiometrisches Korrelat ist ein progredienter Hörverlust zunächst im Hochtonbereich, im Verlauf auch in den tieferen Frequenzen (Schuknecht und Gacek 1993, Nadol Jr 2010, Ruan *et al.* 2014, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016). Ätiologisch wird neben dem Alter unter anderem eine erhöhte Lärmexposition verantwortlich gemacht (Gates und Mills 2005, Ruan *et al.* 2014).

(2) *Neurale Presbyakusis (Neural Presbycusis)*: Vorliegend, wenn mindestens 50% der Neurone des Ganglion spirale im Modiolus degeneriert sind (Schuknecht und Gacek 1993). Das Spiralganglion enthält myelinisierte große bipolare Neurone, die die inneren Haarzellen innervieren (Typ-I-Fasern), und unmyelinisierte kleine Neurone, die efferent die äußeren Haarzellen inhibieren (Typ-II-Fasern) (Gates und Mills 2005, Lüllmann-Rauch 2006). Ab einem Verlust mindestens der Hälfte der Neurone resultiert klinisch eine verminderte Sprachdiskrimination bei zunächst stabiler tonaudiometrischer Hörschwelle (sog. *Phonemic regression*); letztere verschlechtert sich erst beim Untergang von ca. 80-90% der Neurone. Es ist bisher unklar, ob der Neuronenverlust als primärer Prozess der Presbyakusis oder als sekundäre Folge des Haarzellverlustes anzusehen ist (Schuknecht und Gacek 1993, Nadol Jr 2010, Lee 2013, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016).

(3) *Striale oder metabolische Presbyakusis (Strial presbycusis)*: Definiert als Atrophie der Stria vascularis mit mindestens 30%-igem Verlust an Gewebavolumen (Schuknecht und Gacek 1993). Die Atrophie umfasst vor allem den basalen und apikalen Teil der Kochlea (Roth 2015), betrifft nach tierexperimentellen Studien Zellen und Gefäßstruktur der Stria vascularis (Gates und Mills 2005) und beeinträchtigt deren Funktion und damit die Aufrechterhaltung des endokochleären Potenzials. Infolgedessen kommt es zur Beeinträchtigung der Kochleafunktion insgesamt und zu einem pankochleären Hörverlust mit flacher oder leicht abfallender Tonschwelle bei gut erhaltenem Sprachverständnis. Aufgrund familiärer Häufung wird eine genetische Komponente dieses Presbyakusis-Typs vermutet, zudem eine Assoziation mit kardiovaskulären Risikofaktoren

(Schuknecht und Gacek 1993, Gates und Mills 2005, Nadol Jr 2010, Lee 2013, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016).

(4) *Mechanische Presbyakusis (Cochlear conductive presbycusis)*: Dieser hypothetische Typ der Presbyakusis wurde von Schuknecht aufgrund pathologischer und klinischer Kriterien postuliert: Eine Verdickung und Steifigkeitszunahme der Basilarmembran vor allem in den basalen Abschnitten würde zu einem Schwerhörigkeitstyp mit linear abfallender Hörschwelle führen (Schuknecht und Gacek 1993, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016). Trotz theoretischer Plausibilität gibt es bis heute keine Evidenz für dessen Existenz (Lee 2013, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016).

(5) *Mischformen (Mixed presbycusis)*: Die simultane Erfüllung der Kriterien mehrerer o.g. Schwerhörigkeitstypen klassifizierte Schuknecht als Mischtyp der Presbyakusis und ging von jeweils additiven Effekten auf die Tonschwelle aus (Schuknecht und Gacek 1993). Infolgedessen umfasst dieser Schwerhörigkeitstyp je nach zugrundeliegenden Komponenten uneinheitliche tonaudiometrische Befunde (Nadol Jr 2010, Roth 2015).

(6) *Nicht zuordenbare Presbyakusis (Indeterminate presbycusis)*: Vorliegend, falls die histopathologischen Kriterien für keinen der o.g. Schwerhörigkeitstypen erfüllt sind (Schuknecht und Gacek 1993). Bis zu 25% der Presbyakusis-Fälle zeigen im Felsenbeinpräparat kein lichtmikroskopisches Korrelat und sind damit diesem Schwerhörigkeitstyp zuzuordnen. Es wird angenommen, dass lichtmikroskopisch nicht detektierbare Pathologien des peripheren Hörsystems, z.B. der Verlust von Tip-links der Haarzellstereozilien, eine Rarefizierung des Dendritenbesatzes der Neurone oder Veränderungen intrazellulärer Enzyme und Signalkaskaden, und Schädigungen der zentraleren Hörbahnanteile in diesen Fällen zur Schwerhörigkeit führen (Schuknecht 1955, Nadol Jr 2010, Lee 2013, Roth 2015).

(7) *Atrophie des Lig. spirale*: Die Fibrozyten des Lig. spirale spielen mit ihrem Enzymbesatz und ihren Gap Junctions eine wichtige Rolle für die Kalium-Rezirkulation zur Stria vascularis und damit für die Aufrechterhaltung des endokochleären Potenzials (Lüllmann-Rauch 2006). Schuknecht beschrieb eine Atrophie des Lig. Spirale bereits als Nebenbefund in seiner ursprünglichen Klassifikation (Schuknecht und Gacek 1993). Mit zunehmendem Alter kommt es sowohl beim Normalhörenden, häufiger jedoch bei Schwerhörigen mit abfallendem Tonschwellenverlauf zu einer progredienten Atrophie der Fibrozyten im Spiralligament, insbesondere in der apikalen Cochlea und im mittleren Bereich des Lig. spirale und teilweise zu einer veränderten Konfiguration des Ductus cochlearis (Schuknecht und Gacek 1993, Nadol Jr 2010, Roth 2015). Tierexperimentelle Studien legen einen Zusammenhang dieser Prozesse mit dem Entstehen der Presbyakusis nahe (Nadol Jr 2010).

Die Schuknecht-Klassifikation ist heutzutage nicht unumstritten. Kritiker bemängeln, dass diese nur strukturelle Änderungen an peripheren Hörbahnanteilen berücksichtigt und dass sich die meisten Presbyakusis-Typen nicht eindeutig den einzelnen Subtypen zuordnen lassen, sondern eine Mischung aus Pathologien aufweisen (Lee 2013, Roth 2015).

<u>Ätiologische Faktoren</u>	<u>Pathophysiologische Prozesse</u>	<u>Pathologien am Hörsystem</u>	<u>Klinik</u>
Alter Genetik, ggf. epigenetische Veränderungen Lärmexposition Ototoxische Medikamente (z.B. Aminoglykoside, Schleifendiuretika, Zytostatika) Infektionen Lebensstil / Kardiovaskuläre Risikofaktoren (Nikotinabusus, Adipositas, arterielle Hypertonie, Diabetes mellitus, Lipidstoffwechselstörungen)	▶ Oxidativer Stress / erhöhte ROS-Bildung ▶ Mitochondriale Dysfunktion ▶ Ggf. Glutamat-Exzitotoxizität ▶ Zellapoptose und -nekrose	▶ Periphere Presbyakusis (Schuknecht) Sensorische Presbyakusis Neurale Presbyakusis Striale / Metabolische Presbyakusis (Mechanische Presbyakusis) Mischformen Nicht zuordenbare Formen Atrophie des Lig. spirale ▶ Zentrale Presbyakusis	Leitsymptome Bilateraler symmetrischer sensorineuraler Hörverlust, v.a. im Hochtonbereich Beeinträchtigt Sprachverständnis, v.a. im Störgeräusch (<i>Phonemic Regression, Cocktailpartyeffekt</i>) Beeinträchtigte auditive Diskriminationsleistungen (Schalllokalisation, Frequenz-, Pegeldiskrimination) Komplikationen Sozialer Rückzug Depression Demenz

Abbildung 1.6: Ätiopathogenese und Klinik der Presbyakusis

Multiple synergistisch wirkende ätiologische Faktoren führen vermutlich über mehrere grundlegende pathophysiologische Mechanismen zu Pathologien am peripheren und wahrscheinlich auch zentralen Hörsystem. Klinisch resultiert das Beschwerdebild der Presbyakusis mit damit einhergehenden psychosozialen Komplikationen.

Zusätzlich zu diesen peripheren Pathologien finden Alterungsprozesse auch im zentralen Hörbahnanteil ab dem Nucleus cochlearis statt. Diese *zentrale Presbyakusis* äußert sich klinisch durch ein vermindertes Sprachverstehen, vor allem im Störgeräusch, und durch herabgesetzte zentral-auditive Schallverarbeitungsleistungen wie Schalllokalisation, Tonhöhen- und Pegeldiskrimination (Gates und Mills 2005, Probst *et al.* 2008, Ruan *et al.* 2014, Fischer *et al.* 2016). Pathophysiologisch scheinen neben einer Atrophie insbesondere der grauen Hirnsubstanz auch Veränderungen im Gleichgewicht zwischen exzitatorischen und inhibitorischen Neurotransmittern, u.a. durch Degeneration glutamaterger Neurone, und Remodelingprozesse in der tonotopischen Organisation der zentralen Hörbahnanteile relevant zu sein (Billings *et al.* 2012, Lee 2013, Profant *et al.* 2013, Profant *et al.* 2014, Ruan *et al.* 2014, Fischer *et al.* 2016). Tierexperimentell wurden zudem Hinweise auf eine verminderte zentrale Calcium-Pufferkapazität in höherem Alter mit konsekutiv zunehmender Zellalterung gefunden (Ouda *et al.* 2015, Roth 2015). Inwieweit all diese Veränderungen als isolierter primärer Prozess im Rahmen der Presbyakusis auftreten können bzw. welche Anteile sekundär auf die vorgeschalteten peripheren Degenerationsprozesse und begleitende kognitive Einbußen zurückzuführen sind, ist schwer zu

unterscheiden (Gates und Mills 2005, Humes *et al.* 2012, Ouda *et al.* 2015). In einem Literaturreview sahen Humes *et al.* (2012) keine eindeutige Evidenz für eine zentrale Presbyakusis im engeren Sinne, d.h. unabhängig von peripherem Hörverlust und kognitiven Einschränkungen. Die tierexperimentelle und klinische Studienlage der letzten Jahre stützt allerdings zunehmend die Hypothese eines primär zentralen Anteils in der Entstehung der Presbyakusis (Ouda *et al.* 2015).

Abbildung 1.6 fasst die Ätiopathogenese und - vorausgreifend auf das nachfolgende Kapitel **1.2.3** - die Symptome der Presbyakusis zusammen.

1.2.3 Symptome und Komplikationen der Presbyakusis

Leitsymptome der Presbyakusis sind ein bilateraler symmetrischer sensorineuraler Hörverlust besonders im Hochtonbereich, verminderte auditive Diskriminationsleistungen und ein beeinträchtigtes Sprachverständnis (Gates und Mills 2005, Behrbohm *et al.* 2012, Lenarz und Boenninghaus 2012, Fischer *et al.* 2016). Erste Verschlechterungen im Hörvermögen können tonaudiometrisch bereits in der frühen Adoleszenz erfasst werden, relevante Hörverluste treten meist etwa ab der sechsten Lebensdekade auf (Lenarz und Boenninghaus 2012). Die zu erwartende durchschnittliche Hörschwellenverteilung einer gesunden Normalbevölkerung wird geschlechtergetrennt durch die Norm DIN EN ISO 7029:2014-09 in ihrem aktuellsten Entwurf beschrieben (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014). Neben den medianen Hörschwellenwerten einer Normalbevölkerung in unterschiedlichen Altersklassen (siehe **Abbildung 1.7**) finden sich hierin auch Angaben zur Verteilung der beobachteten Hörverluste innerhalb einer Altersklasse, wobei die Variabilität interindividuell erheblich ist, so dass auch im hohen Alter gelegentlich noch nahezu unbeeinträchtigte Hörschwellenverläufe möglich sind. Herabgesetzte auditive Diskriminationsleistungen äußern sich insbesondere durch eine beeinträchtigte Fähigkeit zur Schalllokalisation sowie ein vermindertes Frequenz- und Pegelunterscheidungsvermögen (Behrbohm *et al.* 2012, Fischer *et al.* 2016). Das Sprachverständnis ist bei der Presbyakusis im Vergleich zum tonaudiometrischen Hörverlust meist überproportional beeinträchtigt (sog. *Phonemic Regression*), die Betroffenen klagen über Verständnisprobleme insbesondere im Störlärm („*Cocktailpartyeffekt*“) (Gates und Mills 2005, Behrbohm *et al.* 2012, Roth 2015, Fischer *et al.* 2016).

Die durch den Hörverlust zunehmend beeinträchtigte soziale Interaktion führt *komplikat*iv im weiteren Verlauf häufig einen sozialen Rückzug der Betroffenen mit einem erhöhten Risiko für die Entstehung depressiver Störungen (Gates und Mills 2005, Fischer *et al.* 2016). Zudem konnte eine Assoziation zwischen der Presbyakusis und kognitiver Einschränkung nachgewiesen werden;

Altersschwerhörige haben demnach eine erhöhte Wahrscheinlichkeit für die Entwicklung dementieller Erkrankungen (Lin *et al.* 2013, Hesse 2015).

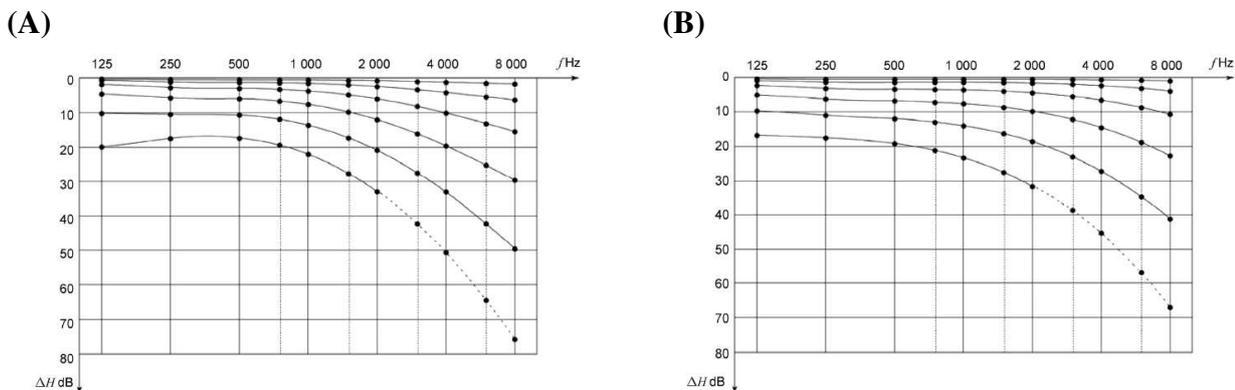


Abbildung 1.7: Mediane Hörschwellenabweichung der Normalbevölkerung nach E DIN EN ISO 7029:2014-09 für Männer (A) und Frauen (B)

Die Norm DIN EN ISO 7029:2014-09 beschreibt im aktuellsten Entwurf die zu erwartenden Hörschwellenabweichungen einer otologisch normalen Bevölkerung, d.h. von Personen mit normalem Gesundheitszustand ohne Ohrerkrankungen, ohne übermäßige Lärmexposition, ohne Exposition gegenüber ototoxischen Medikamenten und ohne familiäre Vorbelastung. Von oben nach unten stellen die Kurven jeweils die medianen Hörschwellenabweichungen (ΔH in dB HL) für 30-, 40-, 50-, 60-, 70- und 80-jährige Männer (A) bzw. Frauen (B) dar, wobei im Einzelfall erhebliche Abweichungen im individuellen Hörvermögen auftreten können. f: Frequenz (Hz). Quelle: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014); mit freundlicher Genehmigung des Beuth-Verlags (siehe Anhang 7.8).

1.2.4 Diagnostik bei Presbyakusis

Bereits in der *Anamnese* können über gezielte Fragen nach einer Hörbeeinträchtigung, insbesondere nach Sprachverständnisproblemen in Umgebungslärm (Restaurant, Gesprächssituation mit mehreren Personen, Fernsehen mit Hintergrundmusik), erste Hinweise auf eine vorliegende Altersschwerhörigkeit gewonnen werden. Zugleich lassen sich gezielt Risikofaktoren, d.h. Exposition gegenüber Lärm bzw. ototoxischer Medikation, familiäre Vorbelastung, frühere Ohrerkrankungen und kardiovaskuläre Risikofaktoren, erfassen. Bei erhärtetem Verdacht sollte nach möglichen Komplikationen der Hörbeeinträchtigung wie sozialem Rückzug gefragt werden. Wegweisend in der Diagnose sind *Tonaudiogramm* und *Sprachaudiogramm*, die den o.g. bilateralen, hochtonbetonten sensorineuralen Hörverlust bzw. ein beeinträchtigtes Sprachverständnis erkennen lassen. Mithilfe der Sprachaudiometrie lässt sich zudem der Erfolg einer Presbyakusisbehandlung einschätzen; Standardverfahren ist hierbei im deutschsprachigen Raum der Freiburger Sprachtest. Als Maß für den rehabilitativen Therapieerfolg werden der sog. Hörgewinn (Sprachverständlichkeitsschwelle mit Hörgerät - Sprachverständlichkeitsschwelle ohne Hörgerät) und das Einsilberverstehen verwendet. Weitere diagnostische Methoden (Otoskopie, Tympanogramm, ggf. Bildgebung) dienen vor allem dem Ausschluss konkurrierender

Differenzialdiagnosen (Gates und Mills 2005, Behrbohm *et al.* 2012, Lenarz und Boenninghaus 2012, Fischer *et al.* 2016).

1.2.5 Therapie der Presbyakusis

Eine bilaterale *Versorgung mit Hörgeräten* stellt heutzutage die Therapie der Wahl bei der Presbyakusis dar (Gates und Mills 2005, Behrbohm *et al.* 2012, Lenarz und Boenninghaus 2012, Fischer *et al.* 2016). Die Indikation hierfür wird in Deutschland durch die Hilfsmittelrichtlinie des Gemeinsamen Bundesausschusses geregelt (Gemeinsamer Bundesausschuss 2014). Demnach besteht ein Anspruch auf eine Hörgeräteversorgung, wenn (1) der tonaudiometrische Hörverlust auf dem besseren Ohr mindestens 30dB HL in mindestens einer der Testfrequenzen zwischen 500 und 4000Hz beträgt und (2) das Einsilberverstehen im Freiburger Sprachtest bei 65dB bei nicht mehr als 80% liegt. In Einzelfällen können auch Mittelohr- bzw. Kochleaimplantate in der Behandlung der Presbyakusis zum Einsatz kommen, wenn über ein konventionelles Hörgerät nur ein unzureichender Behandlungserfolg erzielt werden kann (Gates und Mills 2005, Fischer *et al.* 2016). In allen Fällen sollte die Hilfsmittelversorgung zu einem möglichst frühen Zeitpunkt stattfinden, um der Entstehung psychosozialer Komplikationen und zentral-auditiver Verarbeitungsdefizite vorzubeugen (Probst *et al.* 2008, Behrbohm *et al.* 2012). Da Hörgeräte im Wesentlichen lediglich über eine Schallamplifikation arbeiten, beruht deren Hörverbesserung hauptsächlich auf dem Ausgleich der peripher-auditiven Hördefizite. Eingeschränkte zentrale Hörfunktionen wie Schallokalisierung oder die Sprachschallextraktion aus dem Störgeräusch werden häufig nur unzureichend kompensiert (Probst *et al.* 2008). Einschränkungen im Tragekomfort und veränderter Höreindruck können zudem zu einer mangelnden Compliance beim Patienten führen (Gates und Mills 2005, Fischer *et al.* 2016).

Entsprechend kommt einer zusätzlichen *Schulung* des Patienten eine wesentliche Rolle für den Therapieerfolg zu. Neben dem korrekten Umgang mit dem Hörgerät und dessen verändertem Schalleindruck sowie auditiven Trainingsmethoden werden hierbei weitere Strategien zur Hörverbesserung, z.B. das Erlernen von Lippenablesen oder die Identifikation von Schlüsselwörtern im Sprachfluss, vermittelt. Auch *Allgemeinmaßnahmen und Alltagshilfen* können erheblich zur Lebens- und Hörqualität des altersschwerhörigen Patienten beitragen. Hierzu gehören u.a. die Elimination von Störschallquellen (z.B. Hintergrundmusik) während Gesprächen, die Bitte um langsames und deutliches Sprechen des Gesprächspartners oder technische Hilfsmittel wie Vibrationswecker oder Lichtsignalgeber für Türklingel bzw. Telefon (Gates und Mills 2005, Probst *et al.* 2008, Fischer *et al.* 2016).

1.3 Zielsetzung und Studienkonzept

Bereits zum jetzigen Zeitpunkt ist die Presbyakusis mit einer Prävalenz von etwa 25% bei 70-Jährigen und 50% bei 80-Jährigen ein verbreitetes Krankheitsbild (Roth *et al.* 2011) und insgesamt gesehen die häufigste Form der Höreinschränkung in der Humanmedizin (Yang *et al.* 2015). Im Rahmen des demografischen Wandels ist eine weitere Zunahme der Anzahl Betroffener in einer immer älter werdenden Gesellschaft zu erwarten. Nichtsdestotrotz (siehe 1.2.2) ist die Ätiopathogenese der Presbyakusis bisher nicht vollständig verstanden, einzelne Komponenten wie die zentrale Presbyakusis sind weiterhin nicht unumstritten. Zudem zeigen Untersuchungen zur Hörschwellenverteilung, dass Altern nicht zwangsläufig mit einem Hörverlust einhergehen muss (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014), dass also der Begriff Altersschwerhörigkeit nur einen vereinfachenden Ausdruck für in Wirklichkeit multifaktoriell bedingte Hörveränderungen beim älteren Menschen darstellt (Hesse 2015). Die bisher hauptsächlich verfolgte Therapiestrategie der Schallamplifikation ist in Bezug auf Patient compliance, Komfort und Ausgleich der wahrgenommenen Defizite limitiert (Gates und Mills 2005). Vor diesem Hintergrund sind weitere Kenntnisse zur Entstehung und Manifestation der Presbyakusis dringend erforderlich, um deren zunehmender sozialer sowie ökonomischer Bedeutung gerecht zu werden und eventuell auch neue Therapieansätze entwickeln zu können.

Zugleich steht inzwischen durch in den letzten Jahren entwickelte neuere Untersuchungsmethoden ein breiteres Spektrum an diagnostischen Möglichkeiten zur Verfügung, insbesondere psychoakustische Tests zur Einschätzung zentral-auditiver Verarbeitungsleistungen.

Die im Rahmen dieser Dissertation durchgeführte Hörstudie soll in diesem Gesamtumfeld einen Beitrag zum Verständnis von Ätiopathogenese und Manifestationen der Presbyakusis liefern. Folgende Studiengrundsätze wurden im Vorfeld festgelegt:

1. *Dreigruppenkonzept*: Durch Rekrutierung eines normalhörenden jungen Kontrollkollektivs, eines normalhörenden Über-60-Jährigen-Kollektivs und eines altersschwerhörigen Über-60-Jährigen-Kollektivs soll eine möglichst scharfe Trennung zwischen altersbedingten Phänomenen der Presbyakusis (durch Vergleich der Testergebnisse beider normalhörender Kollektive) und zusätzlichen hörverlustbedingten Komponenten der Presbyakusis (durch Vergleich der Testergebnisse beider Über-60-Jährigen-Kollektive) durchführbar sein.
2. *Testbatteriekonzept*: Durch Anwendung einer sämtliche Stationen der Hörbahn umfassenden, nach topodiagnostischen Aspekten zusammengestellten Testbatterie an jedem

Studienteilnehmer soll ein möglichst umfassendes Bild der Komponenten der Presbyakusis am peripheren und zentralen Hörbahnanteil gewonnen werden. Hierdurch sind im Vergleich zu Einzelteststudien eine Korrelationsanalyse und damit Rückschlüsse auf Interaktionen zwischen peripheren und zentralen Komponenten der Presbyakusis möglich.

3. *Anwendung aktueller nicht-sprachgebundener zentral-auditiver Testmethoden:* Nicht-sprachgebundene psychoakustische Tests wurden von Humes *et al.* (2012) als die meistversprechende Methodik zur Erfassung zentral-auditiver Leistungen bei Presbyakusis identifiziert. Durch Anwendung eines derartigen Tests soll ein Beitrag zur Frage nach der Existenz einer eigenständigen zentralen Presbyakusiskomponente geleistet werden.
4. *Redundanzkonzept:* Durch redundante Erfassung äquivalenter Hörleistungen durch mehrere, insbesondere auch in den letzten Jahren neu entwickelte Tests ist ein unmittelbarer Vergleich der diagnostischen Leistungsfähigkeit der jeweiligen Methoden möglich. Hierdurch sollen ein Beitrag zur schnellen, patientenfreundlichen und kosteneffizienten Diagnostik der Presbyakusis geliefert und die Praktikabilität neuerer Methoden am Patienten geprüft werden.

2 Material und Methoden

An der Studie nahmen 97 Probanden teil. Nach Ausschluss von sieben Teilnehmern aus unten genannten Gründen konnten 90 Teilnehmer zur endgültigen Auswertung herangezogen werden.

Zunächst wurden in einer Vorphase die im Folgenden beschriebenen Untersuchungsmethoden sowohl an normalhörenden als auch an schwerhörigen Personen durch Testung mit verschiedenen Gerätevoreinstellungen in Hinblick auf Zuverlässigkeit, Praktikabilität und Zeitablauf optimiert. Durch entsprechende Voreinstellung der Geräte und den Einsatz spezifischer Handlungsanweisungen konnte die Messzeit in erheblichem Maße reduziert werden. Dieser Aspekt war vor dem Hintergrund nachlassender Konzentration unerlässlich, um vor allem bei den zeitintensiven subjektiven Untersuchungsmethoden zuverlässige Ergebnisse zu erzielen.

Nachdem in der Vorphase das endgültige Studienprotokoll erstellt worden war, konnten zwischen Juni 2012 und November 2013 97 Probanden zur Teilnahme an der Hörstudie gewonnen und untersucht werden. Sämtliche Messdaten wurden vom Verfasser dieser Dissertation selbst erhoben, um einen konstanten Ablauf der Untersuchungen bei allen Teilnehmern zu gewährleisten.

Bereits während der Datenerhebung wurden sämtliche Untersuchungsergebnisse mittels einer eigens dafür entwickelten automatisierten Software aus den Speichermodulen der jeweiligen Messgeräte ausgelesen und in eine zentrale Übersichtstabelle überführt, die dann als Grundlage für die abschließend durchgeführte statistische Auswertung diente.

Während aller Phasen der Datenerhebung und -auswertung wurden die jeweils verwendeten Geräte, Geräteeinstellungen, Auswertalgorithmen und statistischen Methoden schriftlich dokumentiert; diese Aufzeichnungen bilden die Grundlage für die anschließende detaillierte Darstellung der Messmethoden und des Studienkollektivs.

Die vorliegende Studie war Teil des Projekts „Automatisierte Hördiagnostik und nicht-kooperative Hörgeräteanpassung“, das an der Experimentellen Audiologie der HNO-Klinik des Klinikums rechts der Isar der Technischen Universität München durchgeführt wurde. Hierzu lag ein entsprechendes Votum der Ethikkommission des Klinikums rechts der Isar vor.

2.1 Studienpopulation

Es wurden drei verschiedene Studienkollektive gebildet, um sowohl alters- als auch durch Schwerhörigkeit bedingte Höreinschränkungen erfassen zu können: normalhörende, gesunde

Kontrollpersonen im Alter zwischen 18 und 26 Jahren, normalhörende Über-60-Jährige und altersschwerhörige Über-60-Jährige. Diese Dreiteilung ermöglichte einerseits, über den Vergleich der Befunde der zwei unterschiedlich alten normalhörenden Kollektive Rückschlüsse auf Alterungsprozesse der Hörbahn zu ziehen, andererseits gab der Vergleich der beiden Gruppen Über-60-Jähriger (also annähernd Gleichaltriger) Hinweise auf zusätzliche schwerhörigkeitsassoziierte Degenerationserscheinungen bei Presbyakusis.

Die grundlegende Gruppenzuordnung „normalhörend“ oder „schwerhörig“ erfolgte mithilfe des Tonschwellenaudiogramms. Angelehnt an die Klassifikation der Schwerhörigkeitsgrade der World Health Organization WHO (World Health Organization 1991, Mathers *et al.* 2000) wurde als Hörvermögen der durchschnittliche Hörverlust in Dezibel Hearing Loss (dB HL) bei den Audiometerfrequenzen 500, 1000, 2000 und 4000 Hz festgelegt. Die WHO stuft einen durchschnittlichen Hörverlust bis maximal 25dB HL bei diesen vier Frequenzen als unbeeinträchtigt Hörvermögen (no impairment) ein. Wird dieser Grenzwert überschritten, so handelt es sich um einen leichten (bis 40dB HL), moderaten (bis 60dB HL), schweren (bis 80dB HL) oder hochgradigen Hörverlust (größer 80dB HL). Herangezogen zur Beurteilung wird jeweils nur der Wert des besser hörenden Ohres. Im Gegensatz dazu wurde in der vorliegenden Studie der Durchschnittshörverlust beider Ohren bei den oben genannten Audiometerfrequenzen zur Einstufung des Hörvermögens verwendet. Grund hierfür war, dass die im Rahmen dieser Studie geprüften Hörleistungen, beispielsweise das Sprachverständnis im Hintergrundgeräusch und die Beurteilung von interauralen Tondauer- und -intensitätsunterschieden, ein beidseits intaktes Hörsystem erfordern (Klinke *et al.* 2005). Es erschien daher sinnvoller, die Gesamtleistung des Hörsystems eines Studienteilnehmers und damit die Zuordnung zu Normalhörenden oder Schwerhörigen über einen bilateral ermittelten Messwert zu beurteilen, als selektiv über das Hörvermögen des besseren Ohres.

Eine nachträgliche Berechnung zeigte, dass das Hörvermögen von lediglich drei der 90 Probanden (P16, P44 und P64) bei Heranziehen des unilateralen WHO-Kriteriums geringfügig anders beurteilt worden wäre: Entsprechend der WHO-Kriterien wären diese in den Grenzbereich zwischen Normal- und Schwerhörigkeit (20-25dB HL des besseren Ohres) eingestuft worden; in dieser Studie wurden diese drei Probanden der Schwerhörigengruppe zugeordnet - insgesamt also nur ein marginaler Unterschied. Insofern lassen sich die Ergebnisse dieser Studie trotz strengem Beurteilungskriterium problemlos mit anderen Studien vergleichen, die wie die WHO nur das bessere Ohr für die Klassifikation des Hörvermögens berücksichtigen.

Eine weitere Modifikation der WHO-Klassifikation betraf den maximalen Hörverlust für normalhörende Personen. Im Gegensatz zum WHO-Grenzwert mit einem Durchschnittshörverlust von 25dB HL bei den genannten Audiometerfrequenzen (World Health Organization 1991, Mathers *et al.* 2000) wurde in der vorliegenden Studie ein maximaler Hörverlust von nur 20dB festgelegt. Diese von den Richtlinien der WHO abweichende Einteilung musste vorgenommen werden, da auf mehrere Studienteilnehmer im Grenzbereich zwischen 20dB und 25dB bereits ein Kriterium der deutschen Richtlinien zur Hörgeräteversorgung zutraf: ein Hörverlust von mindestens 30dB bei mindestens einer Frequenz zwischen 500 und 4000Hz (Gemeinsamer Bundesausschuss 2014, §§21, 22). Mit dem strengeren Grenzwert von 20dB konnte vermieden werden, dass Studienteilnehmer als normalhörend klassifiziert werden, die bereits einen Teil der deutschen Hörgeräteindikation erfüllen, also nach deutschem Gutachtenverständnis kein normales Hörvermögen mehr besitzen. Der Wert 20dB wird zudem auch von der Europäischen Arbeitsgruppe als Höchstwert für Normalhörigkeit angesehen (Martini 1996, Heger und Holube 2010) und wurde in der Erstfassung der WHO-Klassifikation als alternative Grenze für die Einstufung als „unbeeinträchtigt Hörvermögen“ („no impairment“) vorgeschlagen (World Health Organization 1991).

Für die Schwerhörigengruppe wurde ein maximaler Durchschnittshörverlust von 50dB HL bei den genannten Frequenzen als obere Einschlussgrenze für die Studie festgelegt. Ein höherer Wert hätte zwar den Vorteil ausgeprägterer Schwerhörigkeitseffekte auf die Untersuchungsergebnisse gehabt. Die DPOAE lassen sich jedoch regelmäßig nur bis zu einem Hörverlust von ca. 50dB HL nachweisen (Strutz und Mann 2010, Mrowinski und Scholz 2011). Der Einschluss von Probanden mit höherem Schwerhörigkeitsgrad hätte daher auch eine deutliche Zunahme unvollständiger Datensätze zur Folge gehabt.

Zusammenfassend wurden folglich Personen mit einem Durchschnittshörverlust bis einschließlich 20dB HL (bei 500, 1000, 2000 und 4000Hz beidseits) als normalhörend betrachtet; in die Schwerhörigengruppe wurden Personen mit einem durchschnittlichem Hörverlust zwischen 25 und 50dB HL aufgenommen.

Sowohl Normalhörende als auch Altersschwerhörige weisen einen weitgehend symmetrischen Audiogrammbefund beider Ohren auf (Probst *et al.* 2008, Lenarz und Boenninghaus 2012). Stark asymmetrisches Hörvermögen beider Ohren - mehr als 25dB Unterschied bei mehr als einer Audiometerfrequenz - führte daher zum Ausschluss des Teilnehmers aus der Studie. Die Symmetrie der Tonschwellen konnte nachträglich auch rechnerisch bestätigt werden (siehe **3.1.2**).

Als Gruppenstärke der drei Studienkollektive wurden jeweils 30 Personen festgelegt. Durch gezielte Annahme und Ablehnung von weiblichen bzw. männlichen Interessenten gegen Ende der Studie konnte erreicht werden, dass in allen Gruppen ein ausgeglichenes Geschlechterverhältnis von 15 Frauen zu 15 Männern bestand.

Tabelle 2.1 gibt einen Überblick über die Ein- und Ausschlusskriterien für die Hörstudie.

Tabelle 2.1: Ein- und Ausschlusskriterien für die Hörstudie

Erläuterungen siehe entsprechende Kapitel im Abschnitt Material und Methoden

	<u>Einschlusskriterien</u>	<u>Ausschlusskriterien</u>
Alter	<i>Kontrollkollektiv:</i> 18 - 26 Jahre <i>Ü60-Subkollektive:</i> 60 - 80 Jahre	Alle anderen Altersgruppen
Tonschwellen-audiogramm	Hörverlust (dB HL, Durchschnitt 500, 1000, 2000, 4000Hz bilateral); Hörschwellenverlauf: <i>Normalhörende:</i> ≤20dB HL <i>Altersschwerhörige:</i> >25 - 50dB HL; basokochleär (>2000Hz) betonte Schwerhörigkeit Weitgehend symmetrische Tonschwelle	Alle anderen Durchschnittshörverluste Andere Audiogrammbefunde (medio-/apikokochleärer Hörschaden, Carhart-Senke, c ⁵ -Senke) Asymmetrischer Audiogrammbefund (>25dB HL Differenz rechts vs. links in >1 Frequenz) Inkonstantes Antwortverhalten mit nur unzuverlässig ermittelbarer Hörschwelle
DIN-Bogen: Fragen 2 und 3		Akute Ohrinfektionen Fluide Otitis media acuta mit / ohne Trommelfellperforation Subjektiv beeinträchtigender Tinnitus Hörsturz mit Hörbeeinträchtigung zum Untersuchungszeitpunkt Wesentliche, u.a. auch durch Operationen bedingte, morphologische Veränderungen des Hörapparates
Otoskopie	Unauffälliger Gehörgangs- und Trommelfellbefund	Relevante Pathologien des Gehörgangs (lumenverlegende Exostosen) und Trommelfells (Defekte, starke Vernarbung, Vorwölbung / Retraktion)
Tympanogramm	Normalbefund: glockenförmige Compliancekurve, Maximum bei etwa 0daPa (Unterdruck bis 100 daPa toleriert)	Überhöhte / abgeflachte / verschobene Compliancekurve

2.1.1 Kontrollkollektiv

Als gesundes Kontrollkollektiv wurden 30 Studienteilnehmer - 15 Frauen und 15 Männer - im Alter zwischen 18 und 26 Jahren rekrutiert, die das oben genannte audiometrische Kriterium für normales Hörvermögen und die weiteren Einschlusskriterien erfüllten. Die Altersgrenzen für die Studienteilnahme wurden im Vorfeld festgelegt, um einen möglichst homogenen Altersdurchschnitt des Kontrollkollektivs zu gewährleisten. Die Rekrutierung erfolgte aus dem Freundeskreis des Verfassers und Studierenden am Klinikum rechts der Isar. Mitarbeiter der HNO-Klinik wurden

zudem aufgefordert, den Studienaufruf an Verwandte oder Bekannte in der geforderten Altersgruppe weiterzugeben. Auch während der Untersuchungen wurde jeder Studienteilnehmer gebeten, potentiell interessierte Verwandte, Freunde oder Bekannte über die Hörstudie zu informieren. Die Kontaktaufnahme und Terminvereinbarung erfolgten jeweils per Telefon oder Email. Durch die unterschiedlichen Rekrutierungsmodi konnte sichergestellt werden, dass sich das Kontrollkollektiv aus Personen verschiedenster Herkunft zusammensetzte. Den Kontrollpersonen wurden die Identifikationsnummern 001 bis 030 zugeteilt.

2.1.2 Ü60-Kollektiv mit Subkollektiven

Alle rekrutierten Über-60-Jährigen (im Folgenden als Ü60-Kollektiv bezeichnet) wurden zwei Subkollektiven à 30 Personen zugeteilt: einer Normalhörenden-Gruppe sowie einer Altersschwerhörigengruppe nach den oben und in den folgenden Abschnitten erläuterten Einschlusskriterien. Beide Subkollektive wiesen wie das Kontrollkollektiv ein Geschlechterverhältnis von 1:1 auf.

Die obere Altersgrenze des Ü60-Kollektivs wurde auf 80 Jahre festgelegt, um - wie bei den Kontrollpersonen - einerseits eine möglichst homogene Altersverteilung der Studienteilnehmer zu gewährleisten und andererseits einen möglichst ähnlichen Altersdurchschnitt beider Subgruppen zu erzielen.

Das Ü60-Kollektiv wurde auf drei verschiedene Arten rekrutiert:

Zum einen wurde die Patientendatenbank der HNO-Klinik nach Personen im passenden Alter und mit zu den Einschlusskriterien passendem Audiogrammbefund durchsucht. Mithilfe einer entsprechenden Software wurde vollautomatisch eine Liste aller 60- bis 80-jährigen Patienten erstellt, die in den vorangegangenen zwei Jahren in der HNO-Klinik ein Audiogramm erhalten hatten und deren Durchschnittshörverlust dem Kriterium „normalhörend“ bzw. „schwerhörig“ nach obiger Definition genügte. In einem zweiten Schritt wurden die Audiogramme dieser Patienten von Hand gesichtet und diejenigen herausgefiltert, deren Schwellenverlauf den unten genannten Kriterien für Normalhörigkeit und Altersschwerhörigkeit entsprach (siehe **2.6.1**). Die so selektierten Patienten wurden per Post kontaktiert und um Rückmeldung bei Interesse an der Studienteilnahme gebeten.

Zum anderen wurden in der HNO-Klinik des Klinikums rechts der Isar Plakate ausgehängt und Handzettel ausgelegt, die über Ziele und Inhalt der Studie sowie die wichtigsten Einschlusskriterien informierten und interessierte Personen zur Kontaktaufnahme aufforderten. Auf diese Weise

konnten sowohl Patienten der HNO-Klinik selbst, als auch Patienten anderer Fachbereiche und deren Angehörige für die Studie gewonnen werden.

Wie bei den Kontrollpersonen wurden zudem Klinikmitarbeiter und untersuchte Patienten um die Weitergabe des Studienaufrufs an Verwandte und Bekannte gebeten.

Da die Zugehörigkeit zur Subgruppe der Normalhörenden bzw. Altersschwerhörigen erst im Lauf der Untersuchungen anhand des Audiogramms festgelegt werden konnte, wurde die Über-60-Jährigen fortlaufend mit den Identifikationsnummern P01 bis P67 (P für Patient, da in den meisten Fällen Patienten des Klinikums rechts der Isar) gekennzeichnet, unabhängig davon, welcher Subgruppe der Proband im Nachhinein zugeordnet wurde.

Sieben Personen des Ü60-Kollektivs erfüllten im Laufe der Untersuchungen nicht alle Einschlusskriterien und mussten von der Gesamtauswertung ausgeschlossen werden: P01, P02, P12, P17, P26 und P28 genügten nicht den geforderten Durchschnittshörverlusten der relevanten Audiometerfrequenzen für das Kriterium „normalhörend“ bzw. „schwerhörig“; P02 zeigte zudem ein inkonstantes Antwortverhalten in der Audiometrie, so dass dessen Hörschwelle nur unzuverlässig ermittelt werden konnte (siehe **2.6.1 Tonschwellenaudiogramm**); P41 wies einen wannenförmigen, eventuell otosklerotisch - also mittelohrbedingten - Audiogrammbefund auf.

2.2 Verwendete Messgeräte

Mit Ausnahme des Fragebogens für Hörtests (nach DIN EN ISO 389-9:2009:12) und der Otoskopie wurde die Erfassung der Hörfunktion mit den Messgeräten „*Otobox*“, „*Sentiero Advanced*“ und „*Unity 2*“ durchgeführt.

Bei der *Otobox* handelt es sich um eine an der Experimentellen Audiologie des Klinikums rechts der Isar München entwickelte portable und modular aufgebaute Messplattform. Im Rahmen der durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) und die Bayerische Forschungsförderung (BFS) geförderten Projekte *Entwicklung eines Handgerätes zur automatisierten Hördiagnostik* sowie *Automatisierte Hördiagnostik und Hörgeräteanpassung* entstand ein Gerät, das alle wesentlichen audiometrischen Tests mit einem möglichst hohen Automatisierungsgrad auf einer Plattform vereinte. Zur Realisierung einzelner Komponenten wurde teilweise auf Vorprojekte des Instituts zurückgegriffen (Rosner 2011). Die *Otobox*, die für die Studie am Untersuchungsstuhl befestigt wurde, wurde von einem Desktop-PC aus über eine grafische Benutzeroberfläche (Version 14.06.2012) gesteuert, auf der auch die Darstellung der Messergebnisse erfolgte. Die Kommunikation der *Otobox* mit dem außerhalb der Messkabine platzierten PC erfolgte drahtlos

über eine Bluetooth-Schnittstelle. Über eine zusätzliche PC-Maus und einen zusätzlichen Bildschirm konnten die Tests zudem vom Inneren der Messkabine aus gesteuert werden, bei denen der Untersucher selbst in der Kabine anwesend sein musste (z.B. zur Platzierung der Tympanometriesonde). Die Otobox wurde für die Durchführung der Tympanometrie, für die Erstellung der meisten Tonschwellenaudiogramme und für die Messung der DPOAE verwendet.

Das *Sentiero Advanced*, ein portables Handgerät, wurde vom Hersteller Path Medical GmbH, Germering, freundlicherweise für die Hörstudie zur Verfügung gestellt. Sämtliche Tests werden hierbei mithilfe eines berührungsempfindlichen Bildschirms angewählt und gesteuert, der auch für ältere Probanden problemlos les- und bedienbar ist. Die Messergebnisse werden aus dem Gerätespeicher mittels USB-Kabel in die zugehörige PC-Benutzeroberfläche „Mira“ übertragen, mit deren Hilfe weiterführende Auswertungen erfolgen können, beispielsweise die Platzierung der Marker zur Festlegung der Latenzwerte der Potenzialkomponenten bei der BERA. Mit dem Sentiero Advanced wurden der Hörhandicapfragebogen HHIE-S, ein Teil der Tonschwellenaudiogramme, der SUN-Sprachtest, der LIPP-Unterschiedsschwellentest und die BERA durchgeführt.



Abbildung 2.1: Otobox und Sentiero Advanced

Otobox mit verwendetem Zubehör (links), Sentiero Advanced (rechts, Quelle: PATH medical GmbH (2015a))

Als drittes Messgerät wurde ein *Unity 2* Audiometer von Siemens verwendet. Wie bei der Otobox erfolgten die Steuerung der Messungen und die Ergebnisdarstellung mithilfe der zugehörigen Software über den außerhalb der Messkabine platzierten PC. Die Sprachausgabe geschah innerhalb der Kabine über zwei Canton CD 310-Lautsprecher, die an den Kabinenwänden im 180°-Winkel rechts und links des Probanden auf Ohrhöhe angeordnet waren. Das Unity 2 Audiometer wurde ausschließlich für den Oldenburger Satztest (OLSA) genutzt.

2.3 Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Der Fragebogen für Hörtests im Anhang der Norm DIN EN ISO 389-9 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2009) dient dazu, potentiell hörgeschädigte Probanden bei der Kalibrierung audiometrischer Geräte zu erfassen und auszuschließen. Er besteht aus zwölf Fragen (siehe Anhang 7.6), die in dieser Studie in drei übergeordnete Kategorien zusammengefasst wurden: Krankheitsanamnese (Fragen 2 und 3: Vorerkrankungen und -operationen des Gehörs), exogene Risikofaktoren für Hörschädigung (Fragen 4 bis 10: Einnahme ototoxischer Medikamente, Lärmexposition) und familiäre Vorbelastung (Frage 11: Hörstörung bei Verwandten). Fragen 1 (Personendaten) und 12 (vorangegangene Teilnahme an einem Hörtest) wurden nicht näher in die Auswertung miteinbezogen. Der Fragebogen wurde jedem Studienteilnehmer in Papierform vorgelegt.

Mithilfe der *Krankheitsanamnese* (Fragen 2 und 3) wurden Vorerkrankungen und -operationen des Gehörs erfasst. Folgende wesentliche Erkrankungen und Operationen führten zum Ausschluss des Teilnehmers aus der Studie: akute Ohrinfektionen, floride Otitis media acuta ohne und mit Trommelfellperforation, Tinnitus, Hörsturz mit Hörbeeinträchtigung zum Untersuchungszeitpunkt sowie relevante, u.a. auch durch Operationen bedingte, morphologische Veränderungen des Hörapparates. Nicht als Ausschlusskriterium erachtet wurden vollständig ausgeheilte Vorerkrankungen (z.B. vorangegangene Otitiden mediae acutae ohne Folgeschäden, vorangegangener Hörsturz ohne Residuum im Tonschwellenaudiogramm), ein subjektiv unbeeinträchtigender, kaum wahrnehmbarer Tinnitus zum Untersuchungszeitpunkt und vorangegangene Schwindelerkrankungen ohne bekannte Auswirkungen auf das Hörvermögen wie der Benigne paroxysmale Lagerungsschwindel BPPV (Grehl *et al.* 2013). Beide Fragen wurden allen Studienteilnehmern bereits bei der Terminvereinbarung gestellt, um ungeeignete Probanden frühzeitig ausschließen zu können.

Die Fragen 4 bis 11, zusammengefasst zu den Kategorien *exogene Risikofaktoren* und *familiäre Vorbelastung*, dienten der genaueren Einschätzung des individuellen Risikos einer Hörschädigung und wurden als Informationsgrundlage für die Interpretation der Messergebnisse dokumentiert. Mit Frage 8 (Musikinstrument) wurde allgemein erfasst, ob ein Studienteilnehmer jemals aktiv musiziert hatte. Falls ja, wurde das Instrument unter dem Aspekt der erhöhten Lärmexposition gemäß der Angaben der Norm bewertet. Als unmittelbare Verwandtschaft in Frage 11 wurden Eltern, Geschwister und Kinder betrachtet.

Die Antworten eines Probanden auf die zur Auswertung herangezogenen Fragen 2 bis 11 wurden in Punktzahlen kodiert und zu Scores zusammengefasst. Außer bei Fragen 6, 7, 8 und 9 wurde jede „Ja“-Antwort mit einem Risikopunkt und jede „Nein“-Antwort mit 0 Punkten bewertet. Frage 6 (Gehörschutz während lärmintensiver beruflicher Tätigkeit) wurde nicht mit Punkten bewertet und in den Risikoscore addiert, da es sich hierbei um einen protektiven und nicht um einen Risikofaktor handelt. Bei Fragen 7 (Konzerte) und 9 (Tragbare Wiedergabegeräte) wurden mit steigender Exposition steigende Risikopunkte vergeben: 0 Punkte für „nie“, 1 Punkt für „ein Mal pro Jahr“ bzw. „<2h pro Woche“ und 2 Punkte für eine dieses Maß übersteigende Exposition. Bei Frage 8 (Musikinstrument) wurden die in der Norm genannten lautstärkeintensiven Spielsituationen Rock-Band und Sinfonieorchester mit einem Risikopunkt bewertet, alle anderen Instrumente dagegen mit 0 Punkten. Um relevante Unterschiede im Risikoprofil der verschiedenen Probandenkollektive erkennen zu können, wurden die Risikopunkte in den drei o.g. Fragenkategorien jeweils zu drei Einzelscores addiert. Zudem erfolgte eine Einschätzung des Gesamtrisikos für Gehörschädigung durch Summation aller in den Einzelkategorien vergebenen Punkte zu einem Gesamtscore.

2.4 Hearing Handicap Inventory for the Elderly - Screening Version (HHIE-S)

Der Begriff des Hörhandicaps beschreibt die subjektive Beeinträchtigung des Alltags sowie die emotionalen und sozialen Folgen durch ein verringertes Hörvermögen. Das Handicap wird nicht nur vom Ausprägungsgrad des messbaren Hörverlustes, sondern durch eine Vielzahl an psychosozialen Faktoren, wie Beruf, Lebenssituation oder Gesundheitszustand, bestimmt. Es ist folglich mit den routinemäßig durchgeführten audiometrischen Methoden nicht ohne Weiteres erfassbar (Ventry und Weinstein 1982, Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996).

Um das individuelle Hörerleben und ein möglicherweise vorliegendes Hörhandicap bei den Probanden dieser Studie einschätzen zu können, wurde daher zusätzlich zu den übrigen Messungen der Fragebogen Hearing Handicap Inventory for the Elderly in der Screening-Version (HHIE-S) eingesetzt. Er ist eine Kurzform des 1982 von Ventry und Weinstein entwickelten Fragebogens „Hearing Handicap Inventory for the Elderly“ (HHIE). Dieser besteht aus 25 Items, die eine eventuell vorhandene emotionale und soziale Belastung aufgrund von Hörproblemen erfassen. Das HHIE wurde als spezifisches Instrument für die Befragung einer älteren Bevölkerung konzipiert und validiert. Um gerade ältere Befragte nicht zu überfordern, wird jedes Item mithilfe einer vorgegebenen, bei allen Fragen identischen Dreifachauswahl („Ja“, „Manchmal“ oder „Nein“) beantwortet (Ventry und Weinstein 1982, Weinstein *et al.* 1986). Die hiervon abgeleitete, in dieser

Studie verwendete Screening-Version HHIE-S besteht aus nur 10 Fragen (siehe Anhang 7.7), erzielt jedoch Ergebnisse vergleichbarer interner Konsistenz, Validität und Reliabilität (Ventry und Weinstein 1983, Weinstein 1986, Jupiter und DiStasio 1998). Fünf Items erfassen emotionale (E-Subskala), die verbleibenden fünf soziale und in typischen Situationen auftretende Effekte von Hörproblemen (S-Subskala) (Ventry und Weinstein 1983, Weinstein 1986, Sangster *et al.* 1991). Sowohl in der Lang- als auch in der Screening-Version wird jede „Ja“-Antwort mit 4 Punkten, jede „Manchmal“-Antwort mit 2 Punkten und jede „Nein“-Antwort mit 0 Punkten bewertet; die Gesamtpunktzahl ergibt sich durch Summation (Ventry und Weinstein 1982, Ventry und Weinstein 1983, Weinstein 1986). Bei den 10 Items des HHIE-S kann somit ein Score zwischen 0 und 40 Punkten in Zweierschritten erreicht werden, der die Zuordnung zu verschiedenen Handicap-Schweregraden (s.u.) erlaubt.

Für die vorliegende Studie wurde das HHIE-S in der deutschen Fassung verwendet. Hierzu wurden die Items inklusive Antwortauswahl auf dem Sentiero Advanced nacheinander auf dem Bildschirm dargestellt; nach Anwahl der entsprechenden Antwort durch den Probanden erscheint die jeweils folgende Frage. Nach standardisierter Instruktion wählte sich der Proband selbstständig durch die Items; weitere Erläuterungen wurden nur bei Bedarf gegeben, um möglichst einheitliche Testvoraussetzungen bei allen Probanden zu gewährleisten. Für die vorliegende Studie wurde der Gesamtscore des HHIE-S herangezogen; eine separate Analyse der E- und S-Subskalen erfolgte nicht. Gemäß aktueller Leitlinien der American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) wurde ein Gesamtscore von 0 bis 8 Punkten als kein Handicap, von 10 bis 24 Punkten als leichtes/moderates Handicap und von 26 bis 40 Punkten als schweres Handicap gewertet (American Speech-Language-Hearing-Association 1997).

2.5 Otoskopie

Neben der Inspektion des äußeren Ohres wurde bei jedem Probanden zu Beginn der Untersuchungen eine beidseitige Otoskopie mit dem Handotoskop KaWe PICCOLIGHT C durchgeführt. Eventuell vorhandenes Cerumen wurde durch Spülung oder Absaugen entfernt. Nur Probanden mit unauffälligem Gehörgangs- und Trommelfellbefund (spiegelndes, nicht retrahiertes/vorgewölbtes, perlmuttfarbenes Trommelfell (Füessl *et al.* 2014)) wurden in die Studie eingeschlossen. Pathologien des Gehörgangs wie lumenverlegende Exostosen und relevante Trommelfellpathologien - wie ein vorgewölbtes bzw. retrahiertes Trommelfell, starke Vernarbung oder Trommelfelldefekte - führten zum Ausschluss des Teilnehmers aus der Studie.

2.6 Subjektive Messmethoden

2.6.1 Tonschwellenaudiogramm (PTA)

Als zentrale Untersuchung zur Einschätzung der Gesamthörleistung wurde bei jedem Studienteilnehmer die Reintonaudiometrie (Pure Tone Audiometry, PTA) bei den Frequenzen 250, 500, 1000, 2000, 4000, 6000 und 8000Hz durchgeführt. Hierzu wurde das Audiometermodul der Otobox oder, sofern diese gerade nicht zur Verfügung stand, das entsprechende Modul des Sentiero Advanced jeweils in Kombination mit einem Handdruckknopf verwendet. Zur Signalausgabe diente bei der Otobox der Kopfhörer DT 48 von Beyerdynamic, beim Sentiero ein HDA 280-Kopfhörer von Sennheiser.

Beide Geräte erfüllen die Vorgaben der Norm DIN EN 60645-1 für diagnostische Audiometer, verwenden das Schwellenermittlungsverfahren für automatisch registrierende Audiometer nach DIN EN ISO 8253-1 Abschnitt 6.3 zur Bestimmung der Hörschwelle (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2002, DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011, PATH medical GmbH 2015b) und liefern somit gleichwertige Ergebnisse. Bei diesem Alternativverfahren zur manuellen Audiometrie wird dem Probanden ein gepulster Sinuston dargeboten. Solange der Handdruckknopf nicht betätigt wird, regelt das Audiometer die Schallintensität allmählich herauf; während der Betätigung des Druckknopfes wird die Schallintensität dagegen allmählich reduziert. Der Proband wird angewiesen, den Druckknopf sofort zu betätigen, sobald er den Sinuston hören kann - die Hörschwelle also leicht überschritten wird - und den Knopf erst dann loszulassen, wenn der Ton nicht mehr hörbar ist - die Hörschwelle also leicht unterschritten wird. Auf diese Weise pendelt die Signallautstärke ständig um die tatsächliche Hörschwelle des Probanden herum. Aus den Dezibelwerten der Umkehrpunkte der Lautstärkeregulation (festgelegt durch Drücken bzw. Loslassen des Handdruckknopfes) berechnet das Audiometer gemäß der Vorgaben der DIN EN ISO 8253-1-Norm die individuelle Hörschwelle bei der jeweiligen Testfrequenz. Zugleich wird das Antwortverhalten des Probanden vom Audiometer anhand der Konstanz und des Abstandes der Umkehrpunkte auf Plausibilität geprüft; potentiell unzuverlässige Schwellenwerte werden automatisch sofort aussortiert und deren Bestimmung wiederholt (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011).

Jeder Proband absolvierte nach Instruktion - wie in der Norm DIN EN ISO 8253-1 gefordert - zunächst einen Probelauf über einige der Testfrequenzen (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2011). Nach dem Probelauf erfolgte die für die Klassifikation des Hörvermögens relevante Messung stets bei allen Frequenzen des rechten und anschließend des linken Ohres. Aufgrund der

erheblichen Bedeutung des Audiogramms für die korrekte Zuordnung in die Studiengruppen wurden Probanden mit unzuverlässigem Antwortverhalten von der Studienteilnahme ausgeschlossen (zutreffend bei ausgeschlossenen Proband P02). Als Kriterium hierfür wurde die mindestens dreimalige Wiederholung der Schwellenwertbestimmung bei mindestens einer Frequenz durch den oben beschriebenen internen Kontrollmechanismus des Gerätes festgelegt.

Anhand des Tonschwellenaudiogramms wurde im Nachhinein die Zuordnung des Probanden in die Hörleistungskategorien „normalhörend“ und „schwerhörig“ vorgenommen und die Erfüllung des Symmetriekriteriums von rechtem und linkem Ohr überprüft (siehe 2.1 und 3.1.2). Zugleich erfolgte eine Beurteilung des Hörschwellenverlaufs. Für Normalhörende wurde ein pantonal flacher Hörschwellenverlauf mit nur geringfügigem Hochtonabfall gefordert. Altersschwerhörige mussten den typischen Hochtonabfall (>2000Hz) mit weitgehend intaktem Hörvermögen bei tiefen und mittleren Frequenzen aufweisen (Martini 1996). Probanden mit anderen Audiogrammbefunden, insbesondere medio- und apicocochleär betonter Schwerhörigkeit oder spezifischen Audiogrammverläufen (z.B. Carhart-Senke, c⁵-Senke), wurden nicht in die Studie eingeschlossen.

Die Tonschwellenverläufe wurden auf 1dB genau ausgewertet. Konnte aufgrund der Lautstärkebegrenzung des Audiometers keine Tonschwelle ermittelt werden, weil die tatsächliche Hörschwelle des Probanden darüber lag, wurde die entsprechende Messfrequenz des Probanden in der Auswertung nicht berücksichtigt.

2.6.2 Sprachverständnistests

In der vorliegenden Studie wurden Sprachverständnistests eingesetzt, die auf die Einschätzung des Hörvermögens im Störgeräusch abzielen: der Oldenburger Satztest (OLSA) und damit ein ausführliches, im klinischen Einsatz etabliertes Testverfahren, und der Speech Understanding in Noise (SUN)-Test, ein erst vor kurzem entwickeltes neues Screeningverfahren auf Basis von Logatomen.

2.6.2.1 Oldenburger Satztest (OLSA)

Der Oldenburger Satztest wurde von Wagener und Mitarbeiter entwickelt (Wagener *et al.* 1999a, Wagener *et al.* 1999b, Wagener *et al.* 1999c). Er testet das Sprachverständnis im Störgeräusch anhand von Fünfworthätzen, die stets denselben Aufbau aufweisen: Name - Verb - Zahlwort - Adjektiv - Objekt (z.B. Thomas kauft sieben rote Steine). Die Sätze werden in zufälliger Weise aus einem Basiswortschatz von je 10 Worten pro Wortart gebildet, der dieselbe durchschnittliche Phonemverteilung aufweist wie die deutsche Sprache. Aufgrund der Zufallskombination sind die

Sätze nicht immer sinnvoll, was dem Einprägen bei Mehrfachtestung vorbeugt und Rückschlüsse vom Satzinhalt auf die Einzelwörter verhindert. Die Sätze werden im Störgeräusch präsentiert, wobei der Signal-Störabstand (Signal-to-Noise Ratio, SNR), also die Differenz zwischen Sprachschall- und Störschallpegel, in Abhängigkeit von der Zahl der verstandenen Wörter im vorhergehenden Satz eingestellt wird. Eine Standardtestliste enthält 30 Sätze. Aus der SNR der letzten 20 Sätze wird die Sprachverständlichkeitsschwelle L_{50} (SVS L_{50}) ermittelt, ein rechnerischer SNR-Wert, bei dem 50% der Wörter verstanden werden (Norm: -7,1dB, d.h. 50% Wortverständlichkeit, wenn die Sprache um 7,1dB leiser ist als das Störgeräusch; siehe Wagener *et al.* (1999b), Wagener *et al.* (1999c), Lehnhardt und Laszig (2009), Mrowinski und Scholz (2011)).

In der vorliegenden Studie wurde das OLSA-Softwaremodul der HörTech gGmbH für das Unity 2-Audiometer verwendet. Da das korrekte Ergebnis des OLSA erst nach Training erzielt wird, wurde zunächst eine Übungsliste von 30 Sätzen abgespielt, bevor der eigentliche Durchgang mit ebenfalls 30 Sätzen erfolgte (Wagener *et al.* 1999b, HörTech gGmbH 2000). Für die Antworteingabe wurde die offene Variante gewählt, d.h. der Proband wiederholte das Gesagte frei (ohne vorgegebene Antwortmöglichkeiten) nach jedem Satz, der Untersucher kennzeichnete dann die korrekt verstandenen Wörter am Bedienbildschirm. Gemessen wurde wie in der Originalversion bei einem festen Störschallpegel von 65dB SPL (Wagener *et al.* 1999b) mit automatisch adaptiertem Sprachsignalpegel. Sprache und Störgeräusch wurden über die zum Audiometer gehörenden Freifeldlautsprecher (siehe 2.2) ausgegeben.

2.6.2.2 Speech Understanding in Noise (SUN)-Test

Der Speech Understanding in Noise (SUN)-Test (Paglialonga *et al.* 2013, Paglialonga *et al.* 2014) ist ein relativ neu entwickelter, speziell auf zeiteffizientes Screening ausgelegter, in mehreren Sprachen verfügbarer Sprachtest. Wie der OLSA prüft der SUN-Test das Sprachverständnis im Hintergrundgeräusch, statt ganzer Sätze und echten Wörtern wird jedoch eine Serie von unterschiedlichen Logatomen wiedergegeben. Es handelt sich hierbei um artifizielle Silben, die stets aus der Kombination Vokal-Konsonant-Vokal (VCV) bestehen. Zum Einsatz kommen die für die jeweilige Sprachversion relevanten Konsonanten; der Vokal ist durchweg „a“ (z.B. asa, aga, afa etc.). Alle VCVs sind von Hintergrundrauschen überlagert. Während der Sprachschallpegel konstant bleibt, wird das Hintergrundgeräusch im Verlauf des Tests immer lauter; folglich sinkt die SNR und das Verstehen des Logatoms wird immer schwieriger. Die Rückmeldung erfolgt über ein Three-Alternative-Forced-Choice (3AFC)-Konzept. Das bedeutet, dass jeweils nach Vorspielen des Logatoms aus einer Dreifachauswahl von VCVs das korrekte (d.h. tatsächlich vorgespielte) auszuwählen ist. Hat der Proband dieses nicht verstanden, ist trotzdem eine Wahl zu treffen; eine

Wiederholung der Wiedergabe ist nicht möglich. Die Gesamtdauer des Tests für ein Ohr beträgt etwa eine Minute. Das Testergebnis liegt in Form eines Scores (als Anzahl der korrekt gewählten Logatome im Vergleich zur Gesamtzahl) vor (Paglialonga *et al.* 2011b, Paglialonga *et al.* 2013, Paglialonga *et al.* 2014). Die Logatome werden bei jedem Testdurchlauf in derselben Reihenfolge, beginnend mit einigen nicht gewerteten Übungslogatomen, wiedergegeben.

In der vorliegenden Studie wurde die deutsche Version des SUN-Tests verwendet. Die Sprachausgabe erfolgte mit dem Sentiero Advanced über den zugehörigen Sennheiser HDA 280-Kopfhörer (PATH medical GmbH 2015b). Das 3AFC-Konzept wurde in Form einer Dreifachauswahl auf dem Touchscreen des Messgerätes umgesetzt. Nach einer Übungsphase mit fünf Logatomen wurden dem Probanden 15 Logatome mit einer von +8dB bis -6dB HL sinkenden SNR vorgespielt und anschließend der zugehörige Score angezeigt.

Als fixierter Sprachschallpegel wurde wie im italienischen Original 60dB HL gewählt (Paglialonga *et al.* 2013). Nach Instruktion des Probanden unter Betonung des 3AFC-Konzeptes wurde die Messung randomisiert mit dem rechten bzw. linken Ohr begonnen. Die Messung am anderen Ohr folgte beim zweiten Durchlauf.

Da für eine kategoriale Ergebnisbewertung (unauffällig versus pathologisch) der deutschen SUN-Version - im Gegensatz zur italienischen (Paglialonga *et al.* 2011a) - keine veröffentlichten Score-Grenzwerte vorlagen, wurde für die Auswertung direkt der Score des Probanden herangezogen.

2.6.3 Zentrale Tondiskrimination: Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik (LIPP)

Die zentrale Diskriminationsfähigkeit für Tonunterschiede wurde mit einer Version des Leipziger Inventars für Patienten-Psychoakustik (LIPP; Bungert-Kahl *et al.* (2004)) untersucht, die im Rahmen eines Forschungsprojektes an der Experimentellen Audiologie der HNO-Klinik des Klinikums rechts der Isar für das Sentiero Advanced entwickelt worden war.

Der LIPP-Test erfasst Tondiskriminationsschwellen für verschiedene Parameter (Frequenz, Pegel, Tondauer) und unterschiedliche Präsentationsarten (u.a. interaural, dichotisch, siehe **1.1.2.2.3** und **Abbildung 1.5**) mithilfe eines adaptiven Three-Interval-Forced-Choice (3IFC)-Paradigmas. Dabei muss der Proband in einer Dreierserie von Tönen (Triplett), bestehend aus zwei identischen Referenzsignalen und einem abweichenden Testsignal, das abweichende Signal erkennen. Abhängig vom zu untersuchenden Parameter unterscheidet sich dieses von den Referenzsignalen um den Betrag Δ in Frequenz (Δf ; höher), Pegel (ΔL [engl. Level]; lauter) oder Tondauer (Δt [engl.

time; kürzer). Kann der Proband das Testsignal nicht erkennen, ist trotzdem ein Ton des Triplets durch Raten zu wählen. Jede Untersuchung besteht aus einer Serie von 3IFC-Tests (Trials), wobei die Position des Testsignals im Signaltuplett in jedem Trial randomisiert ist. Durch adaptive Veränderung des Tonunterschieds $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ im Laufe der Trialserie nach einem festgelegten Algorithmus wird die Diskriminationsschwelle bestimmt, bei der der Proband das abweichende Signal gerade noch erkennen kann (just noticeable difference, JND). Grundidee bei dieser Testweise ist, dass der Proband unabhängig vom getesteten Parameter und unabhängig von der Präsentationsart ausschließlich entscheiden muss, welches das abweichende Testsignal ist, nicht jedoch, in welcher Hinsicht sich dieses unterscheidet (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009).

Die in dieser Studie verwendete LIPP-Version für das Sentiero Advanced setzt das 3IFC-Prinzip der Trials in Form eines Memory-Spiels um. Das Signaltuplett wird hierbei durch eine Dreierreihe von Memory-Spielkarten auf dem Bildschirm des Gerätes repräsentiert. Die Rückmeldung über das abweichende Testsignal erfolgt durch „Aufdecken“ des Spielkartenpaares, welches die (identischen) Referenzsignale symbolisiert. Bei jedem Trial kann das Signaltuplett vor Auswahl der Spielkarten beliebig oft abgespielt werden.

Folgender adaptiver Algorithmus variiert bei dieser LIPP-Version den Tonunterschied $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ zwischen Referenzsignalen und Testsignal im Verlauf der Trialserie (siehe **Abbildung 2.2**):

Ausgehend von einer im Normalfall deutlich überschwelligen und damit leicht erkennbaren Startdifferenz wird der Tonunterschied $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ zunächst dreimal nach jeder einzelnen korrekten Antwort verringert (*One-down-Prinzip*). Hierdurch erfolgt eine zügigere Annäherung von der überschwelligen Startdifferenz an die tatsächliche Diskriminationsschwelle des Probanden. Ab dem vierten Trial wird der Tonunterschied $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ erst dann verringert, wenn das Testsignal bei identischem $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ zweimal richtig erkannt wurde (*Two-down-Prinzip*). Dadurch wird die Wahrscheinlichkeit, dass eine Tondifferenzverringering durch Rateglück erreicht wird (pro Trial 33%), auf $(33\%)^2 = 11\%$ gesenkt und damit die Ergebnispräzision erhöht. Während des gesamten Testablaufs reicht eine fehlerhafte Antwort aus, um eine Vergrößerung des Tonunterschiedes $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ zu bewirken (*One-up-Prinzip*).

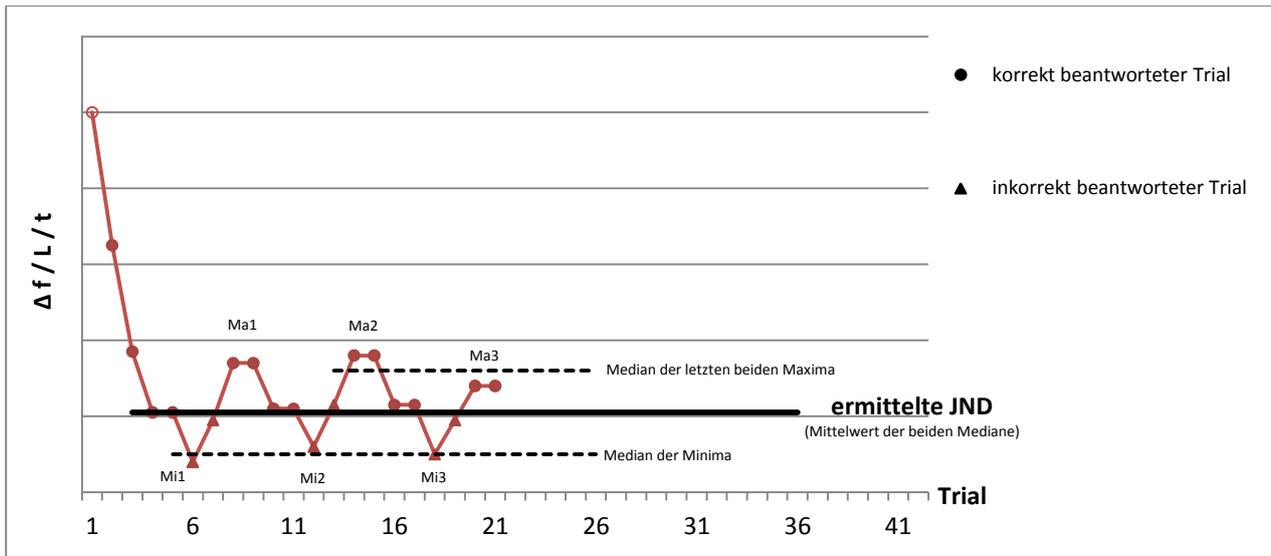


Abbildung 2.2: Adaptiver Algorithmus der verwendeten LIPP-Version zur Bestimmung der Diskriminationsschwellen

Erläuterungen siehe Text. JND: just noticeable difference. $\Delta f / \Delta L / \Delta t$: Frequenz-/ Pegel-/ Tondauerunterschied zwischen Test- und Referenzsignal. Mi: Minimum/ unterer Umkehrpunkt; Ma: Maximum/ oberer Umkehrpunkt. Kreis: Startdifferenz $\Delta f=0,05\text{oct} / \Delta L=10\text{dB} / \Delta t=100\text{ms}$ des ersten Trials; gefüllte Symbole: Sukzessivdifferenzen $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ ab dem zweiten Trial. Nach Erreichen von 6 Umkehrpunkten oder spätestens nach 42 Trials wird der Test beendet.

Die erste Falschantwort nach einer Serie von richtig gelösten Trials markiert im Testablauf jeweils die unteren Umkehrpunkte (Minima); die sich anschließende Phase der sukzessiven Unterschiedsvergrößerung wird gemäß dem Two-down-Prinzip jeweils erst nach korrekter Beantwortung von zwei Trials beendet (Plateau der oberen Umkehrpunkte (Maxima)); hieran schließt sich jeweils wieder eine Phase der Verkleinerung des Tonunterschieds $\Delta f / L / t$ nach dem Two-Down-Prinzip bis zur nächsten Falschantwort an. Insgesamt pendelt auf diese Weise der Tonunterschied $\Delta f / \Delta L / \Delta t$ wellenförmig um die tatsächliche Diskriminationsschwelle herum, bis 6 Umkehrpunkte, also 3 Minima und 3 Maxima, erreicht sind. Die Berechnung der JND erfolgt durch Mittelwertbildung aus dem Median der beiden letzten Maxima und dem Median der Minima (siehe **Abbildung 2.2**, waagrechte Linien).

Die *Startdifferenzen* zwischen Referenzsignalen und Testsignal im ersten Trial wurden mit $\Delta f=0,05\text{Oktaven} / \Delta L=10\text{dB} / \Delta t=100\text{ms}$ deutlich überschwellig gewählt. Die in den folgenden Trials verwendeten *Sukzessivdifferenzen* werden bei korrekten Eingaben sukzessive weiter verkleinert, bei fehlerhaften Eingaben sukzessive vergrößert. Die genaue Schrittgröße wird durch ein Zufallsverfahren variiert. Hierdurch ist es möglich, dass die Diskriminationsschwelle im Rahmen der verfügbaren Trialzahl theoretisch jeden beliebigen Wert annehmen kann.

Es wurde eine algorithmusinterne Plausibilitätskontrolle integriert, um die Zuverlässigkeit der ermittelten Schwellen einschätzen zu können. Im Idealfall pendeln die Tondifferenzen $\Delta f / \Delta L / \Delta t$

wellenförmig um die tatsächliche JND herum. Minima und Maxima bleiben jeweils auf etwa konstantem Niveau unter- bzw. oberhalb der JND (wie in **Abbildung 2.2**). Aufgrund des Two-down- und One-up-Prinzips liegt der Anteil der richtig beantworteten Trials an der Gesamttrialzahl in diesem Fall bei etwa 67%, wenn vereinfachend die Initialphase von der Startdifferenz bis zur Schwellenannäherung vernachlässigt wird. Steigen Minima und Maxima im Verlauf der Trialserie tendenziell an (z.B. aufgrund abnehmender Konzentration des Probanden während des Tests), so nimmt aufgrund der höheren Zahl der Falschantworten der Anteil richtig beantworteter Trials an der Gesamttrialzahl ab. Er sinkt also unter 67%. Sinken im Gegensatz dazu Minima und Maxima im Verlauf der Trialserie tendenziell (z.B. aufgrund eines Lerneffektes), so steigt der Anteil richtiger Trials auf über 67%. Abweichungen des Scores von 67% deuten folglich auf eine potentiell unzuverlässige Schwellenermittlung hin. Als Grenzwerte für Unzuverlässigkeit wurden mithilfe einer Computersimulation 62% bzw. 82% bestimmt. Der obere Wert liegt weiter vom idealen 67%-Wert entfernt, da in der Realität aufgrund der initialen Annäherungsphase an die JND der tatsächliche Anteil richtig beantworteter Trials höher als 67% ist. Alle Messungen mit einem Anteil richtiger Antworten jenseits dieses Grenzwertintervalls wurden als unzuverlässig aussortiert. Zur Vermeidung von Trainingseffekten fand eine Wiederholung nicht statt.

Die Diskriminationsschwellen für die Parameter Frequenz (Testmodus Frequenzdiskrimination (*FD*)), Pegel (Testmodus Pegeldiskrimination (*PD*)) und Tondauer (Testmodus Tondauerdiskrimination (*DD*)) wurden jeweils für binaurale, interaurale und dichotische Präsentationsart ermittelt; bei den beiden letzteren getrennt für rechtes und linkes Ohr (die Seitenbezeichnung bezieht sich auf das Ohr, dem das Testsignal dargeboten wird). Die Reihenfolge der getesteten Parameter innerhalb einer Präsentationsart und die Reihenfolge der Präsentationsarten interaural und dichotisch wurden in der LIPP-Testbatterie von Proband zu Proband randomisiert, um eventuell auftretende Konzentrations- und Lerneffekte über das Gesamtkollektiv hinweg auszugleichen. Es wurde stets mit der binauralen Präsentationsart begonnen, um den Probanden mit der am wenigsten komplexen Darbietungsart an den Testablauf zu gewöhnen; diese Trainingsdarbietungsart wurde nicht zur Auswertung herangezogen. Die Signalausgabe erfolgte bei einem Schallpegel von 40dB SL (Sensation Level, d.h. 40dB oberhalb der 1000Hz-Hörschwelle des Probanden) über den Sennheiser HDA 280-Kopfhörer des Sentiero Advanced. Damit ist eine ausreichende Lautheit des Signals bei gleichzeitiger Vermeidung intrakranieller Schallüberleitung zum anderen Ohr gewährleistet. Zudem werden alle Probanden unabhängig von ihrem peripheren Hörvermögen bei gleicher Lautheit des Signals getestet. Eine Zusammenfassung der Stimulusparameter für Test-, Referenz- und Rauschsignal liefert **Tabelle 2.2**.

Tabelle 2.2: Stimulusparameter für Referenz-, Test- und Rauschsignal

Δf / ΔL / Δt : Betrag Δ des Frequenz-/ Pegel-/ Tondauerunterschieds zwischen Referenz- und Testsignal. FD/ PD/ DD: Testmodus Frequenz-/ Pegel-/ Tondauerdiskrimination

<u>Signal</u>	<u>Signaldauer inkl. Rampen (ms)</u>	<u>Rampen (Anschwellen bzw. Abschwellen; ms)</u>	<u>Pause zwischen den Signalen (ms)</u>	<u>Signalfrequenz (Hz)</u>	<u>Signalpegel (dB SL)</u>
Referenzsignal	400	60, cosinusförmig	600	1000	40
Testsignal	400 (bei DD um Δt kürzer)	60, cosinusförmig	600	1000 (bei FD um Δf größer)	40 (bei PD um ΔL lauter)
Rauschsignal	400	60, cosinusförmig	600	Breitbandrauschen bis 8kHz	40

2.7 Objektive Messmethoden

2.7.1 Tympanometrie

Mit der Tympanometrie wurden relevante Erkrankungen des Mittelohrs ausgeschlossen. Für die Messung wurde das Tympanometriemodul der Otobox (Rosner 2011) und die dazugehörige Ohrsonde (ein Prototyp der Firma Path Medical GmbH, Germering) in Verbindung mit OTOflex-Silikonohroliven der Firma GN Otometrics verwendet. Das System erfüllt die für die Untersuchung in dieser Studie relevanten Vorgaben der Norm DIN EN 60645-5 für Tympanometer der Klasse 1 (diagnostische/ klinische Tympanometer). Für weiterführende Untersuchungen gelten jeweils mindestens die Vorgaben für Tympanometer der Klasse 2 (Screening-Tympanometer) (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2005, Schirkonyer 2007). Die Messung der Mittelohrimpedanzen erfolgte mit einem 226Hz-Sondenton. Die Compliance des Mittelohres (in ml) wurde bei Unter- bzw. Überdruck im äußeren Gehörgang in einem Druckbereich von -300daPa bis +200daPa bei einer Druckänderung von 200daPa/s aufgezeichnet und grafisch in einem Druck-Compliance-Diagramm dargestellt. Bei Bedarf wurde die Untersuchung unter Verwendung verschiedener Ohroliven und Sondenpositionen solange wiederholt, bis ein sicherer luftdichter Verschluss des Gehörgangs gewährleistet war.

Nur Probanden mit Normalbefund im Tympanogramm, also einer glockenförmigen symmetrischen Compliancekurve mit Maximum bei etwa 0daPa, durften an der Studie teilnehmen. Davon abweichende Befunde, beispielsweise überhöhte oder abgeflachte Kurvenverläufe oder eine deutliche Abweichung des Compliancemaximums von 0daPa, führten zum Ausschluss aus der

Hörstudie. Moderate Unterdrücke im Mittelohr bis -100daPa , insbesondere solche, die sich durch Schlucken ausgleichen ließen, wurden als nicht pathologisch toleriert (Lehnhardt und Laszig 2009).

2.7.2 Distorsionsprodukte otoakustischer Emissionen (DPOAE)

Die DPOAE-Messung (Grundlagen siehe 1.1.1.2.2) wurde mit dem COAST (Combined Otoacoustic Emissions and Auditory Steady State Thresholds)-Modul (Rosner 2011) der Otobox bei verschiedenen Primärtonfrequenzen durchgeführt. Der COAST-Algorithmus erfasst das kubische Distorsionsprodukt $2f_1-f_2$ als Repräsentant der Funktion der äußeren Haarzellen am Kochleaort der Frequenz f_2 . Bei einer vorgewählten Primärtonfrequenz f_2 erfolgt die Stimulation durch die zwei Primärtöne stets im Frequenzverhältnis $f_2:f_1=1,2$; die Pegel der Primärtöne werden gemäß der Pegelschere $L_1=0,4L_2+39\text{dB}$ (Kummer *et al.* 1998, Kummer *et al.* 2000) eingestellt. Um eine DP-Wachstumsfunktion für die jeweilige Frequenz f_2 erstellen zu können, wird der Primärtonpegel L_2 nach einem festen Schema verändert: Wurde eine valide DPOAE-Antwort erfasst, so wird L_2 um 10dB SPL reduziert, ansonsten um 5dB SPL erhöht; anschließend wird beim adaptierten Stimuluspegel L_2 erneut eine valide DPOAE-Antwort gesucht. Auf diese Weise wird eine Serie von Messpunkten für die DPOAE-Wachstumsfunktion bei der Frequenz f_2 erfasst. Die Validität eines Messpunktes wird mithilfe der Phasenkohärenz der OAE eingeschätzt. Die maximal verfügbare Messzeit je Messpunkt (in dieser Studie 10s) wird durch Voreinstellung limitiert. Zur Störgeräuschunterdrückung und SNR-Erhöhung kommt ein Mittelungsverfahren zum Einsatz, das DPOAE-Messabschnitte mit hohem Störgeräusch (z.B. durch Atmung oder Schlucken) vor Auswertung eliminiert (Rosner 2011).

Die objektive Hörschwellenschätzung anhand der DPOAE erfolgt beim COAST-Algorithmus mittels eines mehrstufigen Verfahrens (Rosner 2011): (1) Danach wird in einem ersten Schritt die DPOAE-Schwelle für die jeweilige Frequenz f_2 anhand der DP-Wachstumsfunktion gemäß dem in 1.1.1.2.2 beschriebenen Prozedere geschätzt. Das Extrapolationsverfahren zur DPOAE-Schwellenschätzung kommt bei Erfüllung festgesetzter Kriterien zum Einsatz (mind. 3 valide DPOAE-Messpunkte, Steigung der Geraden $s>0,4\mu\text{Pa/dB}$, geschätzte DPOAE-Schwelle $> -10\text{dB}$, $r^2>0,75$ (wobei r der Korrelationskoeffizient zwischen Schalldruck p der DPOAE und dem Primärtonpegel L_2 ist, r^2 also die Stärke des linearen Zusammenhangs der beiden Messgrößen beschreibt); zu Details dieser Kriterien siehe auch Boege und Janssen (2002)). Sind die Kriterien nicht erfüllt, wird die DPOAE-Schwelle mit dem kleinsten Primärtonpegel L_2 gleichgesetzt, bei dem eine valide DPOAE-Antwort nachweisbar ist. (2) In einem zweiten Schritt werden die physikalisch vorliegenden DPOAE-Schwellen der Einheit dB SPL in subjektive Hörschwellen der Einheit dB HL transformiert. Hierzu werden empirisch ermittelte Korrekturfaktoren verwendet

(siehe **Tabelle 2.3**). (3) In einem dritten Schritt wird der Hörschwellenverlauf nachträglich geglättet, wobei stark ansteigende und abfallende Bereiche der Schwelle von der Glättung ausgenommen werden.

Tabelle 2.3: Empirische Korrekturfaktoren zur Transformation der DPOAE-Schwellen (in dB SPL) in subjektive Hörschwellen (in dB HL) (Quelle: Rosner (2011), modifiziert)

Frequenz f_2 (kHz)	<u>1,5</u>	<u>2</u>	<u>3</u>	<u>4</u>	<u>6</u>	<u>8</u>
Korrekturfaktor (dB)	-8	-10	-8	-10	-14	-16

In dieser Studie wurden die DPOAE bei den Primärtonfrequenzen $f_2 = 1,5 / 2 / 3 / 4 / 6 / 8$ kHz für beide Ohren simultan erfasst. Frequenzen unter 1,5 kHz wurden ausgeschlossen, da dort aufgrund des hohen Störgeräuschpegels durch Blutfluss und Atmung sowie messtechnischer Limitierungen nur ungenaue Messungen möglich sind (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009). Die Schallreizung und DPOAE-Erfassung erfolgte über Ohrsonden ER-10C der Firma Etymotic Research Inc., wobei jeder Messserie eine „In-The-Ear-Kalibrierung“ der Sonde zur Kompensation stehender Wellen im Gehörgang vorausging. Der Startpegel L_2 war jeweils 60 dB SPL. Da bei hohen Reizpegeln ab 70 dB SPL technische Verzerrungen der Lautsprecher auftreten können und dadurch die Messung verfälschen können (Janssen und Müller 2008), wurde der maximale L_2 -Pegel auf 65 dB SPL begrenzt. Zur Minimierung von Störgeräuschen fanden die Messungen in einer schallisolierten Kabine statt. Der Proband, der entspannt auf einer Liege positioniert wurde, wurde aufgefordert, sich möglichst ruhig zu verhalten und nicht zu sprechen. Da die Validität der Ergebnisse einer DPOAE-Messung stark vom korrekten Sondensitz abhängt (Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011), wurde die Messung bei deutlichen Abweichungen zwischen objektiver und subjektiver Tonschwelle nach Neupositionierung der Sonde wiederholt; die Ergebnisse dieser Zweitmessung wurden allerdings nur als zusätzliche Datengrundlage für weiterführende Analysen erhoben und flossen nicht in die primäre Auswertung ein.

Die DPOAE wurden auf zwei Arten ausgewertet:

- (1) Einerseits wurde die objektive DPOAE-Hörschwellenschätzung in dB HL (aus Schritt 3 des COAST-Algorithmus; s.o.) mit der subjektiven Hörschwelle der Tonaudiometrie korreliert (siehe **3.3.4**), um das DPOAE-Schwellenschätzverfahren auf Genauigkeit und Übereinstimmung mit der subjektiven Tonschwelle zu prüfen. Dies geschah in einem breiten Frequenzbereich von 2 bis 8 kHz.
- (2) Für allgemeingültige Aussagen über Veränderungen der Funktion der äußeren Haarzellen mit zunehmendem Alter andererseits wurde die DPOAE-Schwelle in dB SPL (aus Schritt 1 des

COAST-Algorithmus) verwendet (siehe **3.2.3.1**). Hierdurch wurde eine potentielle Beeinflussung der Messdaten durch nachfolgende weitere Rechenschritte (Schritte 2 und 3 des COAST-Algorithmus) minimiert. Zudem wurden hier die Frequenzen 6 und 8kHz nicht herangezogen, da im oberen Frequenzbereich ab 4kHz eventuell akustische Resonanzen im Gehörgang auftreten und die Genauigkeit der Messresultate beeinträchtigen können (Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011). Durch die direkte Verwendung der DPOAE-Schwelle in einem eingeschränkten Frequenzbereich wurde insgesamt angestrebt, eine höchstmögliche Zuverlässigkeit der Messergebnisse und damit auch der Aussagen über die äußere Haarzellfunktion zu gewährleisten.

2.7.3 Hirnstammaudiometrie (Brainstem evoked Response Audiometry, BERA)

Zur Prüfung der Funktion des Hörnervs und des Hirnstammes wurde bei jedem Studienteilnehmer eine Hirnstammaudiometrie (BERA; Grundlagen siehe **1.1.2.2.1**) mit dem BERA-Modul des Sentiero Advanced durchgeführt. Da für die Berechnung der entsprechenden Interpeaklatenzen eine konstante und sichere Ausprägung der oft schwer erfassbaren Welle I essentiell ist, wurden gemäß Vorarbeiten von Janssen und Schirkonyer (2012) folgende Maßnahmen getroffen, die die Chance auf eine hochamplitudige Welle I maximieren: (1) Zur Senkung der Elektrodenimpedanz wurde die Haut des Probanden vor Positionierung der Ableitelektroden mit Desinfektionsmittel entfettet; die verwendeten Einmalelektroden (Covidien Kendall ECG Electrodes 57x34mm H92SG) wurden mit zusätzlichem Elektrodengel versehen. (2) Die Ableitung erfolgte von Vertex (wiederverwendbare Standard-Haarreifelektrode) und ipsilateralem Mastoid (Einmalelektrode, s.o.); die Masseelektrode (ebenfalls Einmalelektrode) befand sich auf der Stirn. (3) Der Klickreiz wurde mit einer niedrigen Reizrate von 20Hz bei einem hohen Reizpegel von 70 bzw. 80dB, beginnend mit der Druckflanke des Klicks, appliziert; (4) als akustischer Wandler kam der zum Sentiero Advanced gehörende Einsteckhörer (GN otoInsert) zum Einsatz, der die elektrische Reizeinstreuung auf die Elektroden minimiert.

Die Messung fand zur Vermeidung externer Störeinflüsse in einer schall- und elektromagnetisch geschirmten Untersuchungskabine statt. Um myogene Artefakte aus dem Kopf-Hals-Bereich zu minimieren, wurde der Proband in entspannter Lage positioniert und aufgefordert, sich während der Messung ruhig zu verhalten und ggf. zu „dösen“; Kopf und Nacken wurden bei Bedarf unterstützt. Für jede Messung wurden 4000 Signalabschnitte erfasst und anschließend eine Mittelung durchgeführt. Zur Verbesserung der SNR wurde eine Jitterfunktion eingesetzt, wobei durch geringe Zufallsvariation der Reizrate elektrische Interferenzen und eine Adaptation des Hörsystems verringert werden.

Rechtes und linkes Ohr wurden jeweils zweimal bei 80dB und einmal bei 70dB Stimuluspegel untersucht. Die beiden 80dB-Messungen wurden zur Auswertung herangezogen; hier wurden die FAEP-Wellen I, III und V identifiziert und die Absolutlatenzen mithilfe der zum Sentiero Advanced gehörenden PC-Software Mira ausgelesen. Als Absolutlatenz der jeweiligen Wellen wurde zur Erhöhung der Messgenauigkeit der Mittelwert der Latenzen beider 80dB-Einzelmessungen herangezogen; konnten sichere Wellen lediglich in einer der beiden Messungen nachgewiesen werden, so wurden nur deren Latenzen gewertet. Aus den Absolutlatenzen wurden anschließend die Interpeaklatenzen I-III, III-V sowie I-V berechnet. Die 70dB-Messung diente ausschließlich als zusätzliche Hilfe, um anhand der Latenzzunahme der FAEP beim dort verwendeten niedrigeren Reizpegel mäßig ausgeprägte Wellen der 80dB-Messung sicherer zuordnen zu können; die Absolut- und Interpeaklatenzen der 70dB-Messung selbst wurden nicht ausgewertet.

2.8 Überblick über den Untersuchungsablauf

Alle Probanden wurden im Labor der Experimentellen Audiologie der HNO-Klinik des Klinikums rechts der Isar vom Verfasser dieser Dissertation untersucht.

Zunächst erfolgte eine ausführliche Aufklärung über Inhalt, Zweck und Ablauf der Studie und die schriftliche Einwilligung der Teilnehmer. Jeder Proband wurde explizit darauf hingewiesen, dass Pausen jederzeit und beliebig oft möglich seien, um einem Nachlassen der Konzentration im Laufe der Messsitzung vorzubeugen.

Anschließend wurden die einzelnen Tests hintereinander durchgeführt. Bis auf das Ausfüllen der Fragebögen (Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12 und HHIE-S) erfolgten sämtliche Untersuchungen in einer schall- und elektromagnetisch geschirmten Messkabine der Industrial Acoustics Company. Die zugehörigen Instruktionen wurden jeweils vor den einzelnen Untersuchungen in prägnanter und standardisierter Form gegeben (siehe Anhang 7.5), um eine Beeinflussung der Messergebnisse durch unterschiedliche Einweisungen zu vermeiden; weiterführende Erläuterungen wurden bei Bedarf vorgenommen. Die Benutzung eines Hörgerätes wurde dokumentiert; Hörgeräteträger absolvierten das Testprogramm jedoch ohne Hörgerät, damit alle Probanden unter gleichen Voraussetzungen untersucht wurden.

Folgende Reihenfolge wurde im Vorfeld für die Tests festgelegt:

Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12 > Otoskopie > Tympanometrie > Tonschwellenaudiogramm > OLSA > HHIE-S > SUN > LIPP erste Hälfte > mindestens 15min Pause > LIPP zweite Hälfte > DPOAE > BERA

Grundgedanke dieser Reihenfolge ist, dass mithilfe der vier ersten Tests sämtliche Aus- und Einschlusskriterien für die Studie erfasst werden können, damit nur geeignete Teilnehmer den weiterführenden Untersuchungen zugeführt werden. Die subjektiven Tests - Tonschwellenaudiogramm, Sprachverständnistests (OLSA und SUN) und LIPP-Batterie - werden möglichst früh in die Messsitzung integriert, damit der Proband diese mit der erforderlichen hohen Konzentration durchführen kann. Die sich ähnelnden Sprachverständnistests OLSA und SUN werden durch Einschleusen des Fragebogens HHIE-S und das damit verbundene Verlassen der Messkabine zeitlich getrennt durchgeführt. Der von den meisten Studienteilnehmern als am anstrengendsten empfundene LIPP-Test erfolgt am Ende der subjektiven Testphase; bei diesem wird der potentiell nachlassenden Konzentration des Studienteilnehmers durch eine vorgeschriebene Pause (und über das Kollektiv hinweg durch die in **2.6.3** erwähnte randomisierte Testreihenfolge) Rechnung getragen. Zum Schluss werden die objektiven Tests - DPOAE und BERA - durchgeführt, die keine konzentrierte Mitarbeit des Probanden mehr erfordern und durch Müdigkeit und die damit verbundene Entspannung tendenziell sogar bessere Messergebnisse erzielen. Aufgrund dieser optimierten Reihenfolge wurde trotz langer Untersuchungsdauer absichtlich darauf verzichtet, die Testbatterie in mehreren Messsitzungen durchzuführen.

2.9 Automatisiertes Auslesen der Messdaten

Um sämtliche Messergebnisse exakt und fehlerfrei in eine zentrale Übersichtstabelle für die statistische Auswertung zu integrieren, wurde eine Software verwendet, die die Daten vollautomatisch aus den jeweiligen Gerätespeichern ausliest und die Messwerte in die zugehörigen Zeilen und Spalten der Ergebnistabelle überträgt. Durch automatisiertes Erfassen des Geburtsdatums und des Untersuchungstages wurde zudem das exakte Alter jedes Probanden zum Untersuchungszeitpunkt durch die Software berechnet und in der Tabelle vermerkt. Stichprobenartig, bei etwa 10% der übertragenen Daten durchgeführte manuelle Nachkontrollen bestätigten die Zuverlässigkeit der Auslesesoftware. Lediglich die Ergebnisse des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12, die in Papierform vorlagen, wurden per Hand kodiert und in die Tabelle übertragen.

2.10 Methoden zur statistischen Auswertung der Messdaten

Sämtliche statistischen Auswertungen der Messdaten sowie deren grafische Darstellung wurden mit MATLAB (Version R2015b, MathWorks USA) vorgenommen. Zur Auswahl der statistischen

Methoden wurde eine Beratung des Instituts für medizinische Statistik und Epidemiologie der TU München in Anspruch genommen, nach deren Maßgaben die Berechnungen erfolgten.

Insgesamt gliederte sich der statistische Auswerteprozess der Daten in zwei Hauptschritte (siehe **Abbildung 2.3**): (1) Reduktion der Untersuchungsergebnisse auf ein Gesamtergebnis pro Untersuchungsparameter und Proband sowie (2) die eigentliche statistische Bewertung der Ergebnisse.

(1) Zunächst wurden alle Untersuchungsergebnisse, bei denen für rechtes und linkes Ohr getrennte Daten erhoben worden waren (Tonschwellenaudiogramm, SUN, LIPP dichotisch und interaural, DPOAE, BERA), durch Mittelwertbildung aus den jeweiligen Ergebnissen beider Ohren auf ein Gesamtergebnis je Proband und Messparameter reduziert. Dies ist nötig, da rechtes und linkes Ohr eines Probanden aufgrund der binauralen zentralen Verschaltung und der Testabsolvierung durch ein und dieselbe Person keine unabhängigen Ergebnisse liefern. Würde man hier die Ergebnisse beider Ohren gemeinsam in Signifikanztests, die unabhängige Stichproben voraussetzen, einfließen lassen, so könnten durch die Verdoppelung der Stichprobengröße ($n=60$ Ohren statt $n=30$ Probanden je Subkollektiv) und die Verletzung der Abhängigkeitsvoraussetzungen (rechtes und linkes Ohr eines Probanden nicht unabhängig) unzulässige Signifikanzen vorgetäuscht werden (Weiß 2013). Eine analoge Problematik trifft auf die Korrelationsberechnungen zu. Die vorgenommene Mittelwertbildung trägt dem Rechnung, indem sie die Anzahl der Messergebnisse auf die Stichprobengröße ($n=30$ je Subkollektiv) reduziert; jeder Mittelwert ist zudem - wie gefordert - unabhängig von den anderen Mittelwerten des Subkollektivs. Da rechtes und linkes Ohr als Einschlusskriterium ein weitgehend symmetrisches Hörvermögen aufweisen mussten (siehe **2.1**), ist eine relevante Beeinflussung der Messresultate durch diesen Schritt nicht zu befürchten.

Lag bei einer Messung nur bei einem Ohr ein valides Messergebnis vor, so wurde dieses ohne weitere Mittelwertrechnung als Gesamtergebnis des Probanden verwendet.

Bei den Messverfahren, die von vornherein nur ein Gesamtergebnis pro Proband erzielten (DIN-Fragebogen, HHIE-S, OLSA), erübrigte sich der vorgenannte Schritt.

In allen folgenden Abschnitten der vorliegenden Dissertation werden die nach vorgenannten Kriterien ermittelten Gesamtergebnisse als Ergebnisse des Probanden für den jeweiligen Messparameter bezeichnet.

(2) Als zweiter Hauptschritt folgte die statistische Auswertung der Ergebnisse:
(a) Signifikanzanalyse und (b) Korrelationsanalyse.

(a) Zum einen wurden die Untersuchungsergebnisse der einzelnen Subkollektive auf signifikante Unterschiede hin geprüft. Hierzu wurden Mittelwerte bzw. Mediane der Messresultate der einzelnen Subkollektive berechnet und mittels Signifikanztests verglichen. Alle p-Wertberechnungen legten ein Signifikanzniveau α von 5% zugrunde. Für die ordinal skalierten Untersuchungsverfahren (HHIE-S, SUN) wurde der Kruskal-Wallis-Test verwendet, der auf der Berechnung von Rangsummen beruht (Bender *et al.* 2007, Weiß 2013). Alle weiteren Untersuchungsverfahren (OLSA, LIPP, DPOAE, BERA), die metrisch skalierte und aufgrund der Subkollektivgröße von 30 Personen auch normalverteilte (Weiß 2013, Oestreich und Romberg 2014) Resultate erzielten, wurden mithilfe der einfaktoriellen Varianzanalyse (One-Way Analysis of Variance, ANOVA) auf Signifikanz untersucht (Bender *et al.* 2007, Weiß 2013). Beide Testverfahren liefern nur globale Aussagen, d.h. ein signifikantes Ergebnis zeigt lediglich das Vorhandensein signifikanter Unterschiede zwischen den Subkollektiven insgesamt, nicht aber, welche Subkollektive signifikant differieren. Daher muss bei einem signifikanten Ergebnis des globalen Testverfahrens ein post-hoc-Test folgen, der die Subkollektive paarweise auf signifikant unterschiedliche Ergebnisse prüft (Weiß 2013). In dieser Studie wurde als post-hoc-Test sowohl beim Kruskal-Wallis-Test als auch bei der ANOVA das Tukey-Kramer-Verfahren (Tukey HSD) angewandt, das paarweise Gruppenvergleiche bei gleichzeitiger Kontrolle des globalen Signifikanzniveaus α ermöglicht (Janssen und Laatz 2013). Die grundlegenden Charakteristika der Studienteilnehmer Hörvermögen (normalhörend vs. schwerhörig), Alter und die Ergebnisse des DIN-Fragebogens wurden nur deskriptiv ausgewertet und nicht auf Signifikanz geprüft, da erstere sich aufgrund des Studienkonzeptes zwischen den Subkollektiven unterscheiden müssen. Die Bewertung des DIN-Fragebogens mit Risikopunkten erfolgte in dieser Studie nach willkürlicher, nicht validierter Festlegung, daher ist hier eine Signifikanzberechnung nicht sinnvoll.

Da die Auswertung der Kollektivcharakteristika ergab, dass zwischen der normalhörenden und der schwerhörigen Über-60-Jährigen-Gruppe entgegen ursprünglichem Studienkonzept ein relevanter Altersunterschied bestand (siehe **3.1.1**), signifikante Unterschiede zwischen den Ergebnissen beider Subkollektive also nicht rein auf Schwerhörigkeits-, sondern auch auf zusätzliche Alterseffekte zurückzuführen sein könnten, wurde bei diesen Subkollektiven neben der ANOVA eine Analysis of Covariance (ANOCOVA) durchgeführt. Diese ermöglicht die Prüfung auf signifikante Differenzen zwischen den Subkollektiven aufgrund des unterschiedlichen Hörvermögens - im Gegensatz zur ANOVA - unter zusätzlicher Einbeziehung der Kovariablen Alter mithilfe eines linearen Modells. Die ANOCOVA liefert damit p-Werte, bei denen der Altersunterschied der beiden Gruppen rechnerisch eliminiert wurde und die dadurch Aussagen ausschließlich über die

Schwerhörigkeitseffekte zulassen (Cochran 1957). Ein entsprechendes nichtparametrisches Verfahren zur Alterskorrektur für die Untersuchungen, die mithilfe des Kruskal-Wallis-Tests ausgewertet wurden, existiert nicht.

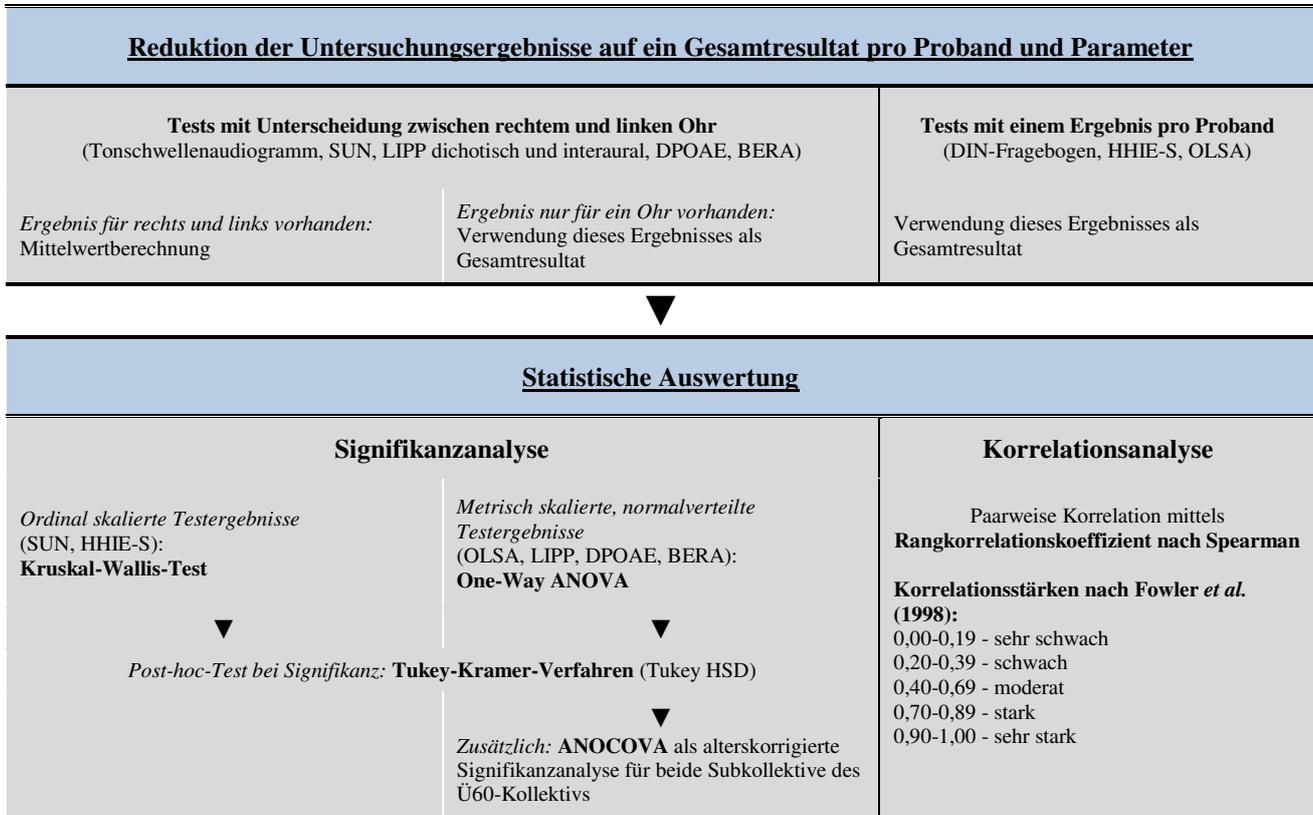


Abbildung 2.3: Grundlegendes Flussschema der statistischen Auswertung der Messdaten
 Zugrundegelegtes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ausreißer wurden nicht eliminiert. Die grundlegenden Charakteristika Hörvermögen, Alter sowie die Ergebnisse des DIN-Fragebogens wurden rein deskriptiv ausgewertet. In Einzelfällen (DPOAE-Signifikanzanalyse und -Korrelation) erfolgten leichte Abweichungen von diesem Grundschemata der Auswertung (siehe Ergebnisteil).

(b) Neben der Signifikanzprüfung wurde zum anderen eine Korrelationsanalyse durchgeführt, bei der die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsverfahren miteinander korreliert und dadurch auf Beziehungen untereinander geprüft werden. Um bei allen Untersuchungsverfahren dieselbe Korrelationsmethode anwenden und damit vergleichbare Korrelationskoeffizienten erhalten zu können, wurde durchgehend der Spearman-Rangkorrelationskoeffizient inklusive zugehörigem p-Wert verwendet, der sowohl ordinal als auch metrisch skalierte Testergebnisse toleriert (Steland 2013, Weiß 2013). Die Stärke der Korrelation wurde nach Fowler et al. (1998) wie folgt bewertet: 0,00-0,19 - sehr schwach; 0,20-0,39 - schwach; 0,40-0,69 - moderat; 0,70-0,89 - stark; 0,90-1,00 - sehr stark. In die Korrelationsberechnung flossen stets nur die Ergebnisse von Probanden ein, die jeweils bei beiden zu korrelierenden Messverfahren ein valides Resultat erzielt hatten (paarweise Korrelation).

Bei einzelnen Untersuchungsverfahren wurden von diesem Grundschema abgewichen bzw. zusätzliche Berechnungen durchgeführt. Diese Ausnahmen werden im jeweiligen Abschnitt des Ergebnisteils erläutert und begründet.

Grundsätzlich flossen alle validen Messergebnisse in die Auswertung ein. Ausreißer wurden nicht eliminiert, da durch die bei den meisten Messverfahren angewandten Plausibilitätsprüfungen bzw. Mehrfachermittlung eines Messergebnisses die Richtigkeit der erzielten Ergebnisse bereits sichergestellt ist und eine Elimination von Ausreißern eine willkürliche Datenverfälschung bewirken würde.

3 Ergebnisse

Die Darstellung der Studienergebnisse gliedert sich in drei Abschnitte: Zunächst erfolgt eine Beschreibung der Subkollektive der Studienpopulation hinsichtlich Altersstruktur, Hörvermögen und Risikofaktoren für Gehörschäden. Anschließend werden die Resultate der einzelnen Messverfahren auf signifikante Unterschiede zwischen den Subkollektiven geprüft, um Rückschlüsse auf Veränderungen des Hörvermögens mit zunehmendem Alter und bei Altersschwerhörigkeit ziehen zu können. Zuletzt werden ausgewählte Korrelationen zwischen den einzelnen Messverfahren beschrieben.

Wie bereits im Methodikteil erläutert (siehe **2.10**), wurde als Messergebnis eines Studienteilnehmers bei Messverfahren, die rechtes und linkes Ohr getrennt prüfen (Tonschwellenaudiogramm, SUN, LIPP dichotisch und interaural, DPOAE, BERA), jeweils der Mittelwert der Einzelmessungen verwendet. Lag bei einem Studienteilnehmer bei diesen Messverfahren ein valides Messresultat lediglich für ein Ohr vor, so wurde dieses Einzelresultat als Messergebnis des Studienteilnehmers betrachtet. Bei den übrigen Verfahren, die von vorherein nur ein Ergebnis je Proband und analysiertem Parameter erzielten (DIN-Fragebogen, HHIE-S, OLSA), wurde dieses unmittelbar als Resultat des jeweiligen Studienteilnehmers herangezogen.

Grundsätzlich werden der Vollständigkeit halber sämtliche Lage- und Streuungsmaße tabellarisch und in den Grafiken dargestellt. Die Beschreibungen berücksichtigen zur besseren Übersichtlichkeit jeweils das zum verwendeten Signifikanztest passende Lage- bzw. Streuungsmaß: Bei den beiden Messverfahren, bei denen die globale Signifikanzanalyse mittels Kruskal-Wallis-Test, also durch einen Rangsummentest, erfolgte (HHIE-S und SUN), wird auf die Rangmaße Median und Quantile Bezug genommen; bei allen restlichen Testergebnissen, die mittels ANOVA bzw. ANOCOVA auf signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den Subkollektiven geprüft wurden, auf Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD). Die maximale Länge der Boxplot-Whisker ist auf 1,5 Interquartilsabstände (entsprechend 1,5 Boxlängen) begrenzt, jenseits dieser maximalen Whiskerlänge gelegene Werte werden in den Grafiken zur besseren Einschätzbarkeit der Werteverteilung als Ausreißer gekennzeichnet. Es wird jedoch nochmals darauf hingewiesen, dass sämtliche Ausreißer in allen Berechnungen berücksichtigt wurden, da die Zuverlässigkeit der ermittelten Ergebnisse bereits durch die methodenspezifischen Plausibilitätsprüfungen (siehe die entsprechenden Kapitel in **2 Material und Methoden**) sichergestellt ist.

3.1 Charakteristika der Studienpopulation

Gemäß Studienkonzept bestand die Studienpopulation aus drei Subkollektiven: einem Kontrollkollektiv gesunder 18- bis 26-Jähriger (in den Grafiken und Tabellen als *Kontrollen* bezeichnet), einem normalhörenden Kollektiv 60- bis 80-Jähriger ($\dot{U}60 NH_{mWHO}$) und einem altersschwerhörigen Kollektiv 60- bis 80-Jähriger ($\dot{U}60 SH$). Auf diese Weise konnte durch Vergleich der Messergebnisse der beiden normalhörenden, aber im Alter unterschiedlichen Subkollektive hauptsächlich auf Alterungsprozesse des Gehörs rückgeschlossen werden. Durch Vergleich der beiden 60- bis 80-Jährigenkollektive wurden aufgrund des unterschiedlichen Hörvermögens bei annähernd gleichem Alter v.a. Schwerhörigkeitseffekte bei den Hörleistungen sichtbar. Die Klassifikation des Hörvermögens in die Kategorien normalhörend bzw. schwerhörig geschah mithilfe der leicht modifizierten WHO-Klassifikation der Schwerhörigkeit (siehe **2.1**), daher *mWHO* in der Subkollektivbezeichnung).

Jedes Subkollektiv bestand aus 30 Personen, die sich jeweils aus 15 Frauen und 15 Männern zusammensetzten.

Da sich die drei Subkollektive aufgrund des Studienkonzeptes zwangsläufig signifikant hinsichtlich ihrer Altersverteilung und ihres Hörvermögens unterscheiden mussten, erfolgte bei der anschließenden Auswertung der Altersstruktur der Kollektive und der Hörschwellenverläufe keine separate Signifikanzanalyse. Auch bei der Auswertung der Risikoanamnese für Gehörschäden, die mithilfe des Fragebogens für Hörtests gemäß DIN EN ISO 389-9:2009-12 erhoben wurde, wurde auf eine Signifikanzanalyse verzichtet, da das für diese Studie verwendete Scoring-System (siehe **2.3**) nichtlinear und nicht validiert ist.

3.1.1 Altersverteilung der Subkollektive

Das Kontrollkollektiv wies ein mittleres Alter von 24,2 Jahren (SD 1,7 Jahre) auf. Die jüngste Kontrollperson war am Untersuchungstermin 18,8 Jahre alt, die älteste 26,8 Jahre. Die geringe Standardabweichung und damit Streuung der Altersverteilung der Kontrollpersonen erklärte sich neben dem eng gefassten Einschlussintervall von 18 bis 26 Jahren durch eine überproportional große Gruppe etwa 24- bis 25-Jähriger Kontrollpersonen, was anhand der Quantile in der Grafik sichtbar wird (siehe **Abbildung 3.1** und **Tabelle 3.1**).

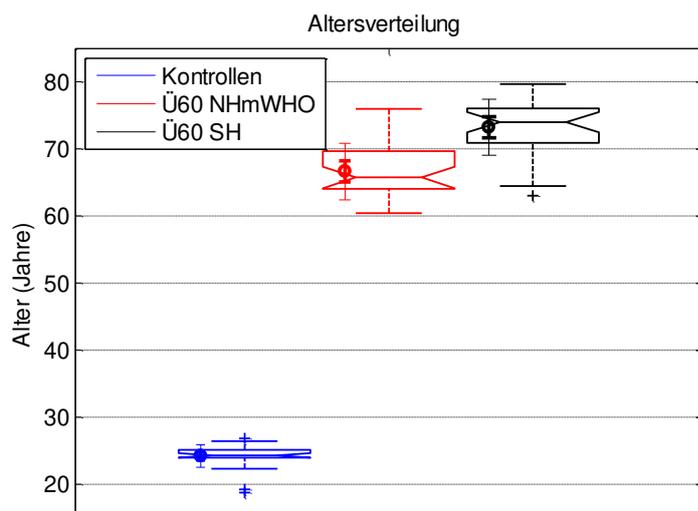


Abbildung 3.1: Altersverteilung der drei Subkollektive der Studienpopulation

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) des Probandenalters beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz).

Im Gegensatz zum Kontrollkollektiv zeigte die Altersverteilung beider Ü60-Subkollektive mit einer Standardabweichung von jeweils 4,2 Jahren eine breitere Streuung. Das mittlere Alter des normalhörenden Ü60-Subkollektivs lag bei knapp 67 Jahren, das des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs etwa sechs Jahre höher bei ca. 73 Jahren. Ebenso hatten der jüngste und der älteste Studienteilnehmer des normalhörenden Ü60-Subkollektivs mit etwa 60 bzw. 76 Jahren ein geringeres Alter als die entsprechenden Studienteilnehmer des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs mit 63 bzw. ca. 80 Jahren. Anhand der Quantile wird deutlich, dass die mittleren 50% beider Kollektive jeweils etwa innerhalb eines Fünfjahresintervalls um den Median lagen (siehe **Abbildung 3.1** und **Tabelle 3.1**).

Tabelle 3.1: Altersverteilung der drei Subkollektive der Studienpopulation

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des Probandenalters beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen. Alle Werte in Jahren.

Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25-Quantil	0,75-Quantil	Maximum
Kontrollen	30	24,2 ± 1,7	24,3	18,8	23,9	25,1	26,8
Ü60 NH _{mWHO}	30	66,7 ± 4,2	65,8	60,4	64,1	69,3	76,0
Ü60 SH	30	73,2 ± 4,2	74,0	63,0	70,9	76,0	79,7

Zusammengefasst wiesen normalhörendes und schwerhöriges Ü60-Subkollektiv damit ein vergleichbares Streuungsverhalten der Altersverteilung auf, wobei das absolute Alter des

Schwerhörigensubkollektivs stets jeweils ca. drei bis sechs Jahre höher lag als beim Normalhörendensubkollektiv. Dieser Unterschied machte die zusätzliche alterskorrigierte p-Wertberechnung mittels ANOCOVA nötig (siehe **2.10**).

Da das Alter neben dem Hörverlust gemäß Studienkonzept die entscheidende Einflussvariable für die Messergebnisse darstellte, wurde zudem eine nach Geschlechtern getrennte Analyse der Altersverteilung innerhalb der Subkollektive vorgenommen (siehe **Tabelle 3.2**). Der mittlere Altersunterschied zwischen den männlichen und weiblichen Studienteilnehmern belief sich auf nur 0,8 (Kontrollkollektiv), 0,4 (normalhörendes Ü60-Subkollektiv) bzw. 0,7 Jahre (schwerhöriges Ü60-Subkollektiv). Unter Beachtung, dass sich das Einschlussintervall des Probandenalters im Kontrollkollektiv über 8 Jahre, in beiden Ü60-Subkollektiven sogar über 20 Jahre erstreckte, erschien dieser durchschnittliche Altersunterschied vernachlässigbar klein. Anhand der vergleichbaren Standardabweichungen lässt sich zudem erkennen, dass auch die Streubreite der Altersverteilung bei Männern und Frauen innerhalb jedes Subkollektivs ähnlich groß war. In allen Subkollektiven fand sich folglich jeweils eine im Wesentlichen identische Altersverteilung bei Männern und Frauen.

Tabelle 3.2: Nach Geschlechtern getrennte Altersverteilung der Subkollektive der Studienpopulation

Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des Probandenalters (jeweils in Jahren) innerhalb der drei Subkollektive, nach Männern und Frauen getrennt. Beide Geschlechter wiesen innerhalb aller Subkollektive (Kontrollkollektiv, normalhörendes Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und schwerhöriges Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH)) jeweils eine vergleichbare Altersverteilung auf. Die Anzahl männlicher bzw. weiblicher Studienteilnehmer n betrug in allen Subkollektiven jeweils 15.

<u>Subkollektiv / Geschlecht</u>		<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>
Kontrollen	<i>Männer</i>	15	24,6 ± 1,8
	<i>Frauen</i>	15	23,8 ± 1,6
Ü60 NH_{mWHO}	<i>Männer</i>	15	66,5 ± 4,6
	<i>Frauen</i>	15	66,9 ± 3,9
Ü60 SH	<i>Männer</i>	15	72,9 ± 4,6
	<i>Frauen</i>	15	73,6 ± 3,9

3.1.2 Durchschnittlicher Hörverlust gemäß modifizierter WHO-Klassifikation und Hörschwellenverläufe im Tonschwellenaudiogramm

Die Einteilung des Hörvermögens in die Kategorien normalhörend bzw. altersschwerhörig geschah über die leicht modifizierte WHO-Klassifikation der Schwerhörigkeit (siehe **2.1**). Der durchschnittliche Hörverlust bei den hierbei berücksichtigten Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz beider Ohren lag im Kontrollkollektiv bei 2,9dB HL (SD 3,1dB HL). Das normalhörende Ü60-Subkollektiv wies einen leicht höheren durchschnittlichen Hörverlust von 9,1dB HL bei den von der WHO berücksichtigten Frequenzen auf; auch die Standardabweichung und damit die

Streuung der Werte war mit 5,2dB HL höher. Der durchschnittliche Hörverlust des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs betrug bei den o.g. Frequenzen 33,4dB HL bei einer etwa gleich großen Standardabweichung wie beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (5,9dB HL). Eine Übersicht hierzu liefert **Tabelle 3.3**.

Tabelle 3.3: Durchschnittlicher Hörverlust der drei Subkollektive der Studienpopulation gemäß modifizierter WHO-Klassifikation

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des Durchschnittshörverlustes gemäß modifizierter WHO-Klassifikation beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen. Alle Werte in dB HL.

<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	2,9 ± 3,1	2,4	-1,9	0,7	5,1	10,4
Ü60 NH_{mWHO}	30	9,1 ± 5,2	7,3	0,0	5,6	12,5	20,0
Ü60 SH	30	33,4 ± 5,9	34,7	25,0	28,2	36,6	47,8

Da das Hörvermögen neben dem Alter die zweite entscheidende Einflussvariable auf die Messergebnisse in dieser Studie darstellte, wurde auch hier eine geschlechtergetrennte Analyse ergänzt, um relevante Unterschiede im Hörvermögen von Frauen und Männern innerhalb der Subkollektive zu erfassen (siehe **Tabelle 3.4**). Der durchschnittliche Unterschied im Hörvermögen zwischen Frauen und Männern bei den von der WHO berücksichtigten Frequenzen betrug nur 0,5dB HL im Kontrollkollektiv, 0,9dB HL im normalhörenden Ü60-Subkollektiv bzw. ebenfalls 0,5dB HL im schwerhörigen Ü60-Subkollektiv. Die Standardabweichungen und damit die Werteverteilungen lagen innerhalb der Subkollektive bei Frauen und Männern jeweils in einem vergleichbaren Bereich. Ähnlich wie bei der Altersverteilung konnten folglich auch beim Hörvermögen gemäß modifizierter WHO-Klassifikation nur minimale Abweichungen zwischen Frauen und Männern innerhalb der Subkollektive festgestellt werden.

Tabelle 3.4: Nach Geschlechtern getrennter durchschnittlicher Hörverlust der Subkollektive gemäß modifizierter WHO-Klassifikation

Mittelwert (MW) und Standardabweichung (SD) des Durchschnittshörverlustes gemäß modifizierter WHO-Klassifikation (jeweils in dB HL) innerhalb der drei Subkollektive, nach Männern und Frauen getrennt. Beide Geschlechter wiesen innerhalb aller Subkollektive (Kontrollkollektiv, normalhörendes Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und schwerhöriges Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH)) jeweils ein vergleichbares Hörvermögen auf. Die Zahl männlicher bzw. weiblicher Studienteilnehmer n betrug in allen Subkollektiven jeweils 15.

<u>Subkollektiv / Geschlecht</u>		<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>
Kontrollen	<i>Männer</i>	15	3,1 ± 3,0
	<i>Frauen</i>	15	2,6 ± 3,3
Ü60 NH_{mWHO}	<i>Männer</i>	15	9,6 ± 4,3
	<i>Frauen</i>	15	8,7 ± 6,1
Ü60 SH	<i>Männer</i>	15	33,2 ± 6,3
	<i>Frauen</i>	15	33,7 ± 5,7

Betrachtet man die Durchschnittshörschwellenverläufe im Tonschwellenaudiogramm über den gesamten erfassten Frequenzbereich von 250Hz bis 8000Hz (siehe **Abbildung 3.2** und **Tabelle 3.5**), so wies das Kontrollkollektiv einen weitestgehend waagrechten Hörschwellenverlauf über den gesamten Frequenzbereich bei durchschnittlichen Hörverlusten von etwa 1dB HL bis 5dB HL auf. Lediglich bei 6kHz imponierte ein geringfügig höherer Durchschnittshörverlust von knapp 9dB HL. Über alle Frequenzen hinweg ergab sich beim Kontrollkollektiv eine ähnliche Streuung der Hörverlustwerte bei einer Standardabweichung von jeweils 4dB HL bis 5dB.

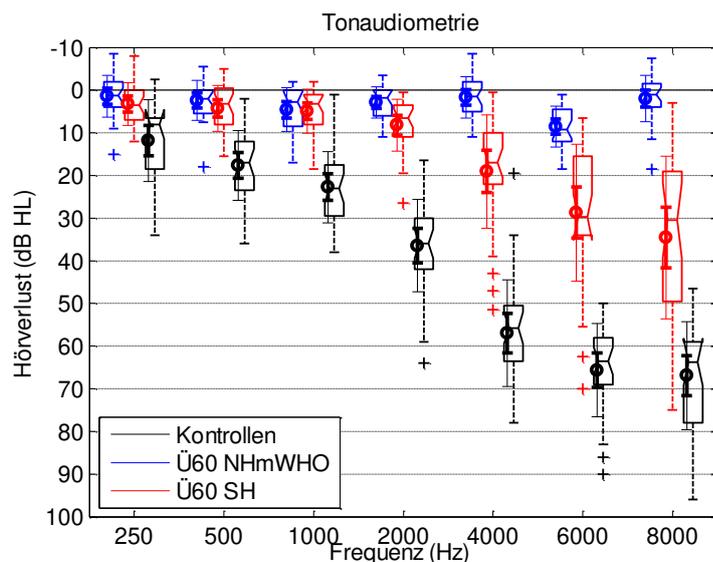


Abbildung 3.2: Hörschwellenverläufe der drei Subkollektive im Tonschwellenaudiogramm

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der Hörschwelle im Tonschwellenaudiogramm über alle erfassten Frequenzen beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als Hörschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Hörschwelle von rechtem und linkem Ohr verwendet.

Auch beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv fand sich im tiefen Frequenzbereich bis 2000Hz ein nahezu waagrechter durchschnittlicher Hörschwellenverlauf in einem Hörverlustbereich zwischen 3dB HL und 5dB HL. Ab 2000Hz erfolgte ein sukzessiver Anstieg der durchschnittlichen Hörverlustwerte bis zu 34,5dB HL bei 8000Hz, entsprechend dem Muster einer beginnenden Altersschwerhörigkeit. Die Standardabweichung und auch der Bereich der Hörverluste nahmen beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv mit zunehmender Frequenz am stärksten von allen Subkollektiven zu: Von 5dB HL bzw. einem überdeckten Intervall von ca. 20dB HL im Tieftonbereich bis 2000Hz bis hin zu 19,1dB HL bzw. einem überdeckten Intervall von 72dB HL bei 8000Hz. Homogener stellte sich der durchschnittliche Hörverlust beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv dar. Wie bei ausgeprägter Altersschwerhörigkeit typisch zeigte sich hier ein deutlicher

Abfall des Hörvermögens im Hochtonbereich bis zu durchschnittlich 67dB HL bei 8000Hz bei weitgehend intaktem Hörvermögen im Tieftonbereich. Die Standardabweichung lag über alle Frequenzen hinweg beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv in einer vergleichbaren Größenordnung von 8dB HL bis 13dB HL.

Tabelle 3.5: Hörschwellen der drei Subkollektive im Tonschwellenaudiogramm

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des Hörverlustes, nach Frequenz f (in Hertz (Hz)) aufgeteilt, beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen. Als Hörschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Schwellen von rechtem und linkem Ohr verwendet. Alle Werte in dB HL.

f (Hz)	Subkollektiv	n	MW \pm SD	Median	Minimum	0,25- Quantil	0,75- Quantil	Maximum
250	Kontrollen	30	1,4 \pm 4,9	1,3	-8,5	-1,9	4,0	15,0
	Ü60 NH _{mWHO}	30	3,2 \pm 5,0	3,5	-8,0	0,1	6,9	12,0
	Ü60 SH	30	11,8 \pm 9,6	8,0	-2,5	6,6	18,3	34,0
500	Kontrollen	30	2,4 \pm 4,7	2,0	-5,5	0,1	5,5	18,0
	Ü60 NH _{mWHO}	30	4,3 \pm 5,4	3,3	-5,0	-0,4	7,8	15,5
	Ü60 SH	30	17,6 \pm 8,1	17,0	2,0	12,1	23,3	36,0
1000	Kontrollen	30	4,6 \pm 5,1	2,8	-2,0	0,1	8,5	17,0
	Ü60 NH _{mWHO}	30	4,9 \pm 5,2	3,3	-2,0	1,1	7,9	18,5
	Ü60 SH	30	22,7 \pm 8,3	23,0	1,0	17,9	29,1	38,0
2000	Kontrollen	30	2,9 \pm 3,7	1,8	-3,5	0,0	5,9	11,0
	Ü60 NH _{mWHO}	30	8,2 \pm 6,1	6,5	0,5	3,6	10,9	26,5
	Ü60 SH	30	36,5 \pm 10,8	36,0	16,5	30,0	41,9	64,0
4000	Kontrollen	30	1,7 \pm 4,8	1,5	-8,5	-1,9	5,0	11,0
	Ü60 NH _{mWHO}	30	19,1 \pm 13,3	17,0	0,5	10,1	22,0	51,5
	Ü60 SH	30	57,0 \pm 12,5	55,8	19,5	50,8	63,3	78,0
6000	Kontrollen	30	8,6 \pm 4,8	9,3	1,0	4,6	11,9	18,5
	Ü60 NH _{mWHO}	30	28,7 \pm 16,1	29,8	6,5	16,0	34,0	70,0
	Ü60 SH	30	65,6 \pm 11,0	63,5	50,0	58,3	69,0	90,0
8000	Kontrollen	30	2,0 \pm 5,4	1,0	-7,5	-1,1	3,9	18,5
	Ü60 NH _{mWHO}	30	34,5 \pm 19,1	30,5	3,0	19,3	48,9	75,0
	Ü60 SH	30	66,9 \pm 12,6	63,8	46,5	59,5	76,9	96,0

Auch der gesamte Hörschwellenverlauf über alle Frequenzen wurde auf relevante Unterschiede zwischen Männern und Frauen innerhalb der Subkollektive analysiert. Wie schon bei der Altersverteilung und dem durchschnittlichen Hörverlust gemäß modifizierter WHO-Klassifikation konnten bei männlichen und weiblichen Studienteilnehmern innerhalb des jeweiligen Subkollektives keine relevanten Abweichungen der durchschnittlichen Hörschwellenverläufe über alle erfassten Frequenzen hinweg festgestellt werden (siehe **Abbildung 3.3A**). Da gemäß Einschlusskriterien für die Hörstudie ein weitgehend symmetrisches Hörvermögen von rechtem und linkem Ohr gefordert wurde (siehe **2.1**), erfolgte zudem eine nachträgliche Überprüfung der Einhaltung dieses Kriteriums per Scatterplot über alle Subkollektive und alle erfassten Frequenzen hinweg. Die Steigung der zugehörigen Regressionsgeraden von 0,9 beweist eine hohe Symmetrie

des Hörvermögens von rechtem und linkem Ohr und damit die Einhaltung des Symmetriekriteriums (siehe **Abbildung 3.3B**).

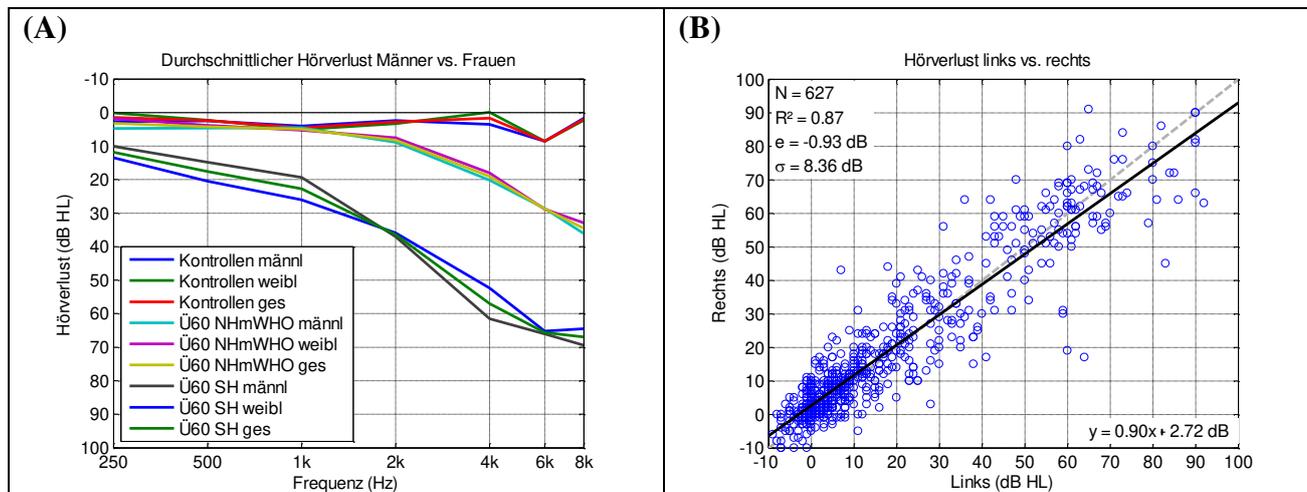


Abbildung 3.3: Nach Geschlechtern getrennte Hörschwellenverläufe der Subkollektive (A), Scatterplot zur Überprüfung des Symmetriekriteriums von rechtem und linkem Ohr (B)

(A) Durchschnittliche Hörschwellenverläufe der drei Subkollektive (Kontrollkollektiv, normalhörendes Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}), schwerhöriges Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH)) jeweils für das gesamte Subkollektiv (ges) sowie nach Frauen (weibl) und Männern (männl) getrennt. In allen Subkollektiven zeigte sich ein sehr ähnlicher durchschnittlicher Hörschwellenverlauf bei beiden Geschlechtern. (B) Subkollektivübergreifender Scatterplot der Hörschwellen gleicher Frequenz von linkem und rechtem Ohr inklusive entsprechender Regressionsgeraden mit Formel. N: Anzahl der Hörschwellenpaare.

3.1.3 Risikofaktoren für Gehörschädigung: Ergebnisse des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Das Kontrollkollektiv erzielte bei der Auswertung des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12 von allen drei Subkollektiven mit im Mittel 3,6 Punkten den höchsten *Gesamtrisikoscore* für Gehörschädigung (siehe **Tabelle 3.6**). Die Hälfte der Studienteilnehmer in diesem Subkollektiv wies einen Gesamtscore zwischen 3 und 4 Risikopunkten auf. Der Gesamtscore beider Ü60-Subkollektive lag mit durchschnittlich 1,4 Risikopunkten bei der normalhörenden und 1,6 Risikopunkten bei der schwerhörigen Über-60-Jährigen-Gruppe jeweils deutlich niedriger. In allen Subkollektiven fanden sich Studienteilnehmer, die keine der erfragten Risikokategorien bejahten, entsprechend einem Gesamtscore von 0 Risikopunkten. Unterschiede gab es jedoch bei der maximal erreichten Punktzahl; wie bei der zentralen Tendenz hatte hier das Kontrollkollektiv den höchsten bei einem Studienteilnehmer erreichten Score mit 6 Risikopunkten im Vergleich zu jeweils 4 Punkten bei den Ü60-Subkollektiven.

Durch die nicht validierte, für diese Studie willkürlich festgelegte Punkteverteilung bei der Scorebildung zeigt eine Verdoppelung des Gesamtscores (und auch der Subscores) allerdings nicht unbedingt eine Verdoppelung des Risikos für Gehörschäden an. Vielmehr liefert ein höherer Score

lediglich einen Hinweis auf das Vorliegen einer höheren Anzahl an Risikofaktoren. Zur genaueren Aufschlüsselung des Gesamtscores erfolgte daher zusätzlich eine nach den drei übergeordneten Fragenkategorien (Krankheitsanamnese, exogene Risikofaktoren, familiäre Vorbelastung, siehe auch 2.3) und Einzelfragen geordnete Analyse der Resultate des DIN-Fragebogens. Eine Übersicht hierzu liefern **Tabelle 3.7** und **Tabelle 3.8**.

Tabelle 3.6: Gesamtrisikoscore für Gehörschädigung aus dem Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des Gesamtrisikoscores (in Punkten) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	3,6 ± 1,2	3	0	3	4	6
Ü60 NH_{mWHO}	30	1,4 ± 1,0	1	0	1	2	4
Ü60 SH	30	1,6 ± 1,1	1	0	1	2	4

Tabelle 3.7: Risikosubscores für Gehörschädigung aus dem Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum sowie Maximum der Risikosubscores (in Punkten) für die Fragenkategorien Krankheitsanamnese, exogene Risikofaktoren und familiäre Vorbelastung beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>Krankheitsanamnese</u>				<u>Exogene Risikofaktoren</u>				<u>Familiäre Vorbelastung</u>			
		<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	0,2 ± 0,4	0	0	1	3,1 ± 0,9	3	0	5	0,2 ± 0,4	0	0	1
Ü60 NH_{mWHO}	30	0,5 ± 0,5	1	0	1	0,5 ± 0,6	0	0	2	0,3 ± 0,5	0	0	1
Ü60 SH	30	0,6 ± 0,5	1	0	1	0,7 ± 0,9	0	0	3	0,3 ± 0,5	0	0	1

In der Fragenkategorie *Krankheitsanamnese* erreichten die beiden Ü60-Subkollektive mit im Mittel 0,5 Risikopunkten (normalhörendes Subkollektiv) bzw. 0,6 Risikopunkten (schwerhöriges Subkollektiv) jeweils eine etwas höhere Durchschnittspunktzahl als das Kontrollkollektiv mit durchschnittlich 0,2 Risikopunkten. Dies erklärte sich durch den höheren Anteil an Probanden mit Vorerkrankungen des Gehörs (Frage 2). 53% (normalhörendes Subkollektiv) bzw. 60% (schwerhöriges Subkollektiv) der Ü60-Subkollektive bejahten die Frage nach Vorerkrankungen im Vergleich zu lediglich 23% der Studienteilnehmer des Kontrollkollektivs. Dieses Ergebnis wurde naturgemäß durch das höhere Lebensalter der Studienteilnehmer der Ü60-Subkollektive begünstigt. Über alle drei Subkollektive hinweg wurden als häufigste Vorerkrankungen akute Mittelohrentzündungen (insgesamt n=10 bei allen Kollektiven zusammen), Tinnitus (n=19) und

Hörstürze (n=12) angegeben, wobei erstere Erkrankung vor allem vom jungen Kontrollkollektiv genannt wurde, letztere beiden tendenziell häufiger von den beiden Ü60-Subkollektiven. Eine Voroperation am Ohr (Frage 3) hatte bei keinem der Studienteilnehmer der drei Subkollektive stattgefunden (0% in allen Subkollektiven). Dementsprechend rangierte der Risikosubscore in allen drei Subkollektiven im Wertebereich zwischen 0 und 1 Punkten.

Tabelle 3.8: Einzelergebnisse der scorerelevanten Fragen des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Anzahl und Prozentsatz (kursiv) der Ja-Antworten in den scorerelevanten Einzelfragen 2, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10 sowie 11, gegliedert nach den übergeordneten Fragenkategorien Krankheitsanamnese, exogene Risikofaktoren und familiäre Vorbelastung. Bei Fragen 7 und 9 wurde die Häufigkeitsangabe der Exposition in dieser Übersicht nicht gesondert berücksichtigt, bei Frage 8 zählten nur die von der Norm als Risiko bewerteten Spielsituationen Rockband und Sinfonieorchester. Grau hervorgehoben: Maximale Anzahl bzw. maximaler Prozentsatz an Ja-Antworten aller drei Subkollektive (Kontrollkollektiv, normalhörendes Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}), schwerhöriges Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>Krankheitsanamnese</u>		<u>Exogene Risikofaktoren</u>						<u>Fam. Vorbelastung</u>
		<u>Frage 2: Vorerkrankungen</u>	<u>Frage 3: Ohroperation</u>	<u>Frage 4: Ototoxische Medikamente</u>	<u>Frage 5: Berufsexposition</u>	<u>Frage 7: Rock-/Popkonzerte/ Diskothek</u>	<u>Frage 8: Rockband/ Sinfonieorchester</u>	<u>Frage 9: Tragbare Wiedergabegeräte</u>	<u>Frage 10: Weitere relevante Lärmexposition</u>	<u>Frage 11: Positive Familienanamnese</u>
Kontrollen	30	7 (23%)	0 (0%)	0 (0%)	7 (23%)	28 (93%)	0 (0%)	23 (77%)	6 (20%)	6 (20%)
Ü60 NH_{mWHO}	30	16 (53%)	0 (0%)	0 (0%)	5 (17%)	1 (3%)	1 (3%)	4 (13%)	4 (13%)	10 (33%)
Ü60 SH	30	18 (60%)	0 (0%)	1 (3%)	6 (20%)	0 (0%)	0 (0%)	6 (20%)	5 (17%)	10 (33%)

Der höchste Subscore in der Fragenkategorie *exogene Risikofaktoren* lag mit im Mittel 3,1 Risikopunkten beim Kontrollkollektiv vor. Beide Ü60-Subkollektive kamen mit durchschnittlich 0,5 Risikopunkten (normalhörendes Ü60-Subkollektiv) bzw. 0,7 Risikopunkten (schwerhöriges Ü60-Subkollektiv) auf jeweils deutlich niedrigere Subscoreergebnisse. Die Analyse der Einzelfragen zeigte, dass in keinem der Subkollektive eine relevante Exposition zu ototoxischen Medikamenten bestanden hatte (Frage 4); lediglich ein Teilnehmer des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs bejahte deren vorangegangene Einnahme. Bezüglich der Berufsexposition (Frage 5) gaben alle drei Subkollektive vergleichbar häufig vorangegangene Lärmbelastung an (Ja-Antwort bei 23% der Teilnehmer des Kontrollkollektivs, bei 17% des normalhörenden und bei 20% des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs). Im Gegensatz dazu wurde die Freizeitexposition durch Musik (Fragen 7-9) vom Kontrollkollektiv deutlich dominiert: 28 Teilnehmer (93%) dieses Kollektivs

berichteten, mindestens einmal pro Jahr Rock-/Popkonzerte oder Diskotheken zu besuchen (Frage 7), davon 23 Teilnehmer sogar mindestens zweimal pro Jahr. In beiden Ü60-Subkollektiven bejahte nur ein Studienteilnehmer des normalhörenden Subkollektivs (3%) eine einmalige derartige Exposition pro Jahr. Gut ein Drittel der Teilnehmer des Kontrollkollektivs (n=12) gab zudem an, aktiv zu musizieren (Frage 8). Im Vergleich dazu fanden sich in beiden Ü60-Subkollektiven jeweils nur 7 aktiv Musizierende. Allerdings wurden die von der DIN EN ISO 389-9:2009-12 genannten potentiell hörschädigenden Spielsituationen Rockband und Sinfonieorchester, die auch zu einer entsprechenden Punktevergabe im Scoring-System führten, ausschließlich von einem Teilnehmer des normalhörenden Ü60-Subkollektivs genannt. Die Benutzung tragbarer Musikwiedergabegeräte (Frage 9) wurde ebenfalls deutlich vom Kontrollkollektiv angeführt: 23 Teilnehmer (77%) dieses Kollektivs bejahten eine derartige Exposition, hiervon 7 mehr als 2 Stunden pro Woche. In beiden Ü60-Subkollektiven benutzte nur eine Minderheit der Studienteilnehmer (4 bzw. 6 Teilnehmer im normalhörenden bzw. schwerhörigen Ü60-Subkollektiv) entsprechende Geräte, die Mehrheit davon (jeweils 4 Teilnehmer) limitiert auf weniger als 2 Stunden pro Woche. Weitere relevante Lärmbelastung (Frage 10) wurde in allen drei Subkollektiven in vergleichbarer Häufigkeit angegeben (20% des Kontrollkollektivs, 13% des normalhörenden und 17% des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs). Insgesamt gab es in allen Subkollektiven Personen, bei denen in der Kategorie exogene Risikofaktoren keine Frage zutraf, entsprechend 0 Punkten in diesem Subscore. Den höchsten individuellen Risikosubscore in diesem Bereich erzielte mit 5 Risikopunkten ein Teilnehmer des Kontrollkollektivs.

Eine positive *Familienanamnese* für Hörstörungen in der unmittelbaren Verwandtschaft lag - naturgemäß durch das höhere Durchschnittsalter der Teilnehmer und damit auch der unmittelbaren Verwandten begünstigt - häufiger bei den Teilnehmern der beiden Ü60-Subkollektive im Vergleich zum Kontrollkollektiv vor (Ja-Antwort bei jeweils 33% der Teilnehmer der Ü60-Subkollektive und bei 20% der Teilnehmer des Kontrollkollektivs). Entsprechend erzielten diese beiden Subkollektive mit durchschnittlich 0,3 Risikopunkten einen etwas höheren Subscore in dieser Fragenkategorie als das Kontrollkollektiv (durchschnittlich 0,2 Risikopunkte). Die am häufigsten bei der unmittelbaren Verwandtschaft genannten Hörstörungen waren Altersschwerhörigkeit (n=11 über alle Subkollektive), Tinnitus (n=8) und Hörstürze (n=7).

Zusammengefasst erklärte sich damit der höhere Gesamtrisikoscore des Kontrollkollektivs vor allem durch die im Vergleich zu den beiden Ü60-Subkollektiven häufigere Freizeitexposition durch Musik. Die tendenziell häufigere Angabe von eigenen Vorerkrankungen des Gehörs bzw. positiver Familienanamnese durch die beiden Ü60-Subkollektive konnte diesen Vorsprung nicht mehr

ausgleichen. Die Einzelergebnisse des Fragebogens für Hörtests inklusive der Detailantworten zu Vorerkrankungen, exogener Exposition und Familienanamnese finden sich im Anhang 7.1.

3.2 Ergebnisse der einzelnen Messmethoden

Wie oben beschrieben unterschieden sich Männer und Frauen innerhalb der drei Subkollektive nicht relevant hinsichtlich Altersverteilung und Schwerhörigkeitsgrad bzw. Gesamthörschwellenverlauf (siehe 3.1.1 und 3.1.2). Zudem lag in allen Subkollektiven ein identisches 1:1-Geschlechterverhältnis vor. Da aufgrund dieser Aspekte eine geschlechtsspezifische Verzerrung der Messergebnisse zwischen den drei Subkollektiven minimiert wurde, werden alle folgenden Resultate der einzelnen Messmethoden der Übersichtlichkeit halber ohne geschlechtergetrennte Betrachtung dargestellt.

3.2.1 Hearing Handicap Inventory for the Elderly - Screening Version (HHIE-S)

Das subjektiv empfundene, mittels HHIE-S erfasste individuelle Hörhandicap differierte zwischen den drei Subkollektiven. Die absoluten Punktzahlen unterschieden sich sowohl zwischen dem Kontrollkollektiv und dem normalhörenden Ü60-Subkollektiv als auch zwischen dem normalhörenden Ü60-Subkollektiv und dem schwerhörigen Ü60-Subkollektiv jeweils signifikant voneinander (siehe **Tabelle 3.9**).

Tabelle 3.9: Signifikanzanalyse zum HHIE-S

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche beim HHIE-S. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

Globaler Test	Paarweise Gruppenvergleiche	
<i>Kruskal-Wallis</i>	Kontrollen vs. Ü60 NH_{mWHO}	Ü60 NH_{mWHO} vs. Ü60 SH
<0,001*	<i>Tukey HSD</i> <0,001*	<i>Tukey HSD</i> 0,014*

Das Kontrollkollektiv wies mit 2 Punkten den niedrigsten Median und damit das geringste subjektive Hörhandicap aller drei Subkollektive auf (siehe **Abbildung 3.4** und **Tabelle 3.10**). Mit Ausnahme zweier Studienteilnehmer, die einen Score von 10 Punkten erreichten und damit die Grenze zum moderaten Hörhandicap gerade überschritten, war das Hörerleben aller restlichen Teilnehmer dieses Subkollektivs durch ein nicht vorhandenes Hörhandicap charakterisiert. Ein deutlicher Schwerpunkt des erzielten Scores lag in einem engen Bereich bei 0 und 2 Punkten; 23 von 30 Teilnehmern (77%) erzielten diese Punktzahlen und beantworteten damit maximal eines der emotionalen bzw. situativen Items mit „manchmal“ zutreffend.

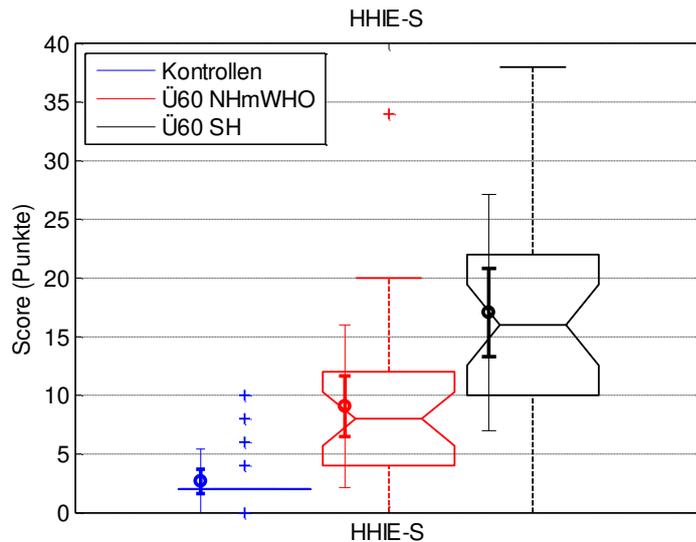


Abbildung 3.4: Ergebnisse des HHIE-S

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) des HHIE-S-Scores beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz).

Die im Vergleich dazu signifikant höheren HHIE-S-Scores des normalhörenden Ü60-Subkollektivs verteilten sich über einen größeren Bereich. Zwar lag der Median des Scores mit 8 Punkten noch im Grenzbereich eines nicht vorhandenen Hörhandicaps. Das Hörhandicap von 11 der 30 Studienteilnehmer (37%) wurde jedoch als moderat, das von einem einzelnen Studienteilnehmer (3%) mit einem Score von 34 Punkten sogar als schwer eingestuft. In einem nochmals signifikant höheren Punktebereich und zudem nochmals breiteren Wertebereich rangierten die HHIE-S-Scores des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs. In diesem Subkollektiv waren nur noch 7 der 30 Studienteilnehmer (23%) durch ein nicht vorhandenes Hörhandicap charakterisiert; lediglich ein Teilnehmer verneinte sämtliche Items und erzielte damit einen Score von 0 Punkten. Die Mehrheit der Studienteilnehmer dieses Subkollektivs (17 von 30; 57%) wies dagegen ein moderates Hörhandicap auf, was sich auch im Median von 16 Punkten widerspiegelt. 6 der Probanden des Subkollektivs (20%) fielen in die Kategorie eines schweren Hörhandicaps; mit einem maximalen Score von 38 Punkten gaben davon zwei Studienteilnehmer sogar in fast allen Items eine „oft“ vorhandene Beeinträchtigung an.

Zusammenfassend verschob sich damit der erzielte HHIE-S-Score vom Kontrollkollektiv über das normalhörende Ü60-Subkollektiv bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv in einen jeweils signifikant höheren Wertebereich, wobei das überspannte Wertintervall zugleich stetig breiter wurde.

Tabelle 3.10: Ergebnisse des HHIE-S

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des HHIE-S-Scores (in Punkten) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	2,7 ± 2,7	2	0	2	2	10
Ü60 NH_{mWHO}	30	9,1 ± 6,9	8	0	4,5	11,5	34
Ü60 SH	30	17,1 ± 10,1	16	0	10	22	38

3.2.2 Ergebnisse der subjektiven Messmethoden

3.2.2.1 Sprachverständnistests

Bei beiden verwendeten Sprachverständnistests - Oldenburger Satztest und SUN-Test - wird im Folgenden sowohl auf die absoluten Ergebnisse als auch auf beobachtete Trainingseffekte eingegangen.

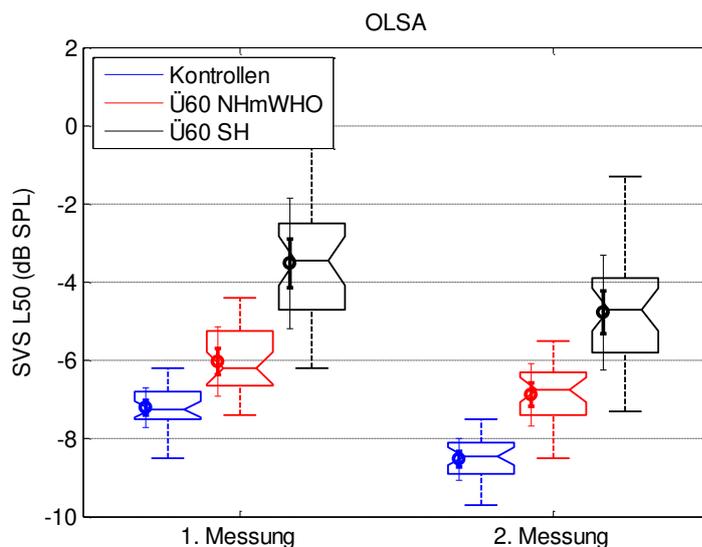
3.2.2.1.1 Oldenburger Satztest (OLSA)

Das von allen drei Subkollektiven beste Sprachverständnis im Störgeräusch konnte im Oldenburger Satztest beim Kontrollkollektiv nachgewiesen werden. Die durchschnittliche SVS L₅₀ dieses Kollektivs bei der gewerteten Testliste lag bei -8,5dB SNR, d.h. es wurden rechnerisch 50% der Wörter des Testsatzes verstanden, wenn der Sprachpegel um 8,5dB SPL leiser als der Störgeräuschpegel eingestellt war (siehe **Tabelle 3.11** und **Abbildung 3.5**). Die 50%-Sprachverständlichkeitsschwellen dieses Kollektivs lagen zwischen -7,5dB SNR beim schlechtesten und -9,7dB SNR beim besten Teilnehmer und damit stets besser als der Referenzwert von -7,1dB SNR. Mit einer durchschnittlichen SVS L₅₀ von -6,9dB SNR erzielte das normalhörende Ü60-Subkollektiv hingegen ein nahe dem Referenzwert liegendes mittleres Messergebnis. Die 50%-Sprachverständlichkeitsschwellen rangierten hier in einem Bereich von -5,5dB SNR bis -8,5dB SNR. Das schwerhörige Ü60-Subkollektiv war durch eine deutlich unter dem Referenzwert liegende durchschnittliche SVS L₅₀ von -4,8dB SNR charakterisiert. Die Studienteilnehmer deckten hier ein breites Intervall von nahe beim bzw. sogar besser als der Referenzwert gelegenen bis hin zu annähernd bei 0dB SNR gelegenen Schwellen ab. Entsprechend dieser Inhomogenität wiesen die 50%-Sprachverständlichkeitsschwellen dieses Subkollektivs auch die größte Standardabweichung auf.

Tabelle 3.11: 50%-Sprachverständnisschwellen der gewerteten Testliste im OLSA

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der 50%-Sprachverständlichkeitsschwelle (SVS L_{50} in dB SNR) der gewerteten Testliste beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen. Störschallpegel jeweils 65dB SPL.

Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25-Quantil	0,75-Quantil	Maximum
Kontrollen	30	-8,5 ± 0,5	-8,5	-9,7	-8,9	-8,1	-7,5
Ü60 NH _{mWHO}	30	-6,9 ± 0,8	-6,8	-8,5	-7,4	-6,3	-5,5
Ü60 SH	30	-4,8 ± 1,5	-4,7	-7,3	-5,8	-3,9	-1,3

**Abbildung 3.5: 50%-Sprachverständlichkeitsschwellen im OLSA bei Übungsliste und gewerteter Testliste**

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der 50%-Sprachverständlichkeitsschwelle (SVS L_{50}) beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Der gewerteten Testliste (2. Messung, rechts) wurde aufgrund bekannter Trainingseffekte eine nicht gewertete Übungsliste (1. Messung, links) vorangestellt.

Die Signifikanz der Mittelwertunterschiede zwischen den OLSA-Ergebnissen aller drei Subkollektive konnte in der statistischen Auswertung nachgewiesen werden. Dieselbe statistische Bewertung ergab sich auch unter Berücksichtigung des Altersunterschiedes zwischen den zwei Ü60-Subkollektiven mittels ANOCOVA (p jeweils < 0,001; siehe **Tabelle 3.12**).

Tabelle 3.12: Signifikanzanalyse zum OLSA

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche bei der gewerteten zweiten Testliste des OLSA. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

Globaler Test	Paarweise Gruppenvergleiche	
ANOVA	Kontrollen vs. Ü60 NH _{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH _{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
< 0,001*	< 0,001*	< 0,001* / < 0,001*

Wie schon beschrieben (siehe 2.6.2.1) treten beim OLSA Trainingseffekte auf, die das Abspielen einer Übungsliste vor der eigentlichen gewerteten Testliste erforderlich machen. Diese Effekte konnten auch in der hier vorliegenden Studie beobachtet werden. Die bereits in **Abbildung 3.5** sichtbare Verbesserung der OLSA-Ergebnisse zwischen erster (Übungs-) und zweiter (gewerteter) Testliste wurde rechnerisch näher quantifiziert (siehe **Tabelle 3.13**). Über das gesamte Probandenkollektiv hinweg betrug die Verbesserung der SVS L_{50} im Durchschnitt 1,2dB SNR, d.h. die Probanden wiesen in der zweiten Testliste im Mittel dasselbe Sprachverständnis auf, wenn die Sprache bei konstantem Störgeräuschpegel im Vergleich zur ersten Messung nochmals um 1,2dB SPL leiser eingestellt war. Wesentliche Unterschiede im mittleren Trainingseffekt fanden sich zwischen den Subkollektiven nicht, dieser lag jeweils zwischen durchschnittlich 1,1dB SNR und 1,3dB SNR. Hinsichtlich der Streubreite gab es jedoch im normalhörenden Ü60-Subkollektiv im Vergleich zu den beiden anderen Subkollektiven Extremwerte in beide Richtungen: Als einzige in der gesamten Studienpopulation profitierten zwei Teilnehmer dieses Subkollektivs nicht von der vorangestellten Übungsliste und wiesen im Vergleich zu dieser eine minimale Verschlechterung (je 0,1dB SNR) des Ergebnisses der gewerteten zweiten Testliste auf. Ein Studienteilnehmer zeigte eine erhebliche Ergebnisverbesserung um 6,3dB SNR im zweiten Durchgang. In den beiden anderen Subkollektiven fand sich jeweils eine geringere Variabilität des Trainingseffektes.

Tabelle 3.13: Trainingseffekt beim OLSA zwischen erster und zweiter Messung

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Differenz der SVS L_{50} zwischen zweiter und erster Testliste (= Trainingseffekt in dB SNR) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}), beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH) sowie für alle Subkollektive zusammengefasst (Gesamt). Zu beachten ist, dass aufgrund der negativen SNR ein betragsmäßig hoher negativer Zahlenwert einen großen Trainingseffekt bedeutet (der maximal beobachtete Trainingseffekt also jeweils in der Spalte Minimum zu finden ist) und umgekehrt. Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Kollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	-1,3 ± 0,4	-1,3	-2,3	-1,5	-1,2	-0,5
Ü60 NH_{mWHO}	30	-1,1 ± 1,1	-0,9	-6,3	-1,2	-0,7	+0,1
Ü60 SH	30	-1,3 ± 0,6	-1,2	-2,8	-1,6	-0,7	-0,3
Gesamt	90	-1,2 ± 0,8	-1,2	-6,3	-1,5	-0,7	+0,1

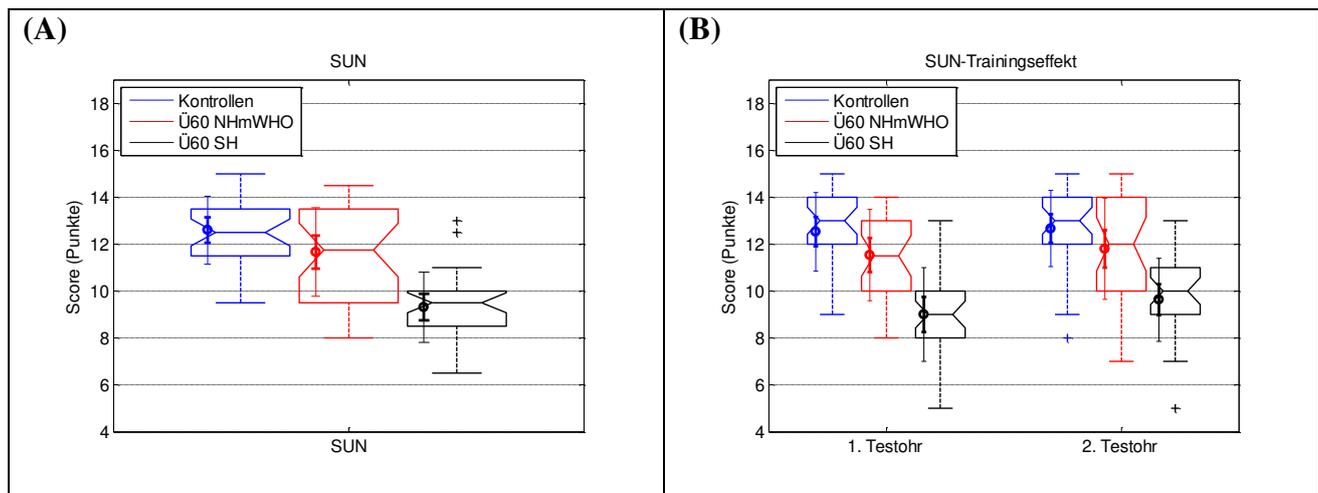
3.2.2.1.2 Speech Understanding in Noise (SUN)-Test

Auch im SUN-Test zeigte das Kontrollkollektiv das beste Logatomverständnis im Störgeräusch. Die Kontrollpersonen verstanden unter Mittelung der Ergebnisse von rechtem und linkem Ohr im Median 12,5 der 15 gewerteten Logatome korrekt. Die beste Studienteilnehmerin dieses Kollektivs konnte alle 15 Logatome auf beiden Ohren richtig identifizieren, entsprechend einem SUN-Score von 15, im Vergleich zu lediglich 9,5 korrekt erkannten VCVs beim schlechtesten Probanden dieses Kollektivs (siehe **Tabelle 3.14** und **Abbildung 3.6A**).

Tabelle 3.14: Ergebnisse des SUN-Tests

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des SUN-Testergebnisses (Anzahl der korrekt verstandenen von 15 vorgespielten Logatomen) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als SUN-Ergebnis eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet. Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25-Quantil	0,75-Quantil	Maximum
Kontrollen	30	12,6 ± 1,4	12,5	9,5	11,6	13,5	15,0
Ü60 NH _{mWHO}	30	11,7 ± 1,9	11,8	8,0	9,6	13,5	14,5
Ü60 SH	30	9,3 ± 1,5	9,5	6,5	8,5	10,0	13,0

**Abbildung 3.6: Ergebnisse und Trainingseffekt beim SUN-Test**

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünnere Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) des jeweiligen SUN-Testergebnisses beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als SUN-Ergebnis eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet (A). Aufgrund der getrennt für rechtes und linkes Ohr durchgeführten Einzelmessungen erfolgte eine zusätzliche Analyse der Einzelergebnisse auf einen möglichen Trainingseffekt zwischen erster und zweiter Messung (B).

In einer hierzu leicht tieferen, jedoch nicht signifikant ($p=0,19$; siehe **Tabelle 3.15**) differierenden Scorebereich verschobene SUN-Ergebnisse erzielte das normalhörende Ü60-Subkollektiv, das mit einem Median von 11,8 von 15 korrekt gehörten Logatomen noch relativ nahe an das Resultat des Kontrollkollektivs herankam. Auch beim maximal bzw. minimal erreichten Score beider Ohren fanden sich mit 8,0 bzw. 14,5 richtig verstandenen Logatomen jeweils nur etwas niedrigere Ergebnisse im Vergleich zum Kontrollkollektiv. Das schwerhörige Ü60-Subkollektiv hingegen unterschied sich durch eine signifikant geringere Werteverteilung des SUN-Scores vom Kontroll- und vom normalhörenden Ü60-Subkollektiv. Die Teilnehmer dieses Subkollektivs konnten im Median lediglich 9,5 der 15 vorgespielten Logatome richtig identifizieren. Der schlechteste Teilnehmer lag mit einem Score von nur 6,5 korrekten Logatomen bereits relativ nahe der durch die Dreifachauswahl bedingten Ratewahrscheinlichkeit von 5 korrekt gewählten Logatomen. Allerdings

gab es auch in diesem Subkollektiv Studienteilnehmer, die trotz Schwerhörigkeit einen Großteil der Logatome richtig verstehen konnten, im Maximum 13 der 15 Logatome.

Tabelle 3.15: Signifikanzanalyse zum SUN-Test

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche beim SUN-Test. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

<u>Globaler Test</u>	<u>Paarweise Gruppenvergleiche</u>		
<i>Kruskal-Wallis</i>	Kontrollen vs. Ü60 NH_{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Kontrollen vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH_{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>
< 0,001*	0,19	< 0,001*	< 0,001*

Da der SUN-Test bei jedem Probanden hintereinander separat für rechtes und linkes Ohr durchgeführt wurde und beide Testdurchläufe hinsichtlich Logatomreihenfolge und Änderung der SNR identisch aufgebaut waren, erschien - ähnlich wie beim OLSA - ein Trainingseffekt mit Verbesserung des Scoreergebnisses beim zweiten Testohr denkbar. Daher wurde in Analogie zum OLSA eine zusätzliche Analyse der Testergebnisse unter Berücksichtigung der zeitlichen Reihenfolge beider Einzelmessungen durchgeführt (siehe **Abbildung 3.6B** und **Tabelle 3.16**). Eine feste Seitenzuordnung von rechtem bzw. linkem Ohr zu erster bzw. zweiter Messung war aufgrund der randomisierten Testreihenfolge nicht möglich. Über das gesamte Studienkollektiv hinweg zeigte sich bei einem Median von 0 keine Änderung der Anzahl korrekt erkannter Logatome von erster zu zweiter Messung; dies galt im Einzelnen auch für das Kontrollkollektiv und das normalhörende Ü60-Subkollektiv. Lediglich beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv konnten sich die Studienteilnehmer im Median um ein zusätzlich korrekt verstandenes Logatom verbessern. Auf den einzelnen Probanden bezogen variierte die Änderung subkollektivübergreifend jedoch erheblich und reichte von einer deutlichen Verschlechterung bis zu einer deutlichen Verbesserung des Testergebnisses im zweiten Testdurchlauf um bis zu 6 Logatome. Die größten beobachteten Änderungen ergaben sich jeweils beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv.

Tabelle 3.16: Trainingseffekt beim SUN-Test zwischen erstem und zweitem Testohr

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Differenz der Anzahl korrekt verstandener Logatome zwischen zweitem und erstem Testohr (= Trainingseffekt) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}), beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH) sowie für alle Subkollektive zusammengefasst (Gesamt). Die Subkollektivgröße n betrug jeweils 30 Personen.

<u>Kollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Kontrollen	30	0,1 ± 1,6	0	-3	-1	1	4
Ü60 NH_{mWHO}	30	0,3 ± 1,6	0	-3	-1	1	4
Ü60 SH	30	0,6 ± 2,3	1	-6	-1	2	6
Gesamt	90	0,3 ± 1,9	0	-6	-1	1	6

3.2.2.2 Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik (LIPP)

Die folgende Ergebnisauswertung der LIPP-Testbatterie berücksichtigt die dichotische und interaurale Präsentationsart als hemisphären- bzw. hirnstammspezifische Messverfahren. Die Ergebnisse der binauralen Präsentationsart, die im Studienablauf lediglich als Training für die LIPP-Prozedur durchgeführt wurde, werden an dieser Stelle nicht näher beschrieben, eine entsprechende Ergebnistabelle findet sich der Vollständigkeit halber jedoch im Anhang 7.3.

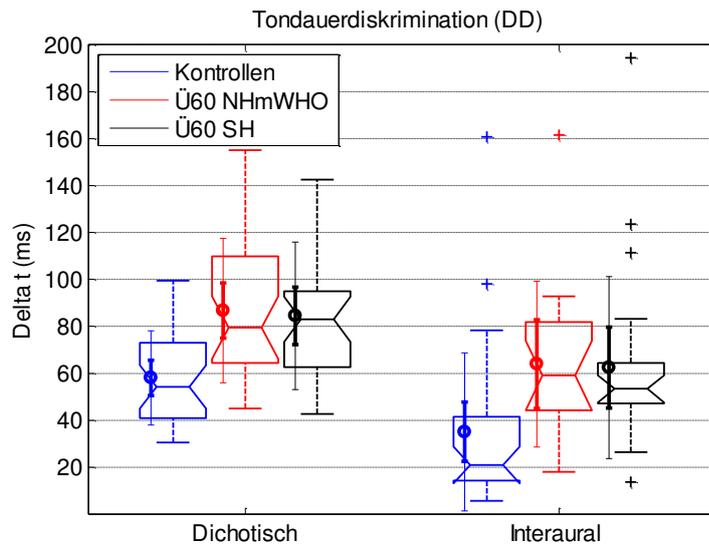


Abbildung 3.7: Tondauerdiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der Tondauerdiskriminationsschwellen Δt beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als Diskriminationsschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet.

Hinsichtlich der *Tondauerdiskrimination (Testmodus DD)* konnte das Kontrollkollektiv die besten Ergebnisse erzielen. Wie in **Abbildung 3.7** und **Tabelle 3.17** ersichtlich, betrug der mittlere in diesem Kollektiv gerade noch erkannte Tondauerunterschied 58,1ms in der *dichotischen* Präsentationsart. Beide Ü60-Subkollektive wiesen mit durchschnittlich 86,7ms (normalhörendes) bzw. 84,5ms (schwerhöriges Ü60-Subkollektiv) jeweils statistisch signifikant höhere Tondauerdiskriminationsschwellen im Vergleich zum Kontrollkollektiv auf. Die Ü60-Subkollektive untereinander unterschieden sich hingegen nicht signifikant in ihren Diskriminationsschwellen (siehe **Tabelle 3.18**); die dichotische Schwelle des schwerhörigen Subkollektivs war hier sogar minimal besser als die des normalhörenden. Dasselbe Verhalten zeigten die *interaural* ermittelten Schwellen, wobei in diesem Fall die absoluten Schwellen mit durchschnittlich 35,1ms (Kontrollen), 64,0ms (normalhörendes Ü60-Subkollektiv) und 62,5ms (schwerhöriges Ü60-Subkollektiv)

niedriger als die dichotischen lagen. Bei der interauralen Präsentationsart fielen Schwierigkeiten des Ü60-Kollektivs auf: Nur gut die Hälfte (n=16) der Probanden des normalhörenden Ü60-Subkollektivs bzw. gut zwei Drittel (n=22) der Probanden des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs waren imstande, valide Testergebnisse zu erzielen, die den Plausibilitätskriterien der Prüfalgorithmen (siehe 2.6.3) genügten. Bei der dichotischen Präsentationsart - und auch bei allen anderen Testmodi (s.u.) - gab es kein vergleichbares Phänomen. Bei beiden Präsentationsarten nahmen die Standardabweichung und damit auch die Streuung der Ergebnisse vom Kontrollkollektiv über das normalhörende bis hin zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv jeweils zu.

Tabelle 3.17: Tondauerdiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Tondauerdiskriminationsschwellen in den Präsentationsarten dichotisch und interaural beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet. n: Anzahl der validen Schwellen. Alle Werte in ms.

Präsentationsart	Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25-Quantil	0,75-Quantil	Maximum
Dichotisch	<i>Kontrollen</i>	30	58,1 ± 20,0	54,3	30,5	41,4	73,0	99,5
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	86,7 ± 30,8	79,5	45,0	64,9	107,8	155,0
	<i>Ü60 SH</i>	28	84,5 ± 31,4	82,9	42,8	62,7	94,3	180,5
Interaural	<i>Kontrollen</i>	30	35,1 ± 33,7	20,9	5,8	14,4	41,4	160,8
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	16	64,0 ± 35,4	59,1	18,0	47,6	81,4	161,5
	<i>Ü60 SH</i>	22	62,5 ± 38,8	53,4	13,8	47,7	62,9	194,5

Tabelle 3.18: Signifikanzanalyse zur Tondauerdiskrimination im LIPP-Test

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

Präsentationsart	Globaler Test	Paarweise Gruppenvergleiche		
	ANOVA	Kontrollen vs. Ü60 NH _{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Kontrollen vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH _{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
Dichotisch	< 0,001*	< 0,001*	0,0014*	0,95 / 0,47
Interaural	0,0085*	0,030*	0,022*	0,99 / 0,39

Ähnlich präsentierten sich die Ergebnisse der *Pegeldiskrimination (Testmodus PD)*. Auch hier erkannte das Kontrollkollektiv die bei weitem geringsten Pegelunterschiede von allen Subkollektiven mit einer Durchschnittsdiskriminationsschwelle von 2,7dB in der *dichotischen* Präsentationsart (siehe **Abbildung 3.8** und **Tabelle 3.19**). Das schwerhörige Ü60-Subkollektiv wies wiederum eine minimal bessere mittlere Pegeldiskriminationsschwelle als das normalhörende Ü60-Subkollektiv auf (4,4dB vs. 4,7dB), so dass signifikante Unterschiede der Testergebnisse nur

zwischen dem Kontrollkollektiv und den beiden Ü60-Subkollektiven gesichert werden konnten, nicht aber zwischen den Ü60-Subkollektiven (siehe **Tabelle 3.20**).

Tabelle 3.19: Pegeldiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Pegeldiskriminationsschwellen in den Präsentationsarten dichotisch und interaural beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet. n: Anzahl der validen Schwellen. Alle Werte in dB.

Präsentationsart	Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25-Quantil	0,75-Quantil	Maximum
Dichotisch	Kontrollen	30	2,7 ± 1,4	2,4	1,2	1,6	2,9	7,6
	Ü60 NH _{mWHO}	30	4,7 ± 2,3	4,7	1,4	3,0	5,8	10,8
	Ü60 SH	30	4,4 ± 2,4	3,4	1,5	2,8	6,0	12,2
Interaural	Kontrollen	30	2,9 ± 1,0	2,8	1,3	2,2	3,4	5,9
	Ü60 NH _{mWHO}	30	5,1 ± 2,0	5,0	2,3	3,5	6,2	9,0
	Ü60 SH	30	4,6 ± 1,9	4,2	1,7	3,1	5,6	8,3

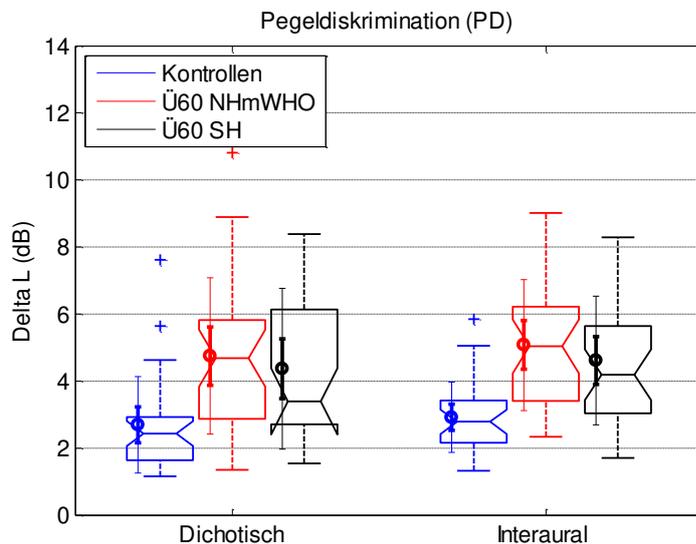


Abbildung 3.8: Pegeldiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der Pegeldiskriminationsschwellen ΔL beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als Diskriminationsschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet.

Die Rangfolge und das Signifikanzverhalten der JNDs stellten sich in der *interauralen* Präsentationsart identisch zu den dichotisch ermittelten Pegeldiskriminationsschwellen dar. Im Unterschied zur Tondauerdiskrimination fanden sich bei der interauralen Pegeldiskrimination allerdings stets geringfügig höhere Durchschnittsdiskriminationsschwellen im Vergleich zur dichotischen Präsentationsart (im Mittel 2,9dB beim Kontrollkollektiv, 5,1dB beim normalhörenden

und 4,6dB beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv). Wiederum zeigte sich eine mit dem Alter und zumindest in der dichotischen Präsentationsart auch mit der Schwerhörigkeit zunehmende Standardabweichung und Streuung der Ergebnisse.

Tabelle 3.20: Signifikanzanalyse zur Pegeldiskrimination im LIPP-Test

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

Präsentationsart	Globaler Test	Paarweise Gruppenvergleiche		
	ANOVA	Kontrollen vs. Ü60 NH _{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Kontrollen vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH _{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
Dichotisch	< 0,001*	< 0,001*	0,0077*	0,76 / 0,35
Interaural	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001*	0,54 / 0,19

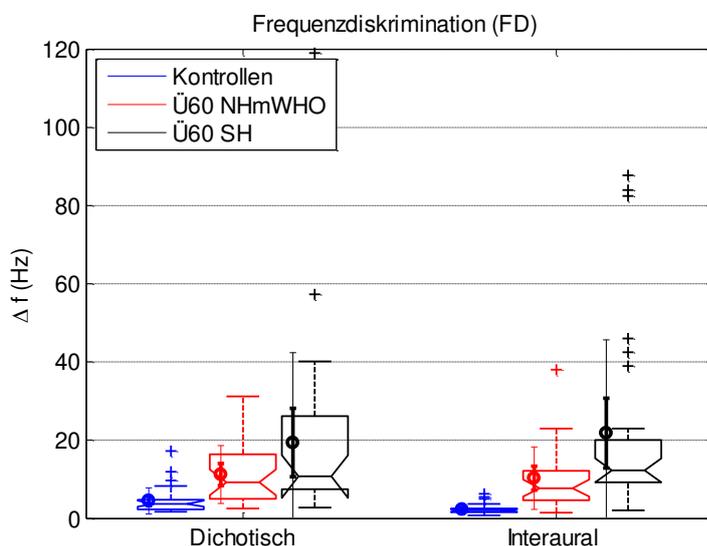


Abbildung 3.9: Frequenzdiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der Frequenzdiskriminationsschwellen Δf beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als Diskriminationsschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet.

Bei der *Frequenzdiskrimination (Testmodus FD)* konnte das Kontrollkollektiv ebenfalls die besten mittleren Diskriminationsschwellen für sich verbuchen. Wie in **Abbildung 3.9** und in **Tabelle 3.21** ersichtlich imponierte in diesem Testmodus im Gegensatz zu den beiden vorgenannten ein Anstieg der durchschnittlichen Diskriminationsschwellen vom Kontrollkollektiv über das normalhörende bis hin zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv. In der *dichotischen* Präsentationsart war es den Kontrollpersonen möglich, im Mittel Frequenzunterschiede bis 4,5Hz wahrzunehmen; bei den

Probanden des normalhörenden und des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs lagen diese Schwellen mit 11,3Hz bzw. 19,3Hz merklich höher. Auch bei den *interaural* ermittelten mittleren Diskriminationsschwellen war ein analoger Anstieg zu verzeichnen; die absoluten Durchschnittsdiskriminationsschwellen rangierten mit 2,3Hz, 10,3Hz bzw. 21,8Hz in einem vergleichbaren Größenbereich wie die dichotischen. Sowohl bei den dichotisch als auch bei den interaural erzielten Schwellen traten signifikante Gruppenunterschiede nur zwischen dem schwerhörigen Ü60-Subkollektiv und den beiden anderen Subkollektiven auf (im Falle der dichotischen Präsentationsart zwischen beiden Ü60-Subkollektiven nur altersbereinigt in der ANOCOVA), nicht aber zwischen den Messresultaten des Kontrollkollektivs und des normalhörenden Ü60-Subkollektivs (siehe **Tabelle 3.22**)

Etwa äquivalent zu den mittleren Diskriminationsschwellen fiel bei beiden Präsentationsarten ein deutlicher Anstieg der Standardabweichung und Streuung der Messresultate vom Kontrollkollektiv bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv auf.

Tabelle 3.21: Frequenzdiskriminationsschwellen im LIPP-Test

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Frequenzdiskriminationsschwellen in den Präsentationsarten dichotisch und interaural beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet. n: Anzahl der validen Schwellen. Alle Werte in Hz.

<u>Präsentationsart</u>	<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
Dichotisch	<i>Kontrollen</i>	30	4,5 ± 3,4	3,8	1,8	2,3	4,8	17,3
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	11,3 ± 7,4	9,3	2,5	5,0	16,0	31,3
	<i>Ü60 SH</i>	29	19,3 ± 23,0	10,8	2,8	7,5	26,0	119,0
Interaural	<i>Kontrollen</i>	30	2,3 ± 1,3	2,0	0,8	1,7	2,4	6,3
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	10,3 ± 8,0	7,8	1,5	4,8	12,1	38,0
	<i>Ü60 SH</i>	30	21,8 ± 23,8	12,3	2,0	9,3	19,5	87,8

Tabelle 3.22: Signifikanzanalyse zur Frequenzdiskrimination im LIPP-Test

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

<u>Präsentationsart</u>	<u>Globaler Test</u>	<u>Paarweise Gruppenvergleiche</u>		
	<i>ANOVA</i>	Kontrollen vs. Ü60 NH_{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Kontrollen vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH_{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
Dichotisch	< 0,001*	0,16	< 0,001*	0,077 / 0,0091*
Interaural	< 0,001*	0,096	< 0,001*	0,0090* / 0,011*

Da die Diskriminationsschwellen der drei LIPP-Testmodi aufgrund der unterschiedlichen getesteten Parameter und Präsentationsarten nicht unmittelbar untereinander vergleichbar waren, wurden die

mittleren Schwellen aller Testmodi und Präsentationsarten beider Ü60-Subkollektive in Bezug zur jeweiligen durchschnittlichen Diskriminationsschwelle des Kontrollkollektivs (Referenzschwelle) gesetzt. Auf diese Weise ließ sich das Schwellenverhalten anhand der *Steigerungsfaktoren zur Referenzschwelle* parameter- und präsentationsartübergreifend beurteilen (siehe **Tabelle 3.23**).

Tabelle 3.23: Steigerungsfaktoren der Diskriminationsschwellen der Ü60-Subkollektive im Vergleich zur Referenzschwelle

Als Referenzschwelle wurde die jeweils entsprechende Diskriminationsschwelle des Kontrollkollektivs verwendet. Ü60 NHmWHO: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv.

<u>Präsentationsart</u>	<u>Ü60 NH_mWHO</u>			<u>Ü60 SH</u>		
	<u>DD</u>	<u>PD</u>	<u>FD</u>	<u>DD</u>	<u>PD</u>	<u>FD</u>
Dichotisch	1,5	1,7	2,5	1,5	1,6	4,3
Interaural	1,8	1,8	4,5	1,8	1,6	9,5

Bei beiden Präsentationsarten stellte sich in beiden Ü60-Subkollektiven ein nahezu identischer Anstieg der mittleren Tondauer- und Pegeldiskriminationsschwelle im Verhältnis zur Referenzschwelle des Kontrollkollektivs dar (Steigerungsfaktoren 1,5 bis 1,8); es zeigte sich allenfalls eine Tendenz zu höheren Steigerungsfaktoren bei der interauralen Präsentation. Stärker hingegen fiel der Anstieg der Schwellen beider Ü60-Subkollektive bei der Frequenzdiskrimination aus; hier nahmen die Schwellen um das 2,5- bis 9,5-fache im Vergleich zur Referenzschwelle zu, wobei das schwerhörige Ü60-Subkollektiv aufgrund der o.g. höheren Absolutschwellen jeweils die höheren Steigerungsfaktoren aufwies. Die interaurale Präsentationsart zeigte bei der Frequenzdiskrimination etwa doppelt so große Steigerungsfaktoren wie die dichotische.

Die Ergebnisse des LIPP-Tests ließen sich damit wie folgt zusammenfassen:

- Beim Vergleich der unterschiedlichen *Testparameter* zeigte sich in der Tondauer- und der Pegeldiskrimination ein signifikanter Anstieg der Diskriminationsschwellen nur zwischen Kontrollkollektiv und Ü60-Kollektiv, nicht aber zwischen den beiden Ü60-Subkollektiven, bei der Frequenzdiskrimination dagegen nur zwischen den normalhörenden Subkollektiven (Kontrollen bzw. normalhörendes Ü60-Subkollektiv) und dem schwerhörigem Ü60-Subkollektiv, auch wenn eine deutliche Tendenz zu höheren Schwellen des normalhörenden Ü60-Subkollektivs im Vergleich zum Kontrollkollektiv ersichtlich war. Tondauer- und Pegeldiskriminationsschwellen beider Ü60-Subkollektive wiesen etwa dieselben Steigerungsfaktoren zur Referenzschwelle des Kontrollkollektivs auf; dieser Steigerungsfaktor lag bei der Frequenzdiskriminationsschwelle deutlich höher.
- Beim Vergleich beider *Präsentationsarten* war kein einheitliches Verhalten der entsprechenden Absolutschwellen erkennbar (DD: dichotische > interaurale, PD:

dichotische < interaurale, FD: dichotische ~ interaurale Schwellen). Beim Vergleich beider Präsentationsarten im jeweils selben Testmodus ergab sich bei Tondauer- und Pegeldiskrimination allenfalls eine Tendenz zu größeren Steigerungsfaktoren bei der interauralen Darbietung. Hingegen imponierte bei der Frequenzdiskrimination ein etwa doppelt so großer Faktor bei der interauralen Präsentationsart wie bei der dichotischen.

- Die anhand der Standardabweichung bemessene *Streuung* der Schwellen nahm testparameter- und präsentationsartübergreifend vom Kontrollkollektiv zum Ü60-Kollektiv und in fast allen Fällen vom normalhörenden zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv zu.

3.2.3 Ergebnisse der objektiven Messmethoden

3.2.3.1 DPOAE-Schwellen

An dieser Stelle werden - wie in 2.7.2 erläutert - nur die DPOAE-Schwellen bei den Frequenzen 1500Hz bis 4000Hz ausgewertet. Die daraus abgeleitete objektive DPOAE-Hörschwellenschätzung für 2, 4, 6 und 8kHz findet Berücksichtigung in Kapitel 3.3.4.

Da der Nachweis von DPOAE nur bis zu einem Hörverlust von ca. 50dB HL möglich ist (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011), liefert die Berechnung der Lagemaße für die DPOAE-Schwellen tendenziell zu niedrige Werte, insbesondere bei den beiden Ü60-Subkollektiven mit ihren im Vergleich zum Kontrollkollektiv höheren Hörverlusten und dadurch einem größeren zu erwartenden Anteil nicht messbarer DPOAE-Schwellen. Um dieser Verzerrung der Lagemaße Rechnung zu tragen, wurden die DPOAE-Schwellen in zwei Schritten ausgewertet.

Tabelle 3.24: Anzahl und Anteil valider DPOAE-Schwellen

Absolute Anzahlen bzw. Anteile an den 30 pro Subkollektiv, Seite und Frequenz durchgeführten DPOAE-Messungen (*kursiv*). Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv.

Subkollektiv	Linkes Ohr				Rechtes Ohr			
	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz
Kontrollen	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	30 (100%)	29 (97%)	29 (97%)	30 (100%)	30 (100%)
Ü60 NH_{mWHO}	28 (93%)	27 (90%)	28 (93%)	28 (93%)	29 (97%)	29 (97%)	28 (93%)	29 (97%)
Ü60 SH	26 (87%)	22 (73%)	17 (57%)	14 (47%)	23 (77%)	20 (67%)	17 (57%)	17 (57%)

(1) Zur Einschätzung der Relevanz o.g. physiologischer Messlimitierungen wurde in einem ersten Schritt der Anteil valide ermittelbarer Schwellen an allen durchgeführten DPOAE-Messungen nach Subkollektiv, Seite und Frequenz getrennt bestimmt (siehe **Tabelle 3.24**). Insgesamt nahm der Anteil valider DPOAE-Schwellen bei den Ü60-Subkollektiven frequenzübergreifend im Vergleich

zum Kontrollkollektiv ab. Zudem sank der Anteil valider Schwellen in den hohen Frequenzen beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv aufgrund der in diesem Bereich hohen Hörverluste erheblich. Rechtes und linkes Ohr zeigten dieselben Tendenzen.

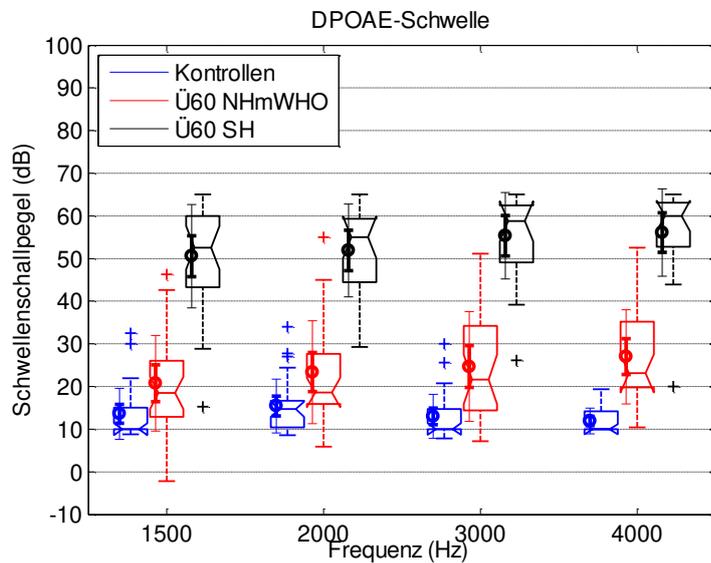


Abbildung 3.10: DPOAE-Schwellen bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der DPOAE-Schwellen beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als DPOAE-Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der Einzelschwellen von rechtem und linkem Ohr verwendet.

(2) In einem zweiten Schritt erfolgte die frequenzgetrennte Berechnung der Lagemaße für die Studienteilnehmer mit validen DPOAE-Schwellen auf mindestens einer Seite (siehe **Abbildung 3.10** und **Tabelle 3.25**). Entsprechend dem besten Hörvermögen lagen die DPOAE-Schwellen des Kontrollkollektivs bei allen Frequenzen am niedrigsten. Im gesamten berücksichtigten Frequenzbereich betrug der zur Auslösung einer messbaren DPOAE notwendige Schwellenschallpegel L_2 in diesem Subkollektiv jeweils durchschnittlich 12dB SPL bis 15dB SPL. Die DPOAE-Schwellen des normalhörenden Ü60-Subkollektivs rangierten in einem höheren Bereich und stiegen sukzessive von im Mittel knapp 21dB SPL bei 1500Hz auf 27dB SPL bei 4000Hz an. Eine vergleichbare DPOAE-Schwellenzunahme mit steigender Frequenz wies auch das schwerhörige Ü60-Subkollektiv auf, dessen DPOAE-Schwellen jedoch in einem deutlich höheren absoluten L_2 -Pegelbereich von knapp 51dB SPL bis 56dB SPL nachgewiesen werden konnten. Die maximalen bei allen Frequenzen ermittelten DPOAE-Schwellen lagen mit 65dB SPL ebenfalls bei letztgenanntem Subkollektiv vor und waren durch den im Studienprotokoll festgelegten maximalen L_2 -Pegel bedingt. Über alle Frequenzen hinweg lagen statisch signifikante Unterschiede zwischen

den DPOAE-Schwellen des Kontrollkollektivs und des normalhörendem Ü60-Subkollektiv bzw. denen des normalhörenden und des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs vor (siehe **Tabelle 3.26**).

Tabelle 3.25: DPOAE-Schwellen bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der DPOAE-Schwellen (in dB SPL) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als DPOAE-Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelschwellen von rechtem und linkem Ohr verwendet. f: Frequenz. n: Anzahl der validen Schwellen.

f (Hz)	Subkollektiv	n	MW ± SD	Median	Minimum	0,25- Quantil	0,75- Quantil	Maximum
1500	<i>Kontrollen</i>	30	13,6 ± 6,0	10,0	8,8	10,0	14,9	32,5
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	20,8 ± 11,2	18,5	-2,2	13,0	25,0	46,3
	<i>Ü60 SH</i>	27	50,6 ± 12,1	52,5	15,3	44,2	60,0	65,0
2000	<i>Kontrollen</i>	30	15,4 ± 6,3	14,7	8,6	10,5	16,6	34,0
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	23,4 ± 12,1	18,6	5,9	16,0	27,5	55,0
	<i>Ü60 SH</i>	23	51,9 ± 10,9	55,0	29,2	44,9	58,8	65,0
3000	<i>Kontrollen</i>	30	13,0 ± 5,2	10,0	7,8	10,0	14,5	30,0
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	24,7 ± 12,8	21,7	7,2	14,5	34,2	51,2
	<i>Ü60 SH</i>	20	55,3 ± 10,1	58,8	26,1	49,5	62,5	65,0
4000	<i>Kontrollen</i>	30	11,9 ± 3,0	10,0	10,0	10,0	13,9	19,4
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	27,0 ± 11,1	23,1	10,4	20,0	34,2	52,5
	<i>Ü60 SH</i>	21	56,1 ± 10,2	60,0	20,0	53,4	62,5	65,0

Insgesamt konnte trotz hörverlustbedingter Messlimitationen und des dadurch vor allem beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv erheblich sinkenden Anteils valider Schwellen mit entsprechender Schwellenunterschätzung ein signifikanter Anstieg der DPOAE-Schwellen vom Kontrollkollektiv über das normalhörende bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv nachgewiesen werden.

Tabelle 3.26: Signifikanzanalyse zu den DPOAE-Schwellen

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

Frequenz (Hz)	Globaler Test	Paarweise Gruppenvergleiche	
	<i>ANOVA</i>	Kontrollen vs. Ü60 NH _{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH _{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
1500	< 0,001*	0,021*	< 0,001* / < 0,001*
2000	< 0,001*	0,0085*	< 0,001* / < 0,001*
3000	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001* / < 0,001*
4000	< 0,001*	< 0,001*	< 0,001* / < 0,001*

Problematisch an dieser Auswertung erschien jedoch, dass sich die tonaudiometrischen Hörschwellen des Kontrollkollektivs und des normalhörenden Ü60-Subkollektivs bereits in den für die DPOAE-Schwellen relevanten Frequenzen von 1kHz bis 4kHz offensichtlich zu Ungunsten des Ü60-Subkollektivs unterschieden (siehe 3.1.2). Obwohl das Hörvermögen beider Kollektive gemäß modifizierter WHO-Klassifikation als normal eingestuft wurde, waren die o.g. Schwellenanstiege

damit nicht sicher rein auf Alterseffekte, sondern möglicherweise auch auf Schwerhörigkeitseffekte des normalhörenden Ü60-Subkollektivs zurückzuführen. Interessehalber wurde daher bei der DPOAE-Schwellenauswertung ausnahmsweise ein weiteres Subkollektiv innerhalb des normalhörenden Ü60-Subkollektivs selektiert, dessen тонаudiometrischer Hörverlust maximal 15dB HL in den für die DPOAE-Schwellen relevanten Frequenzen 1kHz bis 4kHz betrug, wobei beide Ohren getrennt berücksichtigt wurden. Die Durchschnittshörschwelle des durch dieses strengere Kriterium selektierten Ü60-Sonderkollektivs (im Weiteren als subselektiertes normalhörendes Ü60-Subkollektiv bezeichnet) unterschied sich im DPOAE-relevanten Bereich 1kHz bis 4kHz nicht mehr wesentlich von der des Kontrollkollektivs (siehe der Übersicht halber in Anhang 7.4).

Tabelle 3.27: DPOAE-Schwellen des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs bei 1500, 2000, 3000 und 4000Hz

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der DPOAE-Schwellen (in dB SPL) beim subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 15dB_{1-4kHz}), das bei den DPOAE-relevanten тонаudiometrischen Frequenzen 1kHz bis 4kHz einen maximalen тонаudiometrischen Hörverlust von 15dB HL aufwies. Als DPOAE-Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelschwellen von rechtem und linkem Ohr verwendet. f: Frequenz. n: Anzahl der validen Schwellen.

<u>f (Hz)</u>	<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
1500	Ü60 15dB _{1-4kHz}	8	16,5 ± 7,4	13,9	8,0	12,0	20,8	29,1
2000	Ü60 15dB _{1-4kHz}	8	17,4 ± 6,0	17,0	11,3	11,9	20,1	27,2
3000	Ü60 15dB _{1-4kHz}	8	17,2 ± 5,5	15,8	9,7	14,4	19,3	25,6
4000	Ü60 15dB _{1-4kHz}	8	17,8 ± 5,8	16,3	10,4	14,2	22,6	26,9

Tabelle 3.28: Signifikanzanalyse zu den DPOAE-Schwellen bei strengerer Definition für normales Hörvermögen beim Ü60-Kollektiv

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 15dB_{1-4kHz}: Subselektiertes normalhörendes Ü60-Subkollektiv, das bei den DPOAE-relevanten тонаudiometrischen Frequenzen 1kHz bis 4kHz einen maximalen тонаudiometrischen Hörverlust von 15dB HL aufwies.; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

<u>Frequenz (Hz)</u>	<u>Globaler Test</u>	<u>Paarweise Gruppenvergleiche</u>	
	<i>ANOVA</i>	Kontrollen vs. Ü60 15dB_{1-4kHz} <i>Tukey HSD</i>	Ü60 15dB_{1-4kHz} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
1500	< 0,001*	0,71	< 0,001* / < 0,001*
2000	< 0,001*	0,82	< 0,001* / < 0,001*
3000	< 0,001*	0,31	< 0,001* / < 0,001*
4000	< 0,001*	0,086	< 0,001* / < 0,001*

In der analogen Auswertung der DPOAE-Schwellen konnten im Vergleich der Schwellen des Kontrollkollektivs mit denen des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden bei weiterhin signifikanten Unterschieden zwischen den Schwellen des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs und denen des

schwerhörigen Ü60-Subkollektivs (siehe **Tabelle 3.28**). Allerdings zeigte sich weiterhin frequenzübergreifend eine Tendenz zu höheren Schwellen des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs im Vergleich zu denen des Kontrollkollektivs (siehe **Tabelle 3.25** und **Tabelle 3.27**).

3.2.3.2 Hirnstammaudiometrie (BERA)

Die Interpeaklatenz zwischen den Wellen I und V (*IPL I-V*) als Korrelat der retrokochleären Schallverarbeitung bis einschließlich dem Hirnstamm unterschied sich zwischen Kontrollkollektiv und Ü60-Kollektiv signifikant, nicht jedoch zwischen beiden Ü60-Subkollektiven (siehe **Abbildung 3.11**, **Tabelle 3.29** und **Tabelle 3.30**). Im Durchschnitt betrug diese beim Kontrollkollektiv 4,01ms und stieg beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv auf im Mittel 4,14ms, beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv auf 4,22ms. Bei einer jeweils ähnlichen Standardabweichung aller Subkollektive von ca. 0,2ms differierte die kürzeste und längste innerhalb eines Subkollektivs gemessene *IPL I-V* um 0,67ms (Kontrollkollektiv) bis 0,93ms (normalhörendes Ü60-Subkollektiv).

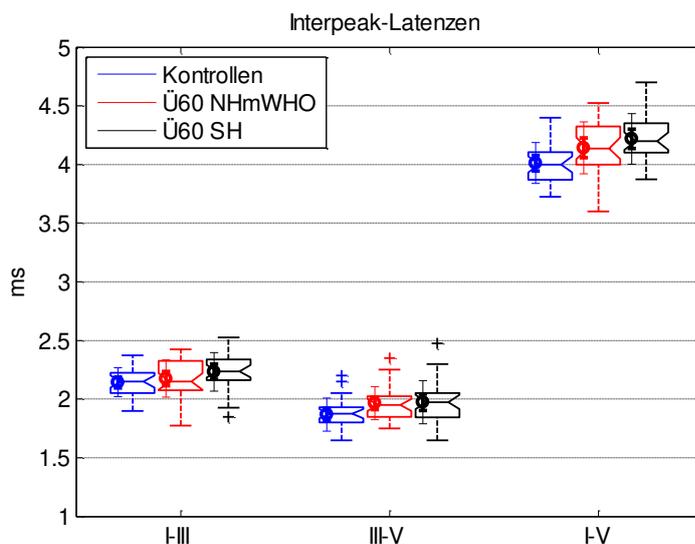


Abbildung 3.11: Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V in der BERA

Mittelwert (Kreis) mit 95%-Konfidenzintervall (dicker Whisker) und Standardabweichung (dünner Whisker) bzw. Boxplots mit Median (Linie in der Box), dessen 95%-Konfidenzintervall (Einkerbung), 0,25- und 0,75-Quantil (Boxgrenzen), Bereich (Boxwhisker) und Ausreißern (+) der Interpeaklatenz I-III, III-V und I-V beim Kontrollkollektiv (blau), beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (rot) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (schwarz). Als jeweilige Interpeaklatenz eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der vier 80dB-Einzelmessungen von rechtem und linkem Ohr verwendet.

Zur genaueren Einordnung des beobachteten *IPL I-V*-Unterschieds zwischen den Subkollektiven erfolgte eine separate Analyse der Interpeaklatenzen zwischen Wellen I-III (*IPL I-III*) und zwischen Wellen III-V (*IPL III-V*). Bei der *IPL I-III* als Repräsentant der neuralen Schallverarbeitung im

Hörnerv bis zum Nucleus cochlearis fand sich bereits in der globalen Signifikanzanalyse kein relevanter Unterschied zwischen den drei Subkollektiven. Die Durchschnittswerte der Subkollektive lagen mit 2,14ms (Kontrollkollektiv), 2,18ms (normalhörendes) und 2,23ms (schwerhöriges Ü60-Subkollektiv) nahe beieinander, wobei trotz fehlender Signifikanz eine Tendenz zum Anstieg mit höherem Alter und ausgeprägterer Schwerhörigkeit ersichtlich war. Hingegen konnten bei der *IPL III-V*, die die Schallverarbeitung im Hirnstamm widerspiegelt, statistisch signifikante Mittelwertunterschiede zwischen dem Kontrollkollektiv und dem Ü60-Kollektiv, wiederum aber nicht zwischen den beiden Ü60-Subkollektiven nachgewiesen werden. Die beiden letzteren zeichneten sich durch eine identische durchschnittliche *IPL III-V* von 1,97ms aus, beim Kontrollkollektiv betrug diese im Mittel nur 1,87ms. Sowohl bei der *IPL I-III* als auch bei der *IPL III-V* rangierte die Standardabweichung in allen Subkollektiven zwischen 0,12ms und 0,18ms.

Tabelle 3.29: Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V in der BERA

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Interpeaklatenz (*IPL*) I-III, III-V und I-V beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) und beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als jeweilige *IPL* eines individuellen Studienteilnehmers wurde der Mittelwert der vier 80dB-Einzelmessungen beider Ohren verwendet. n: Anzahl der validen *IPLs*. Alle Werte in ms.

<u>IPL</u>	<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
I-III	<i>Kontrollen</i>	29	2,14 ± 0,12	2,15	1,90	2,05	2,23	2,38
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	30	2,18 ± 0,16	2,15	1,78	2,08	2,31	2,43
	<i>Ü60 SH</i>	28	2,23 ± 0,16	2,24	1,85	2,17	2,33	2,53
III-V	<i>Kontrollen</i>	29	1,87 ± 0,14	1,88	1,65	1,80	1,93	2,20
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	30	1,97 ± 0,14	1,95	1,75	1,86	2,02	2,35
	<i>Ü60 SH</i>	29	1,97 ± 0,18	1,98	1,65	1,85	2,05	2,48
I-V	<i>Kontrollen</i>	29	4,01 ± 0,17	4,00	3,73	3,88	4,10	4,40
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	30	4,14 ± 0,22	4,14	3,60	4,01	4,30	4,53
	<i>Ü60 SH</i>	28	4,22 ± 0,21	4,20	3,88	4,11	4,35	4,70

Tabelle 3.30: Signifikanzanalyse zu den BERA-Interpeaklatenzen I-III, III-V und I-V

p-Werte des globalen Tests und der Zweigruppenvergleiche. Zugrundeliegendes Signifikanzniveau $\alpha=5\%$. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. *Kursiv*: Verwendeter Signifikanztest. *: Signifikantes Ergebnis.

<u>Interpeaklatenz</u>	<u>Globaler Test</u>	<u>Paarweise Gruppenvergleiche</u>		
	<i>ANOVA</i>	Kontrollen vs. Ü60 NH_{mWHO} <i>Tukey HSD</i>	Kontrollen vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD</i>	Ü60 NH_{mWHO} vs. Ü60 SH <i>Tukey HSD / ANOCOVA</i>
I-III	0,079	-	-	-
III-V	0,020*	0,0498*	0,032*	0,98 / 0,93
I-V	0,0010*	0,043*	< 0,001*	0,34 / 0,81

3.3 Korrelationsanalyse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Korrelationsanalyse für ausgewählte Messverfahren dargestellt. Eine Übersicht über die Spearman-Korrelationskoeffizienten für alle weiteren Messmethoden findet sich in Anhang 7.2.

3.3.1 Einflussfaktoren auf den HHIE-S-Score: Korrelation mit Alter, Tonschwellenaudiogramm (PTA) und OLSA

Das Ergebnis des HHIE-S wurde mit Probandenalter, Tonschwellenaudiogramm und Sprachaudiometrie korreliert, um zu überprüfen, ob diese in der klinischen Routine erfassten Parameter das subjektiv empfundene Hörhandicap hinreichend abbilden (siehe **Tabelle 3.31**). Als Sprachverständnistest wurde mit dem OLSA ein ausführliches, etabliertes Testverfahren gewählt, um möglichst exakte Angaben zum Einfluss des Sprachverständnisses auf das Hörhandicap treffen zu können; auf eine zusätzliche Korrelation des nur als kurzes Screening-Verfahren konzipierten SUN-Tests wurde verzichtet. Mit einem Spearman-Koeffizienten von 0,62 ergab sich beim Alter nur eine moderate Korrelation mit dem HHIE-S-Score, was sich mit der relativ breiten Streuung der HHIE-S-Einzelergebnisse in den beiden Ü60-Subkollektiven deckt. Der Durchschnittshörverlust im Tonschwellenaudiogramm bei den Frequenzen 500Hz bis 4000Hz beider Ohren (PTA 500-4000Hz) sowie das Ergebnis des OLSA hingegen wiesen mit Spearman-Koeffizienten von 0,71 bzw. 0,76 jeweils knapp starke Korrelationen zum HHIE-S-Score auf.

Tabelle 3.31: Korrelation des HHIE-S-Scores mit Alter, Tonschwellenaudiogramm und OLSA

Spearman-Korrelationskoeffizienten mit zugehörigen p-Werten. Als Ergebnis des Tonschwellenaudiogramms (PTA) bei einer Frequenz wurde der Mittelwert von rechtem und linkem Ohr verwendet. PTA 500-4000Hz: Durchschnittshörverlust bei den Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz beider Ohren, der auch für die Klassifizierung des Hörvermögens nach modifizierter WHO-Klassifikation herangezogen wurde. n: Anzahl der korrelierten Wertepaare. *: Signifikantes Ergebnis auf 5%-Signifikanzniveau.

Korrelation	n	Korrelationskoeffizient (Spearman)	p-Wert
HHIE-S - Alter	90	0,62	< 0,001*
HHIE-S - PTA 500-4000Hz	90	0,71	< 0,001*
HHIE-S - PTA 250Hz	90	0,40	< 0,001*
HHIE-S - PTA 500Hz	90	0,50	< 0,001*
HHIE-S - PTA 1000Hz	90	0,46	< 0,001*
HHIE-S - PTA 2000Hz	90	0,67	< 0,001*
HHIE-S - PTA 4000Hz	90	0,74	< 0,001*
HHIE-S - PTA 6000Hz	90	0,69	< 0,001*
HHIE-S - PTA 8000Hz	90	0,68	< 0,001*
HHIE-S - OLSA	90	0,76	< 0,001*

Zusätzlich wurden bei der Tonschwellenaudiometrie die untersuchten Einzelfrequenzen mit dem HHIE-S-Score korreliert. Insgesamt ergaben sich mit Ausnahme einer starken Korrelation bei

4000Hz (Spearman-Koeffizient 0,74) durchweg nur moderate Korrelationen mit Spearman-Koeffizienten von 0,40 bis 0,69. Im unteren Frequenzbereich von 250Hz bis 1000Hz lagen aufgrund des hier in allen Subkollektiven geringen Hörverlustes tendenziell niedrigere Koeffizienten vor als in den höheren Messfrequenzen mit ihrer breiteren Hörverluststreuung.

Zur Analyse der Verteilung des HHIE-S-Scores in Bezug auf den stark korrelierenden PTA 500-4000Hz-Durchschnittshörverlust bzw. auf den stark korrelierenden OLSA wurden entsprechende Scatterplots erstellt (siehe **Abbildung 3.12**). Von besonderem Interesse war hierbei, ob für den PTA 500-4000Hz-Durchschnittshörverlust bzw. die OLSA-Sprachverständlichkeitsschwelle ein Grenzwert existiert, ab dem subjektiv ein Hörhandicap (d.h. HHIE-S-Score ≥ 10 Punkte) von den Befragten angegeben wird; ob also bereits mithilfe der Routinemessungen Tonschwellen- und Sprachaudiogramm zuverlässig Patienten mit relevantem Hörhandicap identifiziert werden können. Im Falle des PTA 500-4000Hz-Durchschnittshörverlustes konnte ein solcher Grenzwert anhand des Scatterplots am ehesten bei ca. 30dB HL festgesetzt werden, da erst ab hier eine größere Anzahl von Studienteilnehmern auch ein schwereres Hörhandicap aufwies. Beim OLSA lag der äquivalente Wert bei einer SVS L_{50} von -6dB SNR.

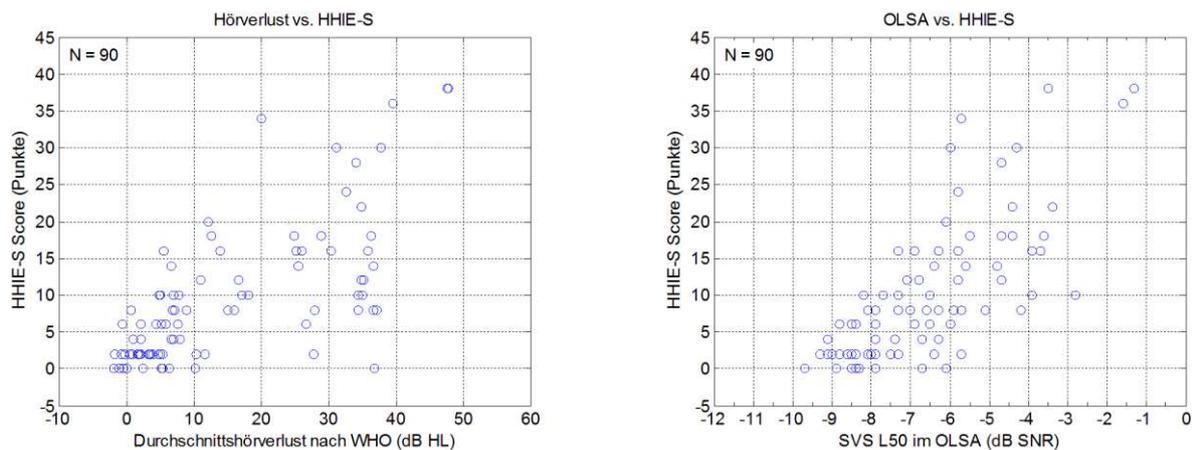


Abbildung 3.12: Zusammenhang zwischen HHIE-S und Durchschnittshörverlust 500-4000Hz bzw. OLSA

Scatterplots zum HHIE-S-Score in Abhängigkeit vom Durchschnittshörverlust beider Ohren bei den Frequenzen 500-4000Hz (PTA 500-4000Hz, links) bzw. OLSA (rechts). Als Grenzwert für einen relevanten Anstieg des Scores können anhand der Plots 30dB HL (PTA 500-4000Hz) bzw. -6dB SNR (OLSA) geschätzt werden.

Da ein aussagekräftiger Grenzwert möglichst scharf zwischen subjektiv unbeeinträchtigten Personen und Personen mit (leichtem oder schwerem) Handicap trennen soll, wurde das Gesamtprobandenkollektiv anhand dieser ermittelten Grenzwerte in jeweils zwei Gruppen eingeteilt; anschließend wurde die Verteilung der Handicapschweregrade beider Gruppen miteinander verglichen (siehe **Tabelle 3.32** und **Abbildung 3.13**).

Tabelle 3.32: Verteilung der Handicapschweregrade, eingeteilt nach den ermittelten Grenzwerten für den Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz bzw. die OLSA-Sprachverständlichkeitsschwelle

Anhand der im Scatterplot ermittelten Grenzwerte 30dB HL für den Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz beider Ohren (PTA 500-4000Hz) bzw. -6dB SNR für die OLSA-SVS L_{50} und deren Kombination erfolgte jeweils eine Einteilung des Studienkollektivs in zwei Gruppen und eine Verteilungsanalyse der Handicapschweregrade innerhalb dieser Gruppen. Die Tabelle zeigt absolute Häufigkeiten und Prozentsätze (*kursiv*, bezogen auf die jeweilige Spalte).

HHIE-S	PTA 500-4000Hz		OLSA		Kombination	
	< 30dB HL	≥ 30dB HL	< -6dB SNR	≥ -6dB SNR	PTA 500-4000Hz < 30dB HL und/oder OLSA < -6dB SNR	PTA 500-4000Hz ≥ 30dB HL und OLSA ≥ -6dB SNR
Kein Handicap (0-8 Punkte)	49 <i>(71%)</i>	4 <i>(19%)</i>	47 <i>(78%)</i>	6 <i>(20%)</i>	50 <i>(69%)</i>	3 <i>(17%)</i>
Leichtes Handicap (10-24 Punkte)	19 <i>(28%)</i>	11 <i>(52%)</i>	13 <i>(22%)</i>	17 <i>(57%)</i>	21 <i>(29%)</i>	9 <i>(50%)</i>
Schweres Handicap (26-40 Punkte)	1 <i>(1%)</i>	6 <i>(29%)</i>	0 <i>(0%)</i>	7 <i>(23%)</i>	1 <i>(1%)</i>	6 <i>(33%)</i>
Alle	69 <i>(100%)</i>	21 <i>(100%)</i>	60 <i>(100%)</i>	30 <i>(100%)</i>	72 <i>(100%)</i>	18 <i>(100%)</i>

In der jeweiligen Gruppe mit dem besseren Hörvermögen (d.h. PTA-Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz <30 dB HL bzw. SVS L_{50} beim OLSA <-6dB SNR) verneinten etwa drei Viertel der Studienteilnehmer ein subjektives Hörhandicap, wohingegen jeweils etwa ein Viertel der Studienteilnehmer ein Handicap angab, das bei praktisch allen Probanden leicht ausgeprägt war. In der jeweiligen Gruppe mit dem schlechteren Hörvermögen hingegen (d.h. PTA-Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz ≥30 dB HL bzw. SVS L_{50} beim OLSA ≥-6dB SNR) konnte mithilfe des HHIE-S in gut der Hälfte der Fälle ein leichtes, in etwa einem Viertel der Fälle ein schweres Hörhandicap identifiziert werden. Bei etwa jedem fünften Teilnehmer fehlten im HHIE-S Hinweise auf ein Hörhandicap. Auch die Kombination beider Grenzwertkriterien (d.h. die Einteilung des Kollektivs in Personen mit PTA-Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz ≥30 dB HL *und* SVS L_{50} beim OLSA ≥-6dB SNR (=schlechter hörende Gruppe) im Vergleich zu allen übrigen Kombinationsmöglichkeiten (=besser hörende Gruppe)) lieferte in der besser hörenden Gruppe eine sehr ähnliche Verteilung der Handicapschweregrade wie die Einteilung anhand der Einzelgrenzwerte. In der schlechter hörenden Gruppe ergaben sich hier ein allenfalls diskret niedrigerer Anteil von Personen ohne Hörhandicap bzw. ein allenfalls diskret höherer Anteil von Studienteilnehmern mit schwerem Handicap.

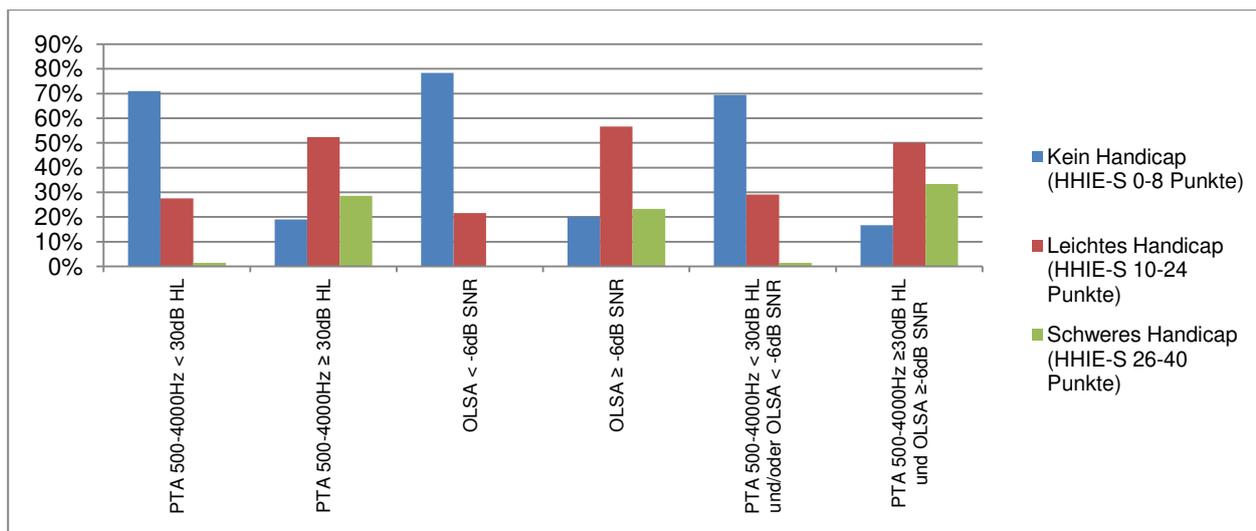


Abbildung 3.13: Prozentuale Verteilung der Hörhandicapschweregrade, eingeteilt nach den ermittelten Grenzwerten für den Durchschnittshörverlust bei 500-4000Hz bzw. die OLSA-Sprachverständlichkeitsschwelle Grafik zu **Tabelle 3.32**. PTA 500-4000Hz: Durchschnittshörverlust beider Ohren bei 500-4000Hz.

3.3.2 Korrelation von OLSA und SUN-Test

Im Rahmen dieser Studie wurden mit dem Oldenburger Satztest und dem SUN-Test ein etabliertes Messinstrument und ein neuerer Screening-Test zur Evaluation des Sprachverständnisses im Störgeräusch eingesetzt. Zur Überprüfung, ob der kurze SUN-Test die Ergebnisse des deutlich längeren und damit für Arzt und Patienten aufwändigeren OLSA bereits hinreichend wiedergibt, ob also eine Anwendbarkeit des SUN-Tests als zeitsparender Ersatz für den OLSA denkbar wäre, wurden die Ergebnisse beider Tests miteinander korreliert. Es fand sich betragsmäßig jedoch nur eine moderate Korrelation zwischen beiden Tests (siehe **Tabelle 3.33**).

Tabelle 3.33: Korrelation vom OLSA mit dem SUN-Test

Spearman-Korrelationskoeffizient mit zugehörigem p-Wert. Als Ergebnis des OLSA wurde das Ergebnis der gewerteten zweiten Testliste verwendet, als Ergebnis des SUN-Tests eines individuellen Studienteilnehmers der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr. n: Anzahl der korrelierten Wertepaare. *: Signifikantes Ergebnis auf 5%-Signifikanzniveau.

<u>Korrelation</u>	<u>n</u>	<u>Korrelationskoeffizient (Spearman)</u>	<u>p-Wert</u>
OLSA - SUN	90	-0,68	< 0,001*

3.3.3 Leipziger Inventar für Patienten-Psychoakustik: Korrelation mit PTA 1kHz, BERA III-V und OLSA

Die LIPP-Signale wurden bei einem Pegel von 40dB über der individuellen Hörschwelle (40dB SL) dargeboten (siehe **2.6.3**). Damit sollte für alle Probanden unabhängig von ihrem peripheren Hörvermögen eine identische subjektive Lautheit des Signals gewährleistet werden; Unterschiede in

den Messresultaten sollten primär durch die zentrale Diskriminationsfähigkeit bedingt sein, nicht schon allein durch die variierende subjektive Lautheit des Signals. Für die Einstellung des Signalpegels war die PTA-Schwelle bei 1kHz ausschlaggebend, da das Testsignal ebenfalls bei dieser Frequenz präsentiert wurde. Um nachträglich zu prüfen, ob durch die Darbietung der LIPP-Signale bei 40dB SL der individuelle Hörverlust bei 1kHz ausreichend kompensiert werden konnte, wurde die entsprechende *PTA-Schwelle mit den LIPP-Testergebnissen korreliert*. Eine hohe Korrelation wäre in diesem Falle ein Anhalt dafür, dass die Messresultate primär durch das periphere Hörvermögen und nicht - wie angestrebt - durch die zentrale Diskriminationsfähigkeit beeinflusst wurden. In fünf von sechs Testmodi und Präsentationsarten fanden sich sehr schwache bis schwache Korrelationen zwischen der subjektiven Hörschwelle bei 1kHz und den LIPP-Ergebnissen, wobei diese bei der Pegeldiskrimination nicht signifikant waren; lediglich bei der interauralen Frequenzdiskrimination ergab sich eine knapp moderate Korrelation (siehe **Tabelle 3.34 Abschnitt A**)

Tabelle 3.34: Korrelation des LIPP mit der 1kHz-Hörschwelle, der BERA und dem OLSA

Spearman-Koeffizienten mit zugehörigen p-Werten für die Korrelationen der LIPP-Ergebnisse mit der Hörschwelle bei 1kHz (PTA 1kHz; **Tabellenabschnitt A**), die Korrelationen der interauralen LIPP-Tests mit der BERA-Interpeaklatenz III-V (BERA III-V; **Tabellenabschnitt B**) und die Korrelationen der dichotischen LIPP-Tests mit dem OLSA (**Tabellenabschnitt C**). Als Ergebnis der Hörschwelle bei 1kHz und der BERA-Interpeaklatenz III-V wurde jeweils der Mittelwert von rechtem und linkem Ohr verwendet, dies gilt mit Ausnahme der rechtsseitigen dichotischen Testergebnisse (unterste drei Zeilen) auch für den LIPP. Als Ergebnis des OLSA zählte das Resultat der gewerteten zweiten Testliste. DD/ PD/ FD: Testmodus Tondauer-/ Pegel-/ Frequenzdiskrimination beim LIPP. n: Anzahl der korrelierten Wertepaare. *: Signifikantes Ergebnis auf 5%-Signifikanzniveau.

	<u>Korrelation</u>	<u>n</u>	<u>Korrelationskoeffizient (Spearman)</u>	<u>p-Wert</u>
(A)	DD dichotisch - PTA 1kHz	87	0,26	0,016*
	PD dichotisch - PTA 1kHz	90	0,18	0,09
	FD dichotisch - PTA 1kHz	88	0,36	< 0,001*
	DD interaural - PTA 1kHz	68	0,30	0,014*
	PD interaural - PTA 1kHz	90	0,11	0,30
	FD interaural - PTA 1kHz	89	0,42	< 0,001*
(B)	DD interaural - BERA III-V	80	0,26	0,032*
	PD interaural - BERA III-V	88	0,13	0,22
	FD interaural - BERA III-V	88	0,23	0,032*
(C)	DD dichotisch - OLSA	87	0,40	< 0,001*
	PD dichotisch - OLSA	90	0,47	< 0,001*
	FD dichotisch - OLSA	88	0,69	< 0,001*
	DD dichotisch rechts - OLSA	75	0,23	0,043*
	PD dichotisch rechts - OLSA	85	0,37	< 0,001*
	FD dichotisch rechts - OLSA	88	0,63	< 0,001*

Sowohl die interaurale Präsentationsart des LIPP als auch die Interpeaklatenz III-V bei der BERA repräsentieren Schallverarbeitungsprozesse im Hirnstamm (siehe **1.1.2.2.1** und **1.1.2.2.3**). Es wurden daher entsprechende *Korrelationen aller interauralen LIPP-Testmodi mit der BERA-*

Interpeaklatenz III-V durchgeführt, um Hinweise auf mögliche Äquivalenz der Aussagekraft beider Messverfahren zu erhalten. In allen Fällen imponierten jedoch nur eine sehr schwache bis schwache Korrelation zwischen beiden Testverfahren (Spearman-Koeffizienten 0,13 bis 0,26), die im Falle der interauralen Pegeldiskrimination zudem nicht signifikant war (siehe **Tabelle 3.34 Abschnitt B**).

In ähnlicher Intention wurden die *Korrelationen der Ergebnisse aller dichotischen LIPP-Testmodi mit den OLSA-Resultaten* berechnet (siehe **Tabelle 3.34 Abschnitt C**); in diesem Falle war jedoch die Äquivalenz zweier subjektiver Testverfahren für Schallprozessierung im Großhirn von Interesse (siehe **1.1.2.2.2** und **1.1.2.2.3**). Die Resultate aller drei dichotischen LIPP-Testmodi korrelierten jeweils moderat mit dem OLSA, wobei die dichotische Frequenzdiskrimination mit 0,69 den höchsten Spearman-Koeffizienten aufwies. Aufgrund der linksseitigen Lokalisation der Sprachzentren im Großhirn und der Selektivität der dichotischen Testprozeduren für kontralaterale Schallverarbeitungsprozesse im Großhirn (siehe **1.1.2.2.3**) wurden zusätzlich Korrelationen der rechtsseitigen dichotischen LIPP-Ergebnisse aller Testmodi mit dem OLSA durchgeführt. Im Vergleich zu den entsprechenden o.g. bilateralen Korrelationen lagen hier geringere Spearman-Koeffizienten vor: Im Falle der rechtsseitigen dichotischen Tondauer- und Pegeldiskrimination ergab sich jeweils eine schwache, bei der Frequenzdiskrimination wiederum eine moderate Korrelation mit dem OLSA.

3.3.4 Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellschätzung: Korrelation mit subjektivem Tonschwellenaudiogramm (PTA)

Die objektive Hörschwellschätzung mittels DPOAE soll möglichst äquivalente Resultate zu den in der klinischen Routine erhobenen subjektiven Hörschwellen der Reintonaudiometrie erzielen. Um dies zu evaluieren, wurden die mittels vollständigem COAST-Algorithmus (siehe **2.7.2**) geschätzten objektiven Hörschwellen mit den subjektiven Tonschwellen der Reintonaudiometrie (PTA) verglichen. Dies geschah in einem breiten Frequenzbereich von 2kHz bis 8kHz; die aufgrund von Gehörgangsresonanzen problematischen Frequenzen 6kHz und 8kHz wurden absichtlich in die Analyse miteingeschlossen, um die Relevanz dieses Phänomens untersuchen zu können. Es wurden wie bei allen Korrelationsanalysen paarweise vorhandene Werte berücksichtigt. Ausnahmsweise wurden die Mittelwert- und Korrelationsberechnungen jedoch seitengetreunt für linkes und rechtes Ohr durchgeführt, um die seitengetreunte Übereinstimmung der subjektiven und objektiven Tonschwelle wie für die klinische Routine relevant unmittelbar ohne zusätzlichen Mittelungsschritt zu prüfen.

Die frequenz- und subkollektivübergreifend berechneten *Spearman-Koeffizienten* zeigten sowohl bei linkem als auch bei rechtem Ohr eine starke Korrelation der Resultate beider Schwellenermittlungsverfahren (siehe **Tabelle 3.35**).

Tabelle 3.35: Korrelation von subjektiver und objektiver Hörschwelle

Frequenz- und subkollektivübergreifende Spearman-Korrelationskoeffizienten zwischen subjektiver Tonschwelle der Reintonaudiometrie (PTA) und objektiver Hörschwellenschätzung der DPOAE mit zugehörigen p-Werten, nach Seite getrennt. Berücksichtigt wurden nur paarweise vorhandene Ergebnisse beider Schwellenermittlungsverfahren bei 2, 4, 6 und 8kHz. n: Anzahl der korrelierten Wertepaare. *: Signifikantes Ergebnis auf 5%-Signifikanzniveau.

<u>Korrelation</u>	<u>n</u>	<u>Korrelationskoeffizient (Spearman)</u>	<u>p-Wert</u>
Linke Ohren: PTA - DPOAE	248	0,70	< 0,001*
Rechte Ohren: PTA - DPOAE	255	0,73	< 0,001*

Eine starke Korrelation zwischen den Wertepaaren impliziert noch nicht automatisch eine gute Übereinstimmung der Absolutwerte von subjektiver und objektiver Hörschwellenermittlung (Grouven *et al.* 2007). Gerade deren Übereinstimmung ist jedoch relevant für die Anwendbarkeit der objektiven DPOAE-Hörschwellenschätzung als Ersatz für die subjektive Tonschwellenermittlung im klinischen Alltag. Um hier einen Überblick zu gewinnen, wurden daher zunächst subkollektiv-, frequenz- und seitengetrennt die *Mittelwerte von subjektiver und objektiver Hörschwellenermittlung* verglichen (siehe **Tabelle 3.36** und **Abbildung 3.14**).

Tabelle 3.36: Durchschnittliche subjektive und objektive Hörschwellen der drei Subkollektive

Mittelwerte der subjektiven Hörschwelle der Reintonaudiometrie (PTA) und der objektiven Hörschwellenschätzung mittels DPOAE, getrennt nach Subkollektiv, Seite und Frequenz. Berücksichtigt wurden nur paarweise vorhandene Messresultate. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. n: Anzahl der Probanden des jeweiligen Subkollektivs mit validen Messwerten in beiden Messverfahren, nach Seite und Frequenz getrennt. Alle Hörschwellen in dB HL.

<u>Subkollektiv</u>	<u>Messmethode/ n</u>	<u>Linkes Ohr</u>				<u>Rechtes Ohr</u>			
		<u>2000Hz</u>	<u>4000Hz</u>	<u>6000Hz</u>	<u>8000Hz</u>	<u>2000Hz</u>	<u>4000Hz</u>	<u>6000Hz</u>	<u>8000Hz</u>
Kontrollen	PTA	1,8	1,5	6,9	1,3	3,8	1,9	10,2	2,7
	DPOAE	4,7	3,4	6,3	8,6	5,7	2,8	6,5	8,7
	n	30	30	30	30	29	30	30	30
Ü60 NH _{mWHO}	PTA	7,9	19,0	24,1	16,6	7,9	18,3	22,6	31,5
	DPOAE	14,2	21,6	24,9	22,2	13,5	17,1	21,4	26,4
	n	27	28	23	8	29	29	22	13
Ü60 SH	PTA	32,8	49,2	46,0	84,8	30,5	51,5	67,0	62,8
	DPOAE	43,4	43,7	46,0	44,0	40,3	45,4	46,0	48,0
	n	22	14	2	4	20	17	1	5

Beim Kontrollkollektiv und beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv ergab sich insgesamt eine sehr gute Übereinstimmung von mittlerer absoluter subjektiver und objektiver Hörschwelle mit im Wesentlichen identischen Schwellenverläufen. Größere Abweichungen zwischen den Schwellenbestimmungsverfahren traten vor allem im höheren Frequenzbereich - bei 8kHz links

sowie 6kHz und 8kHz rechts - des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs auf. Der schon bei der Beurteilung der rohen DPOAE-Schwelle beobachtete deutlich sinkende Anteil valide ermittelbarer DPOAE mit zunehmendem Hörverlust spiegelte sich auch bei der DPOAE-Hörschwellenschätzung in der abnehmenden Anzahl paarweise vorhandener Messwerte (siehe n in der Tabelle) wider.

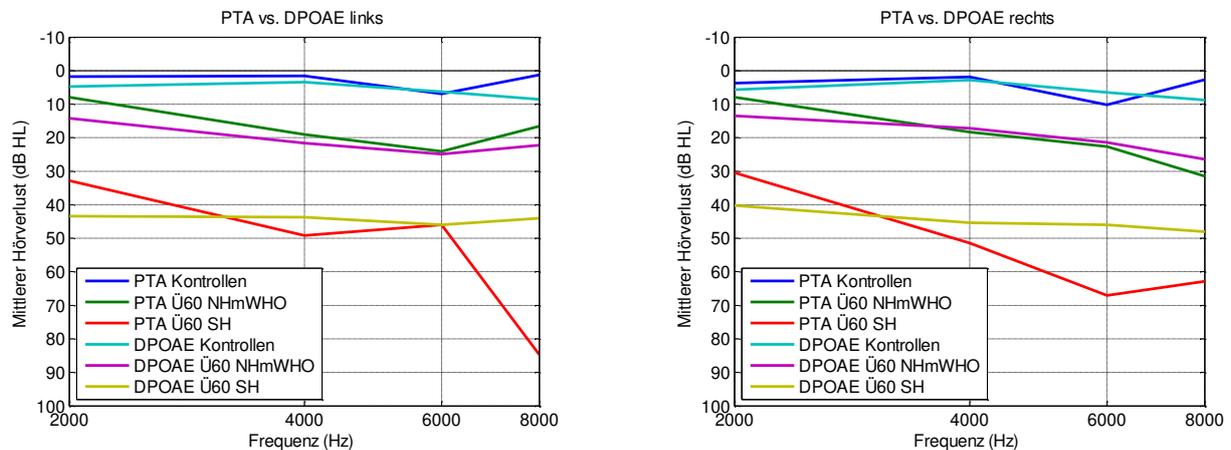


Abbildung 3.14: Durchschnittliche subjektive und objektive Hörschwellenverläufe der drei Subkollektive

Mittlerer subjektiver Hörschwellenverlauf der Reintonaudiometrie (PTA) und objektiver Hörschwellenverlauf der DPOAE-Hörschwellenschätzung, getrennt nach Subkollektiven, Seite und Frequenz. Berücksichtigt wurden nur paarweise vorhandene Messresultate. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv.

Es wurde zudem die *Differenz zwischen objektiver DPOAE-Hörschwellenschätzung und subjektiver Tonschwelle der Reintonaudiometrie bei den einzelnen Probanden* für alle paarweise vorhandenen Werte berechnet und in einem Gesamthistogramm dargestellt, um die Übereinstimmung der Absolutschwellen beim individuellen Probanden zu evaluieren (siehe **Abbildung 3.15**). Da aufgrund der Ähnlichkeit der o.g. seitengetrenten Korrelationskoeffizienten und der o.g. seitengetrenten Hörschwellenverläufe bei dieser Berechnung ebenfalls vergleichbare Werte für rechte und linke Ohren zu erwarten waren, wurde hier der besseren Übersichtlichkeit halber auf eine seitengetrennte Darstellung verzichtet. Über alle Subkollektive und Frequenzen hinweg fand sich beim individuellen Probanden am häufigsten eine leichte Überschätzung der Hörschwelle (d.h. eine zu schlechte Einschätzung) durch die DPOAE-Schwellenschätzung des COAST-Algorithmus in einem Bereich von >0 dB HL bis ≤ 5 dB HL im Vergleich zur subjektiven Schwelle der Reintonaudiometrie ($MW \pm SD$ über alle Kollektive und Frequenzen hinweg $1,6 \pm 11,0$ dB HL). Es konnte eine glockenförmige Abnahme der Häufigkeiten der Hörschwellendifferenzen um diesen Gipfel festgestellt werden. Die größte Überschätzung der subjektiven Hörschwelle durch das objektive Schätzverfahren beim individuellen Probanden betrug 38,0dB HL, in der Gegenrichtung ergab sich bei einzelnen Probanden allerdings auch eine Unterschätzung der Hörschwelle (d.h. eine zu gute Einschätzung) bis maximal 52dB HL.

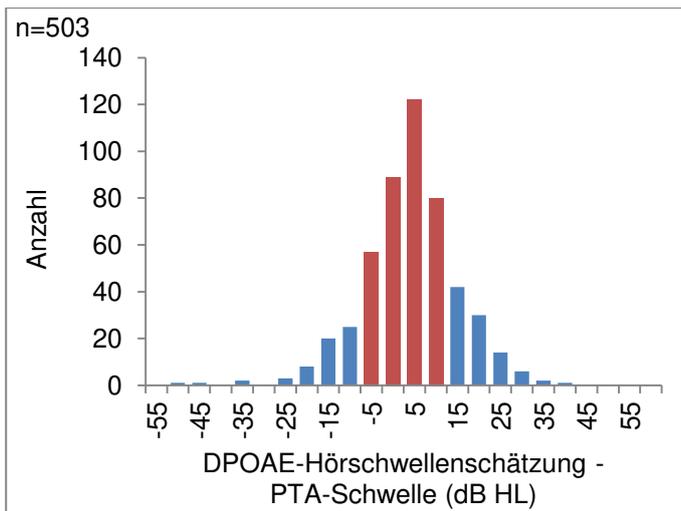


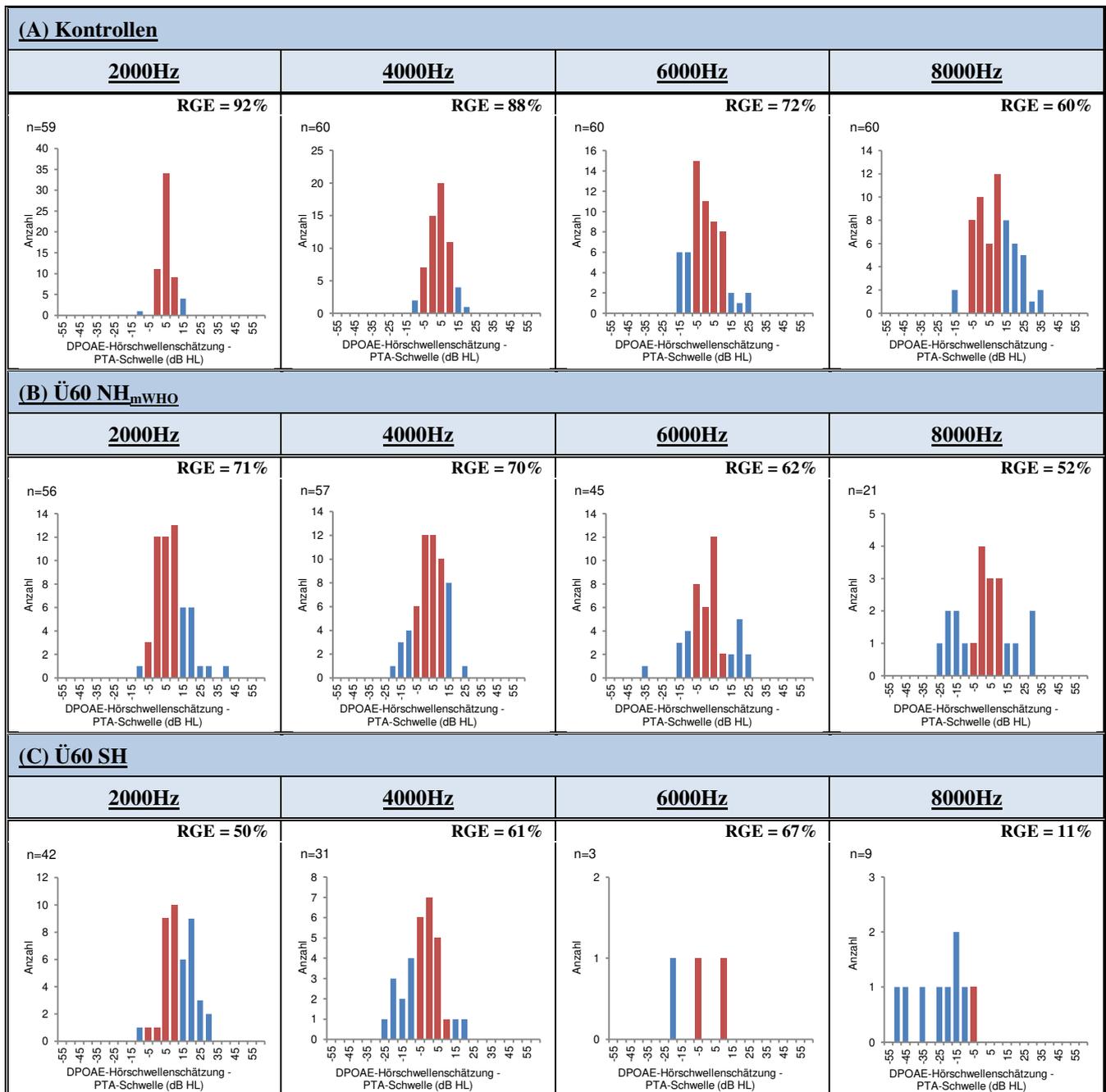
Abbildung 3.15: Absolutdifferenzen zwischen objektiv und subjektiv ermittelter Hörschwelle

Histogramm zur Differenz zwischen objektiver DPOAE-Hörschwellschätzung und subjektiver Tonschwelle der Reintonaudiometrie (PTA). Berücksichtigt wurden alle paarweise vorhandenen Werte bei den Frequenzen 2, 4, 6 und 8kHz beider Ohren der drei Subkollektive. Klassenbreite 5dB HL; die Klassenzahl gibt die noch in der jeweiligen Klasse berücksichtigte Obergrenze des Klassenintervalls an. n: Anzahl der paarweise vorhandenen Hörschwellen. Der Anteil der guten Hörschwellschätzungen (RGE, siehe Text) liegt bei 69,2% (rote Säulen). $MW \pm SD = 1,6 \pm 11,0\text{dB HL}$.

In der audiometrischen Praxis können die mittels subjektiver Reintonaudiometrie bestimmten Tonschwellen bei wiederholten Messungen um bis zu 10dB HL differieren (Mrowinski und Scholz 2011). Da die subjektive Hörschwelle in dieser Studie nur einmalig bestimmt wurde, ergibt sich damit im schlechtesten Falle ein Intervall mit einer Breite von bis zu 20dB HL um die ermittelte PTA-Hörschwelle (wobei diese in Intervallmitte liegt), in dem bei wiederholten Messungen die subjektiven Tonschwellen liegen könnten. Unter Berücksichtigung dieser Limitation der subjektiven Tonschwellenaudiometrie wurde daher festgelegt, dass alle DPOAE-Hörschwellschätzungen innerhalb eines Intervalls der Breite 20dB HL um die subjektive Tonschwelle als gute objektive Schätzungen zu betrachten waren. Alle jenseits der Intervallgrenzen gelegenen DPOAE-Hörschwellschätzungen dagegen galten als ungenau. Auf das Histogramm bezogen zählten folglich die vier um die Null gelegenen Histogrammklassen (entsprechend einer Differenz zwischen objektiver und subjektiver Tonschwelle innerhalb des Intervalls $]-10\text{dB HL}; +10\text{dB HL}]$) zu den genauen Schätzungen. Es wurde der Anteil der guten DPOAE-Hörschwellschätzungen an der Gesamtzahl der DPOAE-Hörschwellschätzungen (Ratio of good estimations, RGE) berechnet. Dieser lag subkollektiv-, frequenz- und seitenübergreifend bei 69,2% (348 von 503 Schwellen).

Tabelle 3.37: Absolutdifferenzen zwischen objektiv und subjektiv ermittelter Hörschwelle, subkollektiv- und frequenzgetrennt

Histogramme zur Differenz zwischen objektiver DPOAE-Hörschwellschätzung und subjektiver Tonschwelle der Reintonaudiometrie (PTA), nach Subkollektiv und Frequenz getrennt. Berücksichtigt wurden alle paarweise vorhandenen Werte. Klassenbreite 5dB HL; die Klassenzahl gibt die noch in der jeweiligen Klasse berücksichtigte Obergrenze des Klassenintervalls an. Ü60 NH_{mWHO}: Normalhörendes Ü60-Subkollektiv; Ü60 SH: Schwerhöriges Ü60-Subkollektiv. RGE: Anteil der guten Hörschwellschätzungen (Definition siehe Text), in den Histogrammen als rote Säulen gekennzeichnet. n: Anzahl der paarweise vorhandenen Hörschwellen.



Darüber hinaus erfolgte eine nach Subkollektiv und Frequenz getrennte Analyse der Absolutdifferenzen zwischen objektiv und subjektiv ermittelter Hörschwelle beim individuellen Studienteilnehmer anhand von Histogrammen und RGE (siehe **Tabelle 3.37**). Besonderes Interesse

galt hier einer möglichen *Frequenzabhängigkeit der Genauigkeit* der objektiven Hörschwellenschätzung sowie möglichen *Unterschieden der Schätzgenauigkeit zwischen den Subkollektiven*. Zur Beantwortung erstgenannter Fragestellung erschienen die Resultate des normalhörenden Kontrollkollektivs am geeignetsten, da bei diesem Subkollektiv über den gesamten berücksichtigten Frequenzbereich ein nahezu konstanter mittlerer Hörverlust von 2dB HL bis 9dB HL vorlag, eine Beeinflussung der Schätzgenauigkeit schon allein durch unterschiedliches Hörvermögen bei den berücksichtigten Frequenzen also minimiert ist. Es zeigte sich, dass mit zunehmender Frequenz die Variabilität der Genauigkeit der objektiven Hörschwellenschätzung (sichtbar an der Streubreite der Histogramme) und damit auch der Prozentsatz an von der subjektiven Tonschwelle relevant differierenden objektiven Hörschwellenschätzungen (sichtbar an der RGE) zunahm (siehe Abschnitt A der Tabelle). Unterschiede der Genauigkeit der objektiven Hörschwellenschätzung zwischen den Subkollektiven konnten durch Vergleich der Streubreite der Histogramme und der RGE einer Frequenz zwischen den drei Subkollektiven untersucht werden (siehe Tabellenspalten). In praktisch allen Fällen fand sich eine Zunahme der Streubreite und damit Variabilität der Schätzgenauigkeit bei den beiden Ü60-Subkollektiven im Vergleich zum Kontrollkollektiv (Ausnahmen: 6000Hz und 8000Hz beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv, hier allerdings potentiell durch die geringe Anzahl der validen Schwellenpaare bedingt). Entsprechend war die RGE bei den Ü60-Subkollektiven stets geringer als bei derselben Frequenz des Kontrollkollektivs. Das schwerhörige Ü60-Subkollektiv erzielte mit Ausnahme der Frequenz 6000Hz stets geringere RGEs als das normalhörende Ü60-Subkollektiv. Frequenz- und subkollektivübergreifend lag der Häufigkeitsgipfel der Histogramme in allen Fällen im Bereich der guten DPOAE-Hörschwellenschätzungen, also maximal 10dB HL von der subjektiven Hörschwelle entfernt.

3.3.5 Durchschnittshörverlust bei 0,5-4kHz versus Durchschnittshörverlust bei 0,5-8kHz: Korrelation mit Sprachverständnistests und HHIE-S

In der WHO-Klassifikation der Schwerhörigkeit wird das Hörvermögen ausschließlich über den Hörverlust bei den Audiometerfrequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz definiert (World Health Organization 1991, Mathers *et al.* 2000). Beim Altersschwerhörigen findet sich jedoch typischerweise ein besonders großer Hörverlust im in dieser Definition kaum berücksichtigten Hochtonbereich, der zum Leitsymptom des verminderten Sprachverständnisses im Störgeräusch führt (Probst *et al.* 2008, Lenarz und Boenninghaus 2012). Es stellte sich daher die Frage, ob durch eine stärkere Berücksichtigung des Hochtonbereichs in der WHO-Klassifikation die individuelle Höreinschränkung beim Altersschwerhörigen eventuell besser widerspiegelt würde. Um dies zu

überprüfen, wurden die Ergebnisse der Sprachverständnistests im Störgeräusch (OLSA und SUN) sowohl mit dem Durchschnittshörverlust bei den Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz beider Ohren in der Tonaudiometrie (PTA 500-4000Hz) korreliert als auch mit dem Durchschnittshörverlust eines in den Hochtonbereich erweiterten Frequenzspektrums von 500 bis 8000Hz (PTA 500-8000Hz, hier im Vergleich zu PTA 500-4000Hz zusätzlich die Frequenzen 6000 und 8000Hz beider Ohren berücksichtigt). Zusätzlich wurde eine analoge Korrelation des HHIE-S als unmittelbarem Indikator des individuellen Hörhandicaps durchgeführt. In allen Fällen zeigten sich nur minimal stärkere Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Sprachverständnistests bzw. des HHIE-S mit dem Durchschnittshörverlust im erweiterten Frequenzspektrum (siehe **Tabelle 3.38**).

Tabelle 3.38: Korrelation von Sprachverständnistests und HHIE-S mit Durchschnittshörverlust bei 0,5-4kHz bzw. bei 0,5-8kHz

Spearman-Korrelationskoeffizienten. Als Ergebnis des SUN-Tests wurde der Mittelwert von rechtem und linkem Ohr verwendet. PTA 500-4000Hz: Durchschnittshörverlust in der Tonaudiometrie bei den Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz beider Ohren; PTA 500-8000Hz: Durchschnittshörverlust in der Tonaudiometrie bei den Frequenzen 500, 1000, 2000, 4000, 6000 und 8000Hz beider Ohren. Anzahl n der korrelierten Wertepaare jeweils 90. Alle Korrelationen waren signifikant auf 5%-Niveau ($p < 0,001$).

	<u>PTA 500-4000Hz</u>	<u>PTA 500-8000Hz</u>
OLSA (2. Messung)	0,83	0,87
SUN	-0,68	-0,71
HHIE-S	0,71	0,73

4 Diskussion

Die vorliegende Dissertation befasste sich mit altersbedingten Veränderungen der Hörleistungen des Menschen. Anhand dreier Subkollektive mit jeweils 30 Personen - einem normalhörenden Subkollektiv 18- bis 26-Jähriger sowie je einem über-60-jährigen normalhörenden bzw. schwerhörigen Subkollektiv - wurde eine Differenzierung zwischen alters- und hörverlustbedingten Effekten auf die Leistungsfähigkeit der einzelnen Verarbeitungsstationen des Hörsystems vorgenommen. Jeder Studienteilnehmer unterzog sich einer ausführlichen Testbatterie, um die Leistungsfähigkeit sämtlicher Hörbahnstationen zu erfassen, wobei die einzelnen Hörtests nach topodiagnostischen Gesichtspunkten ausgewählt worden waren.

Die Vielzahl der durchgeführten Messverfahren an jedem Studienteilnehmer ermöglichte es - neben den unmittelbaren Ergebnissen der einzelnen Untersuchungsverfahren - auch relevante Korrelationen zwischen den verschiedenen Messmethoden zu erfassen.

Die folgende Diskussion gliedert sich in drei Hauptteile: Nach einer Bewertung der Charakteristika des Studienkollektivs werden die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden in Hinblick auf Alters- und Schwerhörigkeitseffekte diskutiert; zuletzt folgt eine ergänzende Darstellung ausgewählter praxisrelevanter Aspekte der Hörstudie.

4.1 *Bewertung des Studienkollektivs*

Zur Akquisition des Studienkollektivs wurde auf ein multimodales Rekrutierungskonzept (siehe 2.1) zurückgegriffen, um eine *repräsentative Stichprobe* zu erfassen. Die beiden Ü60-Subkollektive wurden hauptsächlich aus der Klinikdatenbank der Hals-Nasen-Ohren-Klinik des Klinikums rechts der Isar München rekrutiert, indem diese automatisiert und manuell nach Patienten mit den Einschlusskriterien entsprechenden Hörschwellenverläufen gesichtet wurde. Auf eine weitergehende Datenanalyse im Vorfeld, z.B. eine über die Hörschwellenkurven hinausgehende Erfassung von Vorerkrankungen, wurde bewusst verzichtet, um nicht von vornherein einen Selektionsbias zu generieren. Da das Klinikum rechts der Isar als überregionales Zentrum einen weiten Einzugsbereich im Münchener Raum und im Umland abdeckt und die Ambulanzsprechstunden der Hals-Nasen-Ohrenklinik auch für unangemeldete Selbstvorstellungen von Patienten offenstehen, enthält die HNO-Klinikdatenbank ein breites Patientengut, das sowohl Stadt- als auch Landbevölkerung mit sämtlichen Schweregraden von Erkrankungen umfasst. Um eine noch größere Repräsentativität zu erzielen, wurden zudem auch Patienten anderer Fachabteilungen via Plakataushang im Klinikum rechts der Isar und weitere Probanden durch die

Bitte um Weitergabe des Studienaufrufs an nicht am Klinikum bekannte Verwandte und Freunde gewonnen. Durch die erst im Nachhinein anhand des Hörschwellenverlaufs festgelegte Zuteilung eines individuellen Studienteilnehmers des Ü60-Kollektivs zur Normalhörenden- bzw. Schwerhörigengruppe war eine homogene Zusammensetzung beider Ü60-Subkollektive gewährleistet. Allerdings ergab sich durch diesen offenen Rekrutierungsvorgang ein signifikanter Altersunterschied zwischen den beiden Ü60-Subkollektiven, der in der statistischen Auswertung eine zusätzliche Signifikanzberechnung unter Berücksichtigung der Kovariablen Alter mittels ANOCOVA notwendig machte (siehe **2.10**). Beim jungen Kontrollkollektiv erfolgte die Rekrutierung ebenfalls multimodal über persönliche Ansprache durch den Verfasser der Dissertation, über Studienaufrufe an Medizinstudenten am Klinikum rechts der Isar sowie über Bitte um Weitergabe des Studienaufrufes an Verwandte und Freunde im passenden Alter. Insgesamt war durch diese Durchmischung des Studienkollektivs aus Klinikpatienten und zufällig rekrutierter Allgemeinbevölkerung eine für die Gesamtbevölkerung weitgehend repräsentative Stichprobe zu erwarten. Im jungen Kontrollkollektiv war gegebenenfalls ein überproportional hoher Anteil an Studierenden zu bedenken, beim Vergleich beider Ü60-Subkollektive der Altersunterschied.

Wie bereits in der Einleitung (siehe **1.2.3**) erwähnt, beschreibt die DIN EN ISO 7029 im aktuell gültigen Normentwurf die zu erwartende Hörschwellenverteilung für verschiedene Altersgruppen nach Geschlechtern getrennt (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014). Die angegebenen Hörschwellenverläufe gelten für otologisch normale Personen, d.h. Personen mit normalem Gesundheitszustand ohne bekannte Ohrerkrankungen, ohne übermäßiges Cerumen im Gehörgang sowie ohne übermäßige Lärmeinwirkung, ototoxische Vormedikation bzw. familiär bedingten Hörverlust. Diese Kriterien konnten in der vorliegenden Hörstudie anhand des Fragebogens für Hörtests (siehe **2.3**) und die Otoskopie erfasst werden. Ein entsprechender geschlechtergetrennter Vergleich der *Hörschwellenverläufe des Kontrollkollektivs* der vorliegenden Hörstudie mit den Normkurven 20-Jähriger zeigte einen durchschnittlichen Hörschwellenverlauf unterhalb (d.h. schlechter) des 50. Perzentils (siehe **Abbildung 4.1A**). Die Hörschwellen der männlichen Kontrollpersonen folgten im Durchschnitt relativ exakt dem 75. Perzentil; größere Abweichungen ergaben sich im höheren Frequenzbereich mit einer durchschnittlichen 6kHz-Schwelle unterhalb dem 90. bzw. einer durchschnittlichen 8kHz-Schwelle nahe dem 50. Perzentil. Bei den weiblichen Kontrollpersonen lag die mittlere Hörschwelle ebenfalls nahe dem 75. Perzentil; Abweichungen nach oben fielen hier ohne eindeutig zugrundeliegendes Muster bei 250, 4000 und 8000Hz auf, bei 6kHz imponierte erneut eine Durchschnittsschwelle im Bereich des 90. Perzentils.

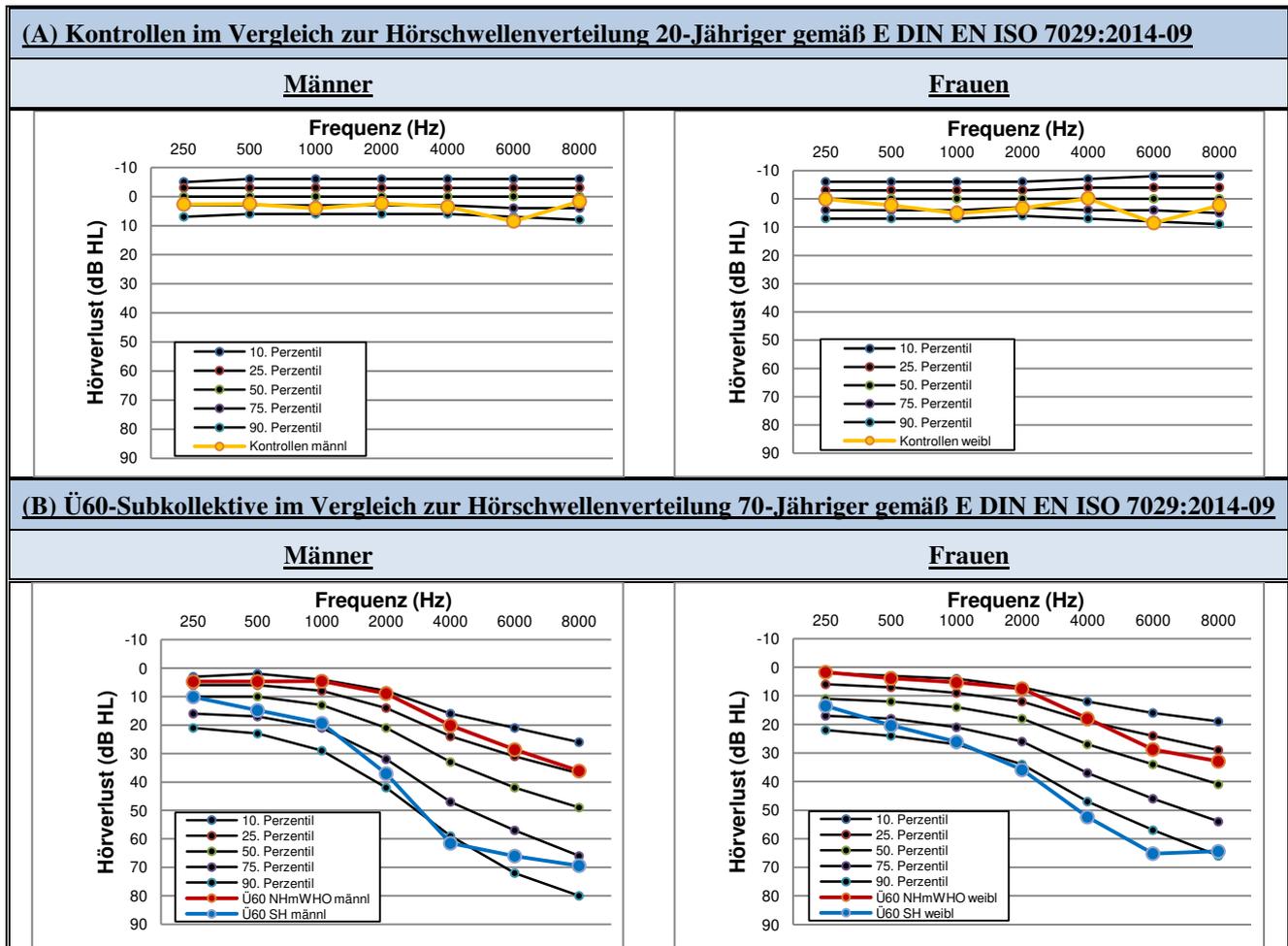


Abbildung 4.1: Vergleich der Durchschnittshörschwellen der Subkollektive mit der erwarteten Hörschwellenverteilung gemäß E DIN EN ISO 7029:2014-09

(A) Die Durchschnittshörschwellen des Kontrollkollektivs (gelb) wurden nach Geschlechtern getrennt mit der Hörschwellenverteilung 20-Jähriger gemäß des Normentwurfs E DIN EN ISO 7029:2014-09 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2014) verglichen, die für verschiedene Altersgruppen zu erwartende Perzentilenverteilungen otologisch normaler Personen (schwarze Hörschwellenverläufe) angibt. **(B)** Ein analoger Vergleich mit der erwarteten Hörschwellenverteilung 70-Jähriger wurde für das normalhörende (rot) bzw. schwerhörige (blau) Ü60-Subkollektiv vorgenommen.

Die bei beiden Geschlechtern des Kontrollkollektivs beobachtete Lage der Hörschwellen in der schlechteren Hälfte der Normverteilung ist nur teilweise durch das höhere Durchschnittsalter der Kontrollpersonen (24,2 Jahre) im Vergleich zu den 20-Jährigen der Norm erklärbar, da sich auch im (hier nicht abgebildeten) Vergleich mit den Normschwellendaten 30-Jähriger ein ähnliches Bild ergibt. Es muss allerdings bedacht werden, dass bei der eng zusammenliegenden Normhörschwellenverteilung der 20- bzw. 30-Jährigen bereits geringe dB-Abweichungen eine Überschreitung mehrerer Perzentile zur Folge haben. Andere Studien zu Hörschwellenverläufen (Kurakata *et al.* 2006, Kurakata *et al.* 2011) zeigen tendenziell schlechtere Perzentilenverteilungen 20- bis 30-Jähriger, so dass die in dieser Studie erhobenen Werte des Kontrollkollektivs insgesamt trotzdem im zu erwartenden Bereich lagen. Der bei beiden Geschlechtern vorliegende Knick bei 6kHz wurde auch bei anderen Autoren (Brant und Fozard 1990, Billings *et al.* 2012, Lenarz und

Boeninghaus 2012) im Rahmen der bereits beginnenden Altersveränderungen des Gehörs beschrieben.

Den analogen geschlechtergetrennten Vergleich der durchschnittlichen *Hörschwellenverläufe des normalhörenden bzw. schwerhörigen Ü60-Subkollektivs* mit den Verteilungsdaten der E DIN EN ISO7029:2014-09 zeigt **Abbildung 4.1B**, wobei in diesem Fall aufgrund des Durchschnittsalters der beiden Ü60-Subkollektive (66,7 Jahre bei den Normalhörenden bzw. 72,3 Jahre bei den Schwerhörigen) die Normschwellen 70-Jähriger herangezogen wurden. Bei beiden Geschlechtern fand sich im normalhörenden Subkollektiv ein mittlerer Hörschwellenverlauf zwischen 10. und 25. Perzentil der Norm von 0,25kHz bis 4kHz. Während die Durchschnittsschwelle der männlichen Normalhörenden auch bei hohen Frequenzen in diesem Bereich der Normschwellen lag, knickte diese bei den weiblichen Normalhörenden bei 6kHz und 8kHz zwischen das 25. Perzentil und den Median ab. Die mittlere Schwelle des schwerhörigen Ü60-Subkollektiv war bei beiden Geschlechtern stets schlechter als der Median der Normschwellenverteilung einzuordnen, wobei bei den Männern der untere Frequenzbereich zwischen Median und 75. Perzentil, der mittlere z.T. schlechter als das 90. Perzentil und der hohe Frequenzbereich etwas besser zwischen 75. und 90. Perzentil rangierte. Im Gegensatz dazu fand sich beim schwerhörigen weiblichen Ü60-Subkollektiv bezogen auf die weiblichen Normschwellen eine etwas schlechtere Einordnung der Kurven mit einer Lage zwischen 50. und 90. Perzentil nur im unteren Frequenzbereich. Ab 2kHz wurde praktisch durchgehend das 90. Perzentil überschritten, eine Ausnahme bildete nur noch die 8kHz-Schwelle. Zusammengefasst repräsentierte das normalhörende Ü60-Subkollektiv damit bei den meisten Frequenzen das am besten hörende Quartil der Norm, das schwerhörige Ü60-Subkollektiv hingegen a.e. das am schlechtesten hörende Quartil. Ein Vergleich der Durchschnittsschwellen der Ü60-Subkollektive mit weiteren Hörstudien, die Hörschwellenverteilungen erfasst haben (Kurakata *et al.* 2006, Blanchet *et al.* 2008, Kurakata *et al.* 2011), lieferte großteils ein ähnliches Bild.

Die *geschlechterspezifischen Absolutwerte* der erwarteten Hörschwellenverteilung einer otologisch normalen Bevölkerung gemäß E DIN EN ISO 7029:2014-09 liegen im Hochtonbereich für Männer schlechter als für Frauen. Auch andere Hörstudien zeigten bei zunehmendem Alter ein insgesamt besseres Hörvermögen weiblicher Teilnehmer bei den höheren Frequenzen (Bertoli *et al.* 1996, Kurakata *et al.* 2006, Blanchet *et al.* 2008, Gates *et al.* 2008). Eine Erklärung hierfür ist, dass der tonaudiometrische altersbedingte Hörverlust, der ja insbesondere die hohen Frequenzen betrifft, bei Männern früher einsetzt und schneller voranschreitet als bei Frauen (Billings *et al.* 2012), so dass insgesamt schlechtere Absolutschwellen resultieren. Auch in der vorliegenden Hörstudie fand sich eine Tendenz zu besseren Hörschwellen weiblicher Teilnehmer des Ü60-Kollektivs, die sowohl

beim normalhörenden als auch beim schwerhörigen Subkollektiv zu beobachten war. Aufgrund des nur geringen absoluten Schwellenunterschiedes und der beschränkten Kollektivgröße wurde jedoch auf eine detailliertere geschlechtergetrennte Analyse verzichtet.

Die *Einordnung des Hörvermögens* eines Studienteilnehmers erfolgte in dieser Studie - mit leichten Modifikationen (siehe 2.1) - gemäß der WHO-Klassifikation der Schwerhörigkeit (World Health Organization 1991, Mathers *et al.* 2000). Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass trotz der von den WHO-Vorgaben abweichenden Berechnung des Durchschnittshörverlustes bei 500, 1000, 2000 und 4000Hz unter Berücksichtigung beider Ohren (nicht nur des besser hörenden, wie es die WHO vorschlägt) keine relevante Beeinflussung der Studienergebnisse im Vergleich zur einseitigen, WHO-konformen Berechnung zu erwarten war: Eine nachträgliche Berechnung der unilateralen Hörverlustwerte des besseren Ohres gemäß WHO-Vorgaben konnte zeigen, dass das Hörvermögen von lediglich drei der 90 Studienteilnehmer bei einseitiger Berechnung geringfügig anders bewertet worden wäre. Beide normalhörenden Subkollektive - Kontrollen und $\ddot{U}60$ NH_{mWHO} - rangierten mit einem Durchschnittshörverlust von 2,9dB HL bzw. 9,1dB HL bei den genannten Frequenz im Mittel jeweils eindeutig in der besseren Hälfte der WHO-Kategorie „normalhörend“ (no impairment, World Health Organization (1991)), die ja von 0 bis 25dB HL reicht. Auch das schwerhörige $\ddot{U}60$ -Subkollektiv repräsentierte bezüglich des Hörverlustes im Durchschnitt die bessere Hälfte der Kategorie „leichter Hörverlust“ (slight impairment, World Health Organization (1991)).

Eine strukturierte Anamnese zu *Vorerkrankungen und Risikofaktoren für Gehörschädigungen* wurde in dieser Studie mithilfe des Fragebogens für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12 (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2009) erhoben. Das Risikoprofil unterschied sich einerseits bezüglich Vorerkrankungen des Gehörs und unmittelbarer Verwandtschaft mit Hörstörungen zwischen dem Kontrollkollektiv und beiden $\ddot{U}60$ -Subkollektiven: der Anteil an positiven Antworten lag hierbei in beiden $\ddot{U}60$ -Subkollektiven relevant höher als beim Kontrollkollektiv. Dies wurde naturgemäß durch das höhere Lebensalter des $\ddot{U}60$ -Kollektivs und der damit höheren Expositionszeit bedingt. Andererseits konnte eine relevant erhöhte Exposition des Kontrollkollektivs gegenüber Freizeitlärm durch Rock-/Popkonzerte, Diskotheken und tragbare Wiedergabegeräte im Vergleich zu den $\ddot{U}60$ -Subkollektiven erkannt werden. Dass eine deutliche Mehrheit der jungen Studienteilnehmer in dieser Fragenkategorie eine Exposition bejahte, deckt sich mit den Ergebnissen einer anderen aktuellen Studie zur Lärmexposition 18- bis 30-Jähriger, die jeweils ähnlich hohe Anteile Exponierter erfasste (Keppler *et al.* 2015).

4.2 Bewertung der einzelnen Methoden in Hinblick auf Alters- und Schwerhörigkeitseffekte

Im Folgenden werden die Ergebnisse der einzelnen Messmethoden soweit möglich unter topodiagnostischer Zuordnung zu Hörbahnstrukturen vom peripheren Hörorgan bis zur zentralen Schallverarbeitung diskutiert.

4.2.1 Äußere Haarzellfunktion - DPOAE-Schwelle

Im Rahmen der vorliegenden Hörstudie wurden Veränderungen der DPOAE-Schwelle mit zunehmendem Alter und bei zunehmender Schwerhörigkeit untersucht. Im Gegensatz zu den TEOAE ermöglichen DPOAE eine frequenzspezifische und quantitative Diagnostik der äußeren Haarzellfunktion (Janssen 2009) und erschienen daher als Methode der Wahl zur detaillierten objektiven Kochleadiagnostik.

In zahlreichen Vorstudien wurden bereits Alters- und Schwerhörigkeitsphänomene bei den DPOAE im Rahmen einer Presbyakusis analysiert, wobei die Mehrzahl der Studien den DPOAE-Schalldruckpegel als Maß für die Funktionsfähigkeit der äußeren Haarzellen heranzog (in jüngerer Zeit u.a. Oeken *et al.* 2000, Cilento *et al.* 2003, Uchida *et al.* 2008, Hoth *et al.* 2010, Keppler *et al.* 2010, Abdala und Dhar 2012). In diesen Studien herrscht weitestgehend Einigkeit darüber, dass im Rahmen eines zunehmenden tonaudiometrischen Hörverlustes bei Presbyakusis auch eine Abnahme des DPOAE-Schalldruckpegels zu beobachten ist. Die Studienergebnisse sind jedoch uneinheitlich bezüglich eines vom tonaudiometrischen Hörverlustes unabhängigen Alterseffektes auf den DPOAE-Schalldruckpegel: Teilweise wird die Abnahme des DPOAE-Schalldruckpegels rein auf Alterseffekte zurückgeführt (Uchida *et al.* 2008), teilweise als kombiniertes Alters- und Schwerhörigkeitsphänomen betrachtet (Oeken *et al.* 2000, Keppler *et al.* 2010); andere Studien interpretieren diese als Schwerhörigkeitsphänomen mit ggf. noch überlagertem Alterseffekt (Cilento *et al.* 2003, Hoth *et al.* 2010); zum Teil wird gar kein Separierungsversuch von Alters- und Schwerhörigkeitskomponente vorgenommen (Abdala und Dhar 2012). Die widersprüchlichen Schlussfolgerungen beruhen u.a. auf unterschiedlichen Definitionen der Normalhörigkeit und des DPOAE-Schalldruckpegels, unterschiedlichen Kollektiven bzw. Studientypen, unterschiedlichen DPOAE-Algorithmen sowie unterschiedlichen Konzepten bei der statistischen Auswertung der Daten bei den Vorstudien. Insgesamt lässt die derzeitige Datenlage a.e. von einer gesicherten Abnahme des DPOAE-Schalldruckpegels im Rahmen einer zunehmenden Altersschwerhörigkeit ausgehen bei einer möglicherweise zusätzlich vorhandenen reinen Alterskomponente.

Entsprechende Studien zur DPOAE-Schwelle, deren Veränderungen in der vorliegenden Studie untersucht wurden, wurden bisher kaum durchgeführt. Als DPOAE-Schwelle wurde in dieser Studie der extrapolierte Primärtonschallpegel L_2 definiert, bei dem die Regressionsgerade der extrapolierten halblogarithmischen DPOAE-Wachstumsfunktion die Primärtonpegelachse schneidet (bzw. bei unzureichender Anzahl valider Messpunkte der geringste L_2 -Pegel, bei dem noch DPOAE nachweisbar waren, siehe 1.1.1.2.2). Dieser Ansatz hat den Vorteil, dass die DPOAE-Schwelle zumeist durch überschwellige, mit hohem Signal-Störabstand gemessene Wachstumsfunktionen indirekt ermittelt werden konnte und keine direkte, störschallbeeinträchtigte DPOAE-Schwellenmessung vonnöten war (Gorga *et al.* 2003, Janssen 2009). Der deutlich abnehmende Anteil messbarer DPOAE mit zunehmendem Alter und vor allem zunehmender Schwerhörigkeit konnte auch in anderen Studien beobachtet werden (Oeken *et al.* 2000, Gates *et al.* 2008, Keppler *et al.* 2010, Profant *et al.* 2015) und entspricht im Ausmaß etwa den vorbeschriebenen Werten ähnlicher Kollektive bei Gates *et al.* (2008) und Profant *et al.* (2015). Erklärend für diesen abnehmenden Anteil erfolgreicher DPOAE-Messungen ist die Tatsache, dass bei einem tonaudiometrischen Hörverlust größer 50dB HL meist keine DPOAE mehr nachweisbar sind (Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011); ein Wert, der frequenzabhängig von einigen Studienteilnehmern des normalhörenden und von zahlreichen Probanden des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs überschritten wurde. Die durch das Dreigruppenkonzept angestrebte *Differenzierung zwischen Alters- und Schwerhörigkeitsphänomenen* im Rahmen der Presbyakusis ließ in der vorliegenden Studie bei der DPOAE-Schwelle nur für schwerhörigkeitsassoziierte Änderungen einen eindeutigen Schluss zu: Der Vergleich zwischen den DPOAE-Schwellen des normalhörenden und des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs wies frequenzübergreifend einen signifikanten Schwellenanstieg mit zunehmender Schwerhörigkeit nach. Bezüglich eines reinen Alterseffektes auf die DPOAE-Schwelle konnte lediglich eine Tendenz zu höheren Schwellen ermittelt werden: Zwar war in der initialen Analyse frequenzübergreifend ein statistisch signifikanter Anstieg der DPOAE-Schwellen des normalhörenden Ü60-Subkollektivs im Vergleich zu denen des Kontrollkollektivs zu verzeichnen. Die Rückführung dieses Schwellenanstiegs auf einen reinen Alterseffekt erschien jedoch bei Berücksichtigung der in den DPOAE-relevanten Frequenzen 1kHz bis 4kHz bereits deutlich unterschiedlichen tonaudiometrischen Hörschwellen zu Ungunsten des Ü60-Subkollektivs nicht gerechtfertigt. Unter Zugrundelegung einer strengeren Definition von Normalhörigkeit beim Ü60-Subkollektiv - und einer damit erreichten Angleichung der tonaudiometrischen Hörschwelle zum Kontrollkollektiv - konnte zwar weiterhin eine Tendenz zu höheren Schwellen ermittelt werden, diese war jedoch nicht mehr statistisch signifikant, ggf. auch mitbedingt durch die deutliche Verkleinerung des dabei herangezogenen Ü60-Subkollektivs. Die

wenigen bereits vorhandenen Vorstudien zu Veränderungen der DPOAE-Schwelle bei Presbyakusis nehmen entweder keine Differenzierung zwischen alters- und schwerhörigkeitsassoziiierter Komponente des Schwellenanstiegs vor (Gates *et al.* 2002, Gates *et al.* 2008) bzw. verwenden eine funktionell andere Schwellendefinition (Ortmann und Abdala 2016). Insgesamt kann damit nach den vorliegenden Studienergebnissen unter Berücksichtigung vorhandener Literatur - analog zu o.g. Veränderungen des DPOAE-Schalldruckpegels - eine Zunahme der DPOAE-Schwelle nur bei zunehmender Schwerhörigkeit im Rahmen der Presbyakusis als gesichert betrachtet werden; ein reiner Alterseffekt erscheint möglich, ist jedoch nicht eindeutig nachgewiesen.

Aus *physiologisch-funktioneller* Sicht repräsentiert die DPOAE-Schwelle als erste messbare Haarzellantwort auf einen geringen Schallreiz a.e. das Ansprechverhalten der äußeren Haarzellen (d.h. den Schwellenschallpegel zur Auslösung des nichtlinearen Verstärkungsprozesses), der DPOAE-Schalldruckpegel hingegen die überschwellige Stärke des aktiven Verstärkungsprozesses (d.h. die Kontraktionsamplitude). Auch wenn interindividuell große Unterschiede im DPOAE-Schalldruckpegel vorbekannt sind (Cilento *et al.* 2003, Janssen 2009), scheinen die äußeren Haarzellen bei zunehmender Schwerhörigkeit im Rahmen der Presbyakusis und ggf. auch schon allein bei zunehmendem Alter nicht nur eine verminderte Kontraktionsfähigkeit aufzuweisen (repräsentiert durch den verminderten DPOAE-Schalldruckpegel), sondern benötigen zur Auslösung einer Kontraktionsantwort zudem einen höheren Schallpegel (erkennbar an der steigenden DPOAE-Schwelle). Unter Berücksichtigung anderer Studien, die des weiteren eine Abnahme des Dynamikbereiches der nichtlinearen Kompressivität der äußeren Haarzellen nachweisen konnten (Ortmann und Abdala 2016), zeigt sich damit eine Beeinträchtigung multipler Funktionsaspekte der äußeren Haarzellen im Rahmen zunehmender Altersschwerhörigkeit und ggf. auch schon allein bei zunehmendem Alter. *Pathophysiologisch-anatomisch* liegt der Verschlechterung der äußeren Haarzellfunktion a.e. eine Abnahme der Zahl intakter äußerer Haarzellen bei Presbyakusis zugrunde (Schuknecht und Gacek 1993, Nelson und Hinojosa 2006, Fischer *et al.* 2016, Ueberfuhr *et al.* 2016). Die äußeren Haarzellen reagieren unter den Kochleastrukturen besonders empfindlich auf Noxen (Uchida *et al.* 2008) und können daher durch im Alter zunehmende vaskuläre Defizite bzw. durch die kumulative Exposition gegenüber ototoxischen Agentien bzw. Lärm besonders schnell Schaden nehmen (Nakashima *et al.* 1995, Suzuki *et al.* 1998, Gorga *et al.* 2005, Tadros *et al.* 2005, Lehnhardt und Laszig 2009, Shi 2011).

Zusammenfassend kommt es damit bei Presbyakusis-bedingter Schwerhörigkeit und ggf. bereits allein durch zunehmendes Alter zu einer relevanten Funktionsbeeinträchtigung der äußeren

Haarzellen in multipler Hinsicht; weitere Studien sind jedoch nötig, um insbesondere den Alterseffekt detaillierter analysieren zu können.

4.2.2 Hörnerv- und Hirnstammfunktion - BERA

Die BERA ist bereits seit mehreren Jahrzehnten als Standardverfahren zur objektiven retrokochleären Hörbahndiagnostik etabliert. Von besonderer klinischer Relevanz - auch für die vorliegende Studie - sind die BERA-Interpeaklatenzen, die eine Aussage über die Laufzeit des auditorischen Signals durch die retrokochleären Hörbahnstrukturen bis hin zum Mesenzephalon und deren Intaktheit ermöglichen. Trotz zahlreicher Vorstudien herrscht bis zum aktuellen Zeitpunkt Uneinigkeit darüber, inwieweit sich die Interpeaklatenzen bei Presbyakusis verändern, insbesondere darüber, ob allein mit zunehmendem Alter oder nur bei Alterszunahme in Kombination mit einer Schwerhörigkeitskomponente veränderte Interpeaklatenzen zu erwarten sind. In Bezug auf die *IPL I-V*, die sog. *central transmission time*, wurden in Vorstudien teils signifikante Altersveränderungen postuliert (Verlängerung: Chu (1985), Rosenhall *et al.* (1986), Elberling und Parbo (1987), Oku und Hasegawa (1997)), teils gab es in den Studien keinen Anhalt für Alterseffekte (Harkins 1981, Rosenhall *et al.* 1985, Costa *et al.* 1990, Prosser und Rosignoli 1992, Burkard und Sims 2001, Konrad-Martin *et al.* 2012) bzw. beobachtete *IPL-I-V*-Veränderungen (Verlängerung: Ottaviani *et al.* (1991); Verkürzung: Elberling und Parbo (1987), Burkard und Sims (2001)) wurden mit schlechterem Hörvermögen bei steigendem Alter in Verbindung gebracht. Sofern untersucht, zeichnete sich für die *IPL I-III* ein ähnlich inhomogenes Bild ab, das von signifikanten Alterseffekten (Verlängerung: Elberling und Parbo (1987); Verkürzung: Costa *et al.* (1990)) über im Alter nicht signifikant veränderte *IPL-I-III*-Werte (Harkins 1981, Rosenhall *et al.* 1986, Martini *et al.* 1991, Oku und Hasegawa 1997) bis hin zu Schwerhörigkeitsphänomenen (Verkürzung: Elberling und Parbo (1987)) reicht. Gleichermäßen widersprüchlich präsentieren sich die Aussagen zur pontin-mesenzephalen Laufzeit (*IPL III-V*), die in einigen Studien mit zunehmendem Alter als signifikant verlängert (Chu 1985, Rosenhall *et al.* 1986, Costa *et al.* 1990, Oku und Hasegawa 1997) bzw. im Wesentlichen unverändert (Harkins 1981, Martini *et al.* 1991) angegeben wird. Nicht in allen Vorstudien erfolgte eine suffiziente Berücksichtigung des Schwerhörigkeitslevels der Studienkollektive. Im einzigen aktuelleren, jedoch inzwischen länger zurückliegenden Review von Boettcher (2002) wird unter Berücksichtigung tierexperimenteller Studien a.e. davon ausgegangen, dass in den meisten Studien beobachtete Veränderungen der Interpeaklatenzen auf unterschiedliches Hörvermögen der jeweiligen Studienkollektive zurückzuführen sind, nicht aber als Altersveränderungen anzusehen sind.

Vor diesem Hintergrund widersprüchlicher Ergebnisse in der Literatur und aufgrund des weitgehenden Fehlens neuerer Daten wurde in der vorliegenden Studie das Verhalten der BERA-Interpeaklatenzen bei zunehmendem Alter und zunehmender Schwerhörigkeit mit aktueller Messtechnik evaluiert. Eine zwischen Kontrollkollektiv und Ü60-Kollektiv nachgewiesene signifikante Verlängerung der *IPL I-V* wurde unter Zuhilfenahme der *IPL I-III* und *IPL III-V* weiter analysiert. Bezüglich der *IPL I-III* lag vom Kontrollkollektiv über das normalhörende bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv lediglich eine nicht signifikante Tendenz zur Zunahme vor. Anatomisch-funktionell bildet dieses Laufzeitintervall den Hörbahnabschnitt vom kochleanahen Hörnerv bis zur ersten Verarbeitungsstation im Hirnstamm, dem Nucl. cochlearis, ab, erfasst also hauptsächlich die Hörnervenfunktion (siehe 1.1.2.2.1). In der vorliegenden Studie konnte somit eine relevante Beeinflussung der Leitungsgeschwindigkeit des Hörnervs für überschwellige kurzdauernde (Klick-) Reize weder durch zunehmendes Alter noch im Rahmen zunehmender Altersschwerhörigkeit nachgewiesen werden. Da die Leitgeschwindigkeit myelinisierter Nervenfasern bei saltatorischer Erregungsleitung wesentlich durch die Intaktheit der Myelinscheide bestimmt wird (Klinke *et al.* 2005, Lüllmann-Rauch 2006), im Falle des N. vestibulocochlearis also durch die Integrität der umgebenden Schwann-Zellen sowie im proximalen Anteil auch Oligodendrozyten (Wang *et al.* 2009), ist folglich von einer unbeeinträchtigten Hüllstruktur der Hörnervenfasern auch bei zunehmendem Alter bzw. relevanter Altersschwerhörigkeit auszugehen. Dies deckt sich mit den Ergebnissen zweier MRT-Studien, die weder bei zunehmendem Alter noch bei Altersschwerhörigkeit signifikante Veränderungen des Durchmessers des N. vestibulocochlearis nachweisen konnten, der wesentlich von den Myelinstrukturen mitbestimmt wird (Sildiroglu *et al.* 2010, Kang *et al.* 2012). Zwar postulieren Naguib *et al.* (2017) eine Abnahme des MR-morphologischen Durchmessers des Hörnervs bei langdauernder sensorineuraler Schwerhörigkeit, allerdings werden in deren Studie Patienten unterschiedlichster Schwerhörigkeitsätiologien berücksichtigt, so dass eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die vorliegende Studie nicht ohne weiteres möglich ist. Anhand histologischer Analysen von humanen Felsenbeinpräparaten konnte bei Presbyakusis eine signifikante Abnahme der Spiralganglienzellzahl festgestellt werden (Nelson und Hinojosa 2006, Makary *et al.* 2011), gemäß tierexperimentellen Daten resultiert hieraus jedoch ein selektiver Untergang überschwellig ansprechender (high-threshold) Nervenfasern (Sergeyenko *et al.* 2013, Kujawa und Liberman 2015). Sofern die tierexperimentellen Ergebnisse auf die humane Presbyakusis übertragbar sind, scheint der presbyakusis-assoziierte selektive Untergang o.g. Faserpopulation die Leitungseigenschaften des Hörnervs für kurzdauernde überschwellige unmaskierte Reize beim Menschen nicht signifikant zu beeinträchtigen.

Im Gegensatz dazu konnte für die *IPL III-V* ein signifikanter Anstieg bei zunehmendem Alter, nicht aber bei zunehmender Schwerhörigkeit beobachtet werden. Anatomisch-funktionell bildet dieses Intervall die pontin-mesenzephal Schallreizverarbeitung zwischen Nucl. cochlearis und Lemniscus lateralis ab (siehe **1.1.2.2.1**) und wird entsprechend sowohl von der Leitungsgeschwindigkeit der pontin-mesenzephalen Fasertrakte als auch von der synaptischen Übertragungs- und Verarbeitungsgeschwindigkeit des Signals in den zugehörigen Kerngebieten (Nucl. cochlearis, Nucl. olivaris sup., Nucl. lemnisci lateralis) bestimmt. Aufgrund der Notwendigkeit hoher Neuronensynchronizität für die Erzeugung ableitbarer Oberflächenpotenziale werden die zugehörigen BERA-Generatoren in den für Schalllokalisierung verantwortlichen Strukturen im Hirnstamm verortet (Legatt 2012). In Tiermodellen zeigten sich ein Rückgang der auditorischen Bahnen zwischen Nucl. cochlearis und Colliculus inf. sowie strukturelle und metabolische Beeinträchtigungen der zugehörigen Synapsen mit veränderten Transmittergleichgewichten bei Presbyakusis (Frisina und Walton 2006, Lee 2013). Zudem könnte bei Presbyakusis ein abnehmender Fibroblast Growth Factor (FGF)-Level aufgrund einer verringerten Zahl FGF-produzierender Zellen in Spiralganglion und Nucl. cochlearis zu einer Beeinträchtigung der FGF-abhängigen Integrität der Myelinstrukturen führen, die sich tierexperimentell in verlängerten Interpeaklatenzen widerspiegelte (Wang *et al.* 2009). In histologischen Analysen humaner Nuclei cochleares konnte zumindest für Altersschwerhörige ein vermindertes Neuropil nachgewiesen werden (Hinojosa und Nelson 2011). Dies könnte ein möglicher Hinweis auf eine alterierte interneuronale Verschaltung im Kern und eine beeinträchtigte Schallverarbeitung sein.

Auch in der vorliegenden Studie musste trotz strenger Kollektivauswahl berücksichtigt werden, dass das normalhörende Ü60-Subkollektiv im Bereich des angewandten Klickspektrums (0,6-7kHz, PATH medical GmbH (2015b)) bereits eine schlechtere Hörschwelle aufwies als das Kontrollkollektiv, so dass eine Überlappung von Alters- und Schwerhörigkeitseffekten bei den Interpeaklatenzveränderungen möglich erschien. Folgende Aspekte sprechen jedoch dafür, dass für die beobachtete Verlängerung der *IPL III-V* (und damit die konsekutive Verlängerung der *IPL I-V*) tatsächlich das höhere Alter der Ü60-Subkollektive ursächlich war und nicht nur ein Confounding durch das schlechtere Hörvermögen vorlag: (1) Die identische mittlere *IPL III-V* bei normalhörendem und schwerhörigem Ü60-Subkollektiv belegt, dass in der vorliegenden Studie selbst durch eine deutliche Zunahme des Schwerhörigkeitsgrades keine relevante *IPL-III-V*-Änderung zu erwarten war. (2) Bei der Untersuchung des Einflusses kochleärer Schwerhörigkeit auf die Interpeaklatenz fanden sich in Vorstudien tendenziell verkürzte Laufzeitintervalle (Fowler und Noffsinger 1983, Elberling und Parbo 1987, Burkard und Sims 2001, Legatt 2012). Die im

Vergleich zum Kontrollkollektiv zunehmende kochleäre Schwerhörigkeitskomponente beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv müsste sich also - wenn überhaupt - eher in einer verringerten IPL I-V bzw. III-V widerspiegeln. (3) Die statistische Auswertung der interauralen Pegel- und Tondauerdiskrimination im LIPP-Test, die ebenfalls die für Schalllokalisierung verantwortlichen Hirnstammstrukturen evaluiert, zeigte äquivalent zur BERA ausschließlich einen signifikanten Alterseffekt ohne Schwerhörigkeitseffekte (siehe 3.2.2.2) und stützt dadurch das BERA-Ergebnis.

Zusammenfassend fand sich damit in der vorliegenden Studie eine von zunehmendem Alter bzw. Schwerhörigkeit unbeeinträchtigte Weiterleitung überschwelliger kurzdauernder Reize über den Hörnerven bis zum Nucl. cochlearis als Anhalt für intakte Myelinstruktur im Bereich des N. vestibulocochlearis. Hingegen konnte in Bezug auf die Schallverarbeitung im Hirnstamm, die bei der BERA hauptsächlich für Schalllokalisierung verantwortliche Strukturen bis auf mesenzephalare Ebene prüft, eine relevante Einschränkung mit zunehmendem Alter, nicht aber bei zunehmender Schwerhörigkeit nachgewiesen werden.

4.2.3 Zentrale Tondiskriminationsfähigkeit - LIPP-Testbatterie

Eine grundlegende Schwierigkeit bei der Evaluation zentraler Presbyakusis besteht darin, dass die Ergebnisse subjektiver zentral-auditiver Tests nicht allein von den Verarbeitungsleistungen der zentralen Hörbahnanteile abhängen können, sondern potenziell auch von kognitiven Fähigkeiten sowie peripherem Hörvermögen beeinflusst werden (Mrowinski und Scholz 2011, American Academy of Audiology 2012, Humes *et al.* 2012, Ouda *et al.* 2015). Die LIPP-Testbatterie trägt diesem Problem Rechnung, indem sie als nicht-sprachgebundenes Verfahren mit jeweils gleichartigem Trialablauf die kognitiven Anforderungen an den Probanden minimiert. Durch den an die individuelle Hörschwelle angepassten Signalpegel von jeweils 40dB SL wird zudem der potenzielle Einfluss verminderten peripheren Hörvermögens bestmöglich kompensiert; die Korrelationsanalyse der individuellen 1kHz-Hörschwelle mit den LIPP-Ergebnissen konnte anhand der nur geringen Korrelationsstärke nachweisen, dass diese Strategie bei den Teilnehmern der vorliegenden Studie erfolgreich war. Damit erfüllt die LIPP-Testbatterie die wesentlichen durch Humes *et al.* (2012) geforderten Voraussetzungen eines *selektiven zentral-auditiven Testverfahrens*.

Der Vergleich der *absoluten Diskriminationsschwellen* der vorliegenden Studie mit denen weitgehend äquivalenter Kollektive anderer Autoren zeigt bei Heranziehen der LIPP-Originalpublikationen (d.h. bei weitestgehend identischem Messverfahren) in der Mehrzahl der Fälle präsentationsart- und testmodusübergreifend höhere Diskriminationsschwellen der Subkollektive der vorliegenden Studie (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Ludwig 2009, Freigang *et al.*

2011). Bungert-Kahl *et al.* (2004) und Freigang *et al.* (2011) nutzten zur Schwellenberechnung jedoch den 50%-Punkt der psychometrischen Funktion; der in der vorliegenden Studie verwendete Testalgorithmus zielt über das One-Up-Two-Down-Prinzip auf den 67%-Punkt und verringert damit die Zufallstrefferwahrscheinlichkeit und die Wahrscheinlichkeit (potenziell falsch) niedriger Schwellenergebnisse. Das Studienkollektiv bei Ludwig (2009) wies einen geringeren Altersdurchschnitt auf. Beide Unterschiede könnten als mögliche Erklärung für die höheren Schwellen in der vorliegenden Studie dienen; ein direkter Schwellenvergleich ist somit erschwert. Auch die Studien von Elliot *et al.* (1966) und Bertoli *et al.* (2002), in denen teils ähnliche (Elliot *et al.* 1966), teils niedrigere (Bertoli *et al.* 2002) Diskriminationsschwellen ermittelt wurden, sind aufgrund der differierenden Schwellenschätzverfahren und Einschlusskriterien nur bedingt vergleichbar.

Für die vorliegende Studie wichtiger ist jedoch der *Vergleich der Diskriminationsschwellen der drei Subkollektive* untereinander. Um eine korrekte topodiagnostische Zuordnung vornehmen zu können, muss zunächst - ergänzend zu **1.1.2.2.3** - auf die anatomisch-physiologischen Grundlagen eingegangen werden, die den einzelnen Präsentationsarten und Testmodi zugrundeliegen.

Wie bereits beschrieben, prüft die *interaurale Präsentationsart* die mit der Schalllokalisierung befassten Hirnstammstrukturen. Gemäß der Duplex-Theorie des Richtungshörens erreicht das Schallsignal einer horizontal von der Mittelebene abweichenden Schallquelle das schallquellenzugewandte Ohr etwas früher (relevant insbesondere für die Ortung tieffrequenter Signale) und etwas lauter (relevant insbesondere für die Ortung hochfrequenter Signale) als das schallquellenabgewandte Ohr. Durch spezielle Verschaltung binauraler inhibitorischer und exzitatorischer Afferenzen kann auf Ebene des Hirnstammes aus dem nicht richtungskodierten Afferenzsignal beider Einzelohren über die Auswertung der entsprechenden interauralen Tondauerdifferenzen (engl. interaural time difference, ITD) und Pegeldifferenzen (engl. interaural level difference, ILD) auf die Richtung der Schallquelle rückgeschlossen werden; für die Unterscheidung vorne-hinten sowie oben-unten werden zudem spektrale Schallcharakteristika herangezogen. ITDs werden anatomisch erstmals auf Ebene des medialen Unterkerns der oberen Olive (MSO), ILDs erstmals in deren lateralem Unterkern (LSO) ausgewertet, die Weiterleitung der extrahierten Ortsinformation erfolgt auf Hirnstammebene über den Lemniscus lateralis zum Colliculus inferior und schließlich weiter zum Hörcortex (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Neumann und Rübsamen 2005, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009, Grothe *et al.* 2010, Lee 2015, Middlebrooks 2015, Pickles 2015, Salminen *et al.* 2015). Die *interaurale Tondauer- bzw. Pegeldiskrimination* der LIPP-Testbatterie imitiert direkt o.g. Prozesse. Dies zeigt sich auch an der

lateralisierten Wahrnehmung des Fusionsperzeptes beim Testsignal; die Testspezifität für Hirnstammstrukturen konnte in Studien nachgewiesen werden. Topodiagnostisch prüfen interaurale Tondauer- bzw. Pegeldiskrimination folglich medialen bzw. lateralen Unterkern der oberen Olive sowie nachgeschaltet Lemniscus lateralis und Colliculus inf. (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Ludwig 2009). Bei der *interauralen Frequenzdiskrimination* kommt es aufgrund der nur minimal voneinander abweichenden Frequenzen des Referenz- und Testsignals zu einer kontinuierlichen interauralen Phasenverschiebung beider Tonsignale. Unter physiologischen Bedingungen ist dieses Phänomen im Rahmen einer horizontalen Bewegung einer Schallquelle anzutreffen, dies zeigt sich dem Probanden akustisch an der räumlichen „Ausbreitung“ des Fusionsperzeptes des Testsignals. Bislang ist nicht bekannt, ob spezifische Hirnstammstrukturen für die Signalauswertung bei bewegten Schallquellen (z.B. Neurone / Kerngebiete, die auf dynamische ITD-, Phasen- bzw. ILD-Verschiebungen reagieren) verantwortlich sind. Experimentell konnte jedoch auch für den interauralen Frequenzdiskriminationstest der LIPP-Batterie eine Spezifität für die Testung von Hirnstammstrukturen gezeigt werden, auch wenn deren konkretes morphologisches Korrelat unbekannt verbleibt (Kuwada *et al.* 1979, Bungert-Kahl *et al.* 2004, Neumann und Rübsamen 2005, Ludwig 2009, Middlebrooks 2015).

Im Gegensatz dazu prüfen die *dichotischen Testprozeduren* der LIPP-Testbatterie spezifisch die Integrität der kontralateralen di- und telenzephalen auditiven Strukturen und sind von der Hirnstammintegrität weitgehend unabhängig (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Neumann und Rübsamen 2005, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009). Im Hörsystem wird die Tondauer zum einen über die Dauer der Neuronenentladungen, zum anderen ab dem Colliculus inf. über on-off-Antworten zu Beginn und Ende eines Stimulus an das Großhirn weitergegeben (Neumann und Rübsamen 2005, Freigang *et al.* 2011). Der Pegel einer Schallquelle wird einerseits über die Häufigkeit der Aktionspotenziale in den Nervenfasern charakteristischer Frequenz kodiert, andererseits werden bei steigendem Pegel zusätzlich benachbarte Fasern anderer charakteristischer Frequenzen aktiviert. Aus dem Gesamtladungsmuster wird auf Ebene des Großhirns auf den Schallpegel rückgeschlossen (Klinke *et al.* 2005, Neumann und Rübsamen 2005, Schreiner und Malone 2015). Während das konkrete strukturelle Korrelat für die Wahrnehmung von Tondauer und Pegel auf Großhirnebene bislang nicht eindeutig geklärt ist (beim Schallpegel ggf. bestimmte Neuronengruppen unterschiedlicher Aktivierungsschwelle), existieren auf allen Ebenen der Hörbahn inkl. Corpus geniculatum mediale und auditorischem Kortex spezifische Frequenzkarten, so dass bestimmte Neuronenpopulationen bzw. Nervenfasern bei spezifischen Frequenzen ansprechen (Tonotopie). Zusätzlich wird die Frequenz tiefer Töne über die Periodizität der

Aktionspotenziale weitergegeben, die stets ganzzahligen Vielfachen der Periodendauer des Tones entspricht (Periodizitätsprinzip). Im Gegensatz zur Tondauer und zum Schallpegel, die nach heutigem Kenntnisstand über das Aktionspotenzialmuster kodiert werden, existiert damit einzig für die Frequenz ein konkretes strukturmorphologisches Hörbahnkorrelat in Form der Tonotopie (Klinke *et al.* 2005, Grothe *et al.* 2010, Hackett 2015, Moerel *et al.* 2015, Pickles 2015, Gomez-Alvarez und Saldana 2016, Leaver und Rauschecker 2016). Bei den dichotischen Testprozeduren der LIPP-Batterie sind für den Vergleich der drei Tonsignale jedes Triplets nicht nur die angeführten anatomisch-physiologischen Strukturen bzw. Kodierungsmechanismen erforderlich, vielmehr muss das Signaltuplett zunächst im sensorischen Register des auditorischen Kortex zwischengespeichert werden, um anschließend im Nachhinein auf Signalunterschiede untersucht zu werden (Buser *et al.* 2007, Ludwig 2009). Insgesamt prüfen die *dichotischen Tests für Tondauer und Pegel* somit kontralaterale di- und telenzepale Diskriminationsleistungen, wobei das konkrete strukturelle Korrelat nicht näher eingegrenzt werden kann; die *dichotische Frequenzdiskrimination* bildet die strukturelle Integrität der tonotopischen Organisation der kontralateralen di- und telenzepalen Strukturen ab.

Entsprechend der unterschiedlichen beteiligten Hörbahnstrukturen und physiologischen Mechanismen wiesen die Ergebnisse der LIPP-Testbatterie in der vorliegenden Studie ein variables *Verhalten bezüglich Alters- und Schwerhörigkeitseffekten* auf: Bei der Tondauer- und Pegeldiskrimination fand sich sowohl bei interauraler als auch bei dichotischer Präsentation eine altersbedingte Verschlechterung der Schwellen, ohne dass ein zusätzlicher negativer Effekt von Schwerhörigkeit nachgewiesen werden konnte. Vielmehr wies das schwerhörige Ü60-Subkollektiv tendenziell, jedoch nicht signifikant bessere Schwellen auf als das normalhörende Ü60-Subkollektiv. Im Vergleich zum Kontrollkollektiv waren die Schwellen beider Ü60-Subkollektive jeweils um das 1,5- bis 1,8-fache erhöht. Hingegen zeigten sowohl die interaural als auch dichotisch ermittelten Frequenzdiskriminationsschwellen eine (zwar nicht signifikante, aber dennoch deutlich ersichtliche) Tendenz zur Verschlechterung mit zunehmendem Alter, insbesondere aber einen signifikanten negativen Effekt von Altersschwerhörigkeit. Zudem waren deutlich höhere Steigerungsfaktoren der Schwellen beider Ü60-Subkollektive im Vergleich zum Kontrollkollektiv zu beobachten. Vorstudien zu zentralen Diskriminationsleistungen zeichnen ebenfalls ein inhomogenes Bild bezüglich Alters- und Schwerhörigkeitseffekten. In Studien mit vergleichbaren Diskriminationstests stellten Bertoli *et al.* (2002) bei subjektiver Schwellenermittlung für kleinste Tonunterbrechungen (Gap Detection) keinen signifikanten Alterseffekt fest, bei objektiver Ermittlung der Gap-Detection-Schwelle durch Ableitung der Mismatch Negativity konnte ein

solcher jedoch nachgewiesen werden. Bungert-Kahl *et al.* (2004) postulierten in ihrer Publikation zu Normwerten der LIPP-Diskriminationsschwellen einen Alterseffekt, eine statistische Auswertung hinsichtlich zusätzlicher Schwerhörigkeitseffekte wurde nicht vorgenommen. Freigang *et al.* (2011) beschrieben ebenfalls bei LIPP-Diskriminationsschwellen einen signifikante Verschlechterung mit zunehmendem Alter und teilweise bei einzelnen Tests der Pegel- und Frequenzdiskrimination mit zunehmender Schwerhörigkeit, wobei sich diesbezüglich jedoch kein systematisches Muster erkennen ließ. Gap-Detection-Tests und ITD-Schwellenermittlung zeigten bei Gallun *et al.* (2014) eine voneinander unabhängige Abnahme der Diskriminationsleistung mit zunehmendem Alter und schlechterem Hörvermögen. In Bezug auf statische Schallquellenlokalisierung und räumliches Auflösungsvermögen stellten verschiedene Autoren eine signifikante Verschlechterung des Diskriminationsvermögens mit zunehmendem Alter, jedoch nicht mit zunehmender Schwerhörigkeit fest (Dobrevva *et al.* 2011, Freigang *et al.* 2014, Freigang *et al.* 2015) und erzielten damit übereinstimmende Ergebnisse mit den dazu äquivalenten Resultaten der interauralen Tondauer- und Pegeldiskrimination in der vorliegenden Studie.

Pathophysiologisch sind unter Berücksichtigung von Vorstudien folgende Mechanismen als Erklärung der Verschlechterung der Diskriminationsleistungen mit zunehmendem Alter und zum Teil bei Altersschwerhörigkeit zu diskutieren:

(1) *Makroskopische Umbauprozesse im Hörsystem:* MR-morphometrisch konnte teilweise eine hörvermögensunabhängige Volumenabnahme des auditorischen Kortex mit zunehmendem Alter nachgewiesen werden, die nicht durch die allgemeine Altersatrophy erklärt werden konnte (Profant *et al.* 2014, Ouda *et al.* 2015), zum Teil fand sich auch eine Assoziation des Kortexvolumens mit dem peripheren Hörverlust (Eckert *et al.* 2012). Eine Studie von Penhune *et al.* (2003), die eine intakte Hörkortexstruktur bei kongenital Tauben belegen konnte, stützt jedoch die Annahme, dass nicht das periphere Hörvermögen, sondern eher die Alterskomponente ausschlaggebend für die Abnahme des auditorischen Kortexvolumens bei Presbyakusis ist. Möglicherweise ist auch die Integrität subkortikaler auditorischer Fasertrakte durch Altersveränderungen beeinträchtigt (Lutz *et al.* 2007, Profant *et al.* 2014, Cardin 2016).

(2) *Abnahme der zentralen Neuronenpopulationen:* N-Acetylaspartat ist ein indirekter Marker neuronaler Integrität. Eine MR-spektroskopisch belegte Abnahme der N-Acetylaspartat-Konzentration mit zunehmendem Alter legt indirekt eine hörvermögensunabhängig sinkende Neuronenzahl im auditorischen Kortex mit steigendem Alter nahe (Profant *et al.* 2013).

(3) *Änderungen im Zellmetabolismus und den Transmittersystemen:* Ein MR-spektroskopisch nachgewiesener alters- und schwerhörigkeitsabhängiger Lactatanstieg im Hörkortex könnte auf eine

entsprechende mitochondriale Dysfunktion mit gesteigertem anaeroben Stoffwechsel und höherem oxidativen Stress sowie entsprechend beeinträchtigte Zellintegrität hinweisen (Profant *et al.* 2013). Sowohl tier- als auch humanexperimentell fand sich eine altersbedingte Verschiebung des synaptischen Neurotransmittergleichgewichtes zuungunsten (v.a. Glycin- und GABA-vermittelter) Inhibition. Die konsekutiv verminderte Suppression von Störschallkomponenten im Vergleich zum Nutzsignal könnte verschlechterte zentral-auditive Verarbeitungsleistungen mitverursachen (Caspary *et al.* 2008, Profant *et al.* 2013, Ouda *et al.* 2015).

(4) *Zentrale Plastizität und Änderungen im kortikalen Aktivierungsmuster:* Tierexperimentell ließ sich eine hörverlustinduzierte tonotopische Reorganisation der zentralen Hörbahnanteile mit vergrößerter Repräsentation intakter tiefer Frequenzen nachweisen (Billings *et al.* 2012). Mit zunehmendem Alter ändert sich zudem das kortikale Aktivierungsmuster bei der Verarbeitung auditiver Stimuli: Neben teils gesteigerter Aktivität im auditorischen Kortex selbst bei Stimulation mit Rauschsignalen konnten Studien, die komplexe Stimuli verwendeten, auch ein vermehrtes Heranziehen frontaler Kortexareale belegen, ggf. als Kompensation verminderter Leistungsfähigkeit der auditorischen Kortexareale (Profant *et al.* 2015, Cardin 2016). Dass bis ins Alter auditive Lern- und Umstrukturierungsprozesse möglich sind, lässt sich auch am Erfolg auditiven Trainings bei älteren Kollektiven ablesen (Anderson und Kraus 2013).

Insgesamt können die o.g. Mechanismen, die entsprechend teils allein bei zunehmendem Alter, teils allein bei zunehmendem Hörverlust bzw. auch in Kombination zum Tragen kamen, durch jeweils unterschiedlich hohe Relevanz eine gute Erklärung für das variable Verhalten der einzelnen LIPP-Testmodi und -Präsentationsarten in der vorliegenden Studie liefern.

Unter Berücksichtigung aller genannten topodiagnostischen und funktionellen Zuordnungen lassen sich die LIPP-Ergebnisse wie folgt zusammenfassen und interpretieren:

- Mit zunehmendem Alter, jedoch unabhängig vom Hörvermögen, kommt es zu einer Verschlechterung des *statischen Richtungshörens* auf Ebene von oberer Olive, Lemniscus lateralis und Colliculus inf. (repräsentative LIPP-Tests: interaurale Tondauer- und Pegeldiskrimination).
- Das Auflösungsvermögen des Hirnstamms für sich horizontal bewegende Schallquellen, d.h. das *dynamische horizontale Richtungshören*, hängt bei Presbyakusis signifikant vom Hörvermögen ab und zeigt zudem eine deutliche, jedoch in dieser Studie nicht signifikante Tendenz zur Verschlechterung mit zunehmendem Alter. Das exakte strukturmorphologische Korrelat im Hirnstamm ist in diesem Fall unklar (repräsentativer LIPP-Test: interaurale Frequenzdiskrimination).

- Die basalen Schallparameter *Tondauer und Pegel* können mit zunehmendem Alter unabhängig vom Hörvermögen di- und telenzephal schlechter aufgelöst werden, auch in diesem Fall ist die exakte strukturmorphologische Zuordnung nicht klar (repräsentative LIPP-Tests: dichotische Tondauer- und Pegeldiskrimination).
- Die *Integrität der tonotopischen Grundstruktur* der di- und telenzephalen Hörbahnanteile nimmt bei Presbyakusis mit sinkendem Hörvermögen und tendenziell schon mit zunehmendem Alter ab (repräsentativer LIPP-Test: dichotische Frequenzdiskrimination).
- Als selektiver zentraler Test liefert die LIPP-Batterie weitere Evidenz für die Existenz einer vom peripheren Hörverlust unabhängigen, primär *zentralen Presbyakusiskomponente* (repräsentative LIPP-Tests: alle; v.a. aber die nicht hörverlustabhängige interaurale und dichotische Tondauer- und Pegeldiskrimination).

4.2.4 Veränderungen des Sprachverständnisses - OLSA

Die Auswertung von Sprachsignalen stellt eine der komplexesten Aufgaben des Hörsystems dar, insbesondere dann, wenn diese aus einem Hintergrundgeräusch herausgefiltert werden müssen. Diese im Alltag häufige Situation erfordert nicht nur (1) ein möglichst intaktes peripheres Hörvermögen, sondern auch (2) multiple zentral-auditive Signalextraktionsmechanismen und (3) kognitive Fähigkeiten wie Aufmerksamkeit und Merkfähigkeit (Anderson und Kraus 2010, Billings *et al.* 2012, Lee 2015, Ouda *et al.* 2015).

In der vorliegenden Studie zeigte sich eine jeweils signifikante Verschlechterung der OLSA-Ergebnisse vom Kontrollkollektiv über das normalhörende bis hin zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv. Ergebnisse äquivalenter Kollektive konnten trotz ausführlicher Literaturrecherche nicht aufgefunden werden. Im daher lediglich möglichen Vergleich mit dem OLSA-Referenzwert imponierten ein über dem Referenzwert des OLSA gelegenes Resultat des Kontrollkollektivs, ein etwa dem Referenzwert entsprechendes Ergebnis des normalhörenden Ü60-Subkollektivs und eine deutlich schlechter als der Grenzwert rangierende SVS L_{50} des schwerhörigen Ü60-Subkollektivs.

Multiple *Pathomechanismen* können zur Erklärung dieses Gesamtergebnisses herangezogen werden, wobei deren Darstellung nach den o.g. drei Hauptgesichtspunkten gegliedert ist:

(1) *Beeinträchtigung des peripheren Hörvermögens:*

(a) *Sensorineurale Schwerhörigkeit:* Bereits beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv war trotz strenger Einschlusskriterien im Reintonaudiogramm, das topodiagnostisch a.e. die kochleäre und N. VIII-Funktion widerspiegelt (Musiek und Chermak 2015), eine relevante Hochtonschwerhörigkeit ab 4kHz festzustellen, die naturgemäß beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv noch deutlich stärker

ausgeprägt war. Hierdurch ist eine Beeinträchtigung der Wahrnehmung hoher Konsonanten zu erwarten (Lehnhardt und Laszig 2009) mit entsprechend herabgesetztem Gesamtsprachverständnis. Der negative Einfluss zunehmender Hochtonschwerhörigkeit auf das Sprachverständnis im Störgeräusch konnte auch in anderen Studien nachgewiesen werden (z.B. George *et al.* 2007, Johannesen *et al.* 2016).

(b) Herabgesetzte Funktion der äußeren Haarzellen: Die DPOAE-Schwellenbestimmung ließ in Zusammenschau mit den Ergebnissen anderer Studien auf eine multidimensionale Beeinträchtigung der äußeren Haarzellfunktion bei zunehmender Schwerhörigkeit und ggf. schon mit höherem Alter schließen (siehe 4.2.1). Der entsprechende Trennschärfe- und Amplitudenmodulationsverlust des Gehörs hat negativen Einfluss auf die Extraktion relevanter Sprachanteile aus dem unterlagerten Störgeräusch (Johannesen *et al.* 2016).

(c) Kochleäre Synaptopathie: Selbst bei unbeeinträchtigter тонаudiometrischer Hörschwelle konnte tier- und humanexperimentell ein deutlicher kochleärer Synapsenverlust bei Presbyakusis nachgewiesen werden, der insbesondere überschwellig ansprechende (high-threshold) Nervenfasern betrifft. Die Weiterleitung des physiologischerweise überschwelligen Sprachsignals vor den Störschallanteilen niedrigeren Pegels ist daher möglicherweise überproportional beeinträchtigt, so dass insgesamt das Sprachverständnis im Störgeräusch abnimmt (Sergeyenko *et al.* 2013, Kujawa und Liberman 2015, Viana *et al.* 2015, Liberman und Kujawa 2017).

(2) Beeinträchtigung zentral-auditiver Schallverarbeitung:

(a) Beeinträchtigung zentral-auditiver Leitungsstrukturen: Alters- und schwerhörigkeitsassoziiert konnte im Rahmen der vorliegenden Studie eine Beeinträchtigung der Signaltransduktion im Hirnstamm nachgewiesen werden, die sich in einer Latenzverlängerung der BERA-IPL III-V widerspiegelte (siehe 4.2.2). MR-Studien lassen annehmen, dass ggf. auch die Integrität der subkortikalen auditorischen Fasertrakte abnehmen könnte (Lutz *et al.* 2007, Cardin 2016). In beiden Fällen könnte die multidimensionale Zeitanalyse des Sprachschalls, die nur bei exakter Signalübertragung möglich ist, durch verschlechterte Leitungseigenschaften erschwert werden.

(b) Beeinträchtigung des statischen und dynamischen Richtungshörens: Im Freifeld kommt dem Richtungshören beim Extrahieren des nur aus einer Richtung kommenden Sprachsignals aus dem aus multiplen Richtungen kommenden Umgebungsgeräusch eine wichtige Rolle zu (Anderson und Kraus 2010, Middlebrooks 2015). Im LIPP-Test konnte eine alters- und teils hörverlustbedingte Beeinträchtigung der Schallquellenlokalisationsfähigkeit belegt werden (siehe 4.2.3).

(c) Beeinträchtigung des Auflösungsvermögens basaler Schallcharakteristika (Tondauer, Pegel, Frequenz) und zeitlicher Feinstruktur von Sprache: Eine mit zunehmendem Alter und teils

hörverlustassoziiert herabgesetzte Diskriminationsfähigkeit für die basalen Schallparameter Tondauer, Pegel und Frequenz, die für die Identifikation der Sprachschallkomponenten aus dem Gesamtschall essenziell ist (George *et al.* 2007, Anderson und Kraus 2010, Atcherson *et al.* 2015, Lee 2015, Johannesen *et al.* 2016), konnte ebenfalls in der LIPP-Testbatterie nachgewiesen werden. Zudem belegen weitere Studien ein vermindertes Auflösungsvermögen für die zeitliche Feinstruktur von Sprache mit zunehmendem Alter und bei Schwerhörigkeit (King *et al.* 2014, Moore 2016).

(3) *Erhöhte kognitive Anforderungen mit Mehraktivierung frontaler Kortextareale:* O.g. Beeinträchtigungen im auditorischen System führen bei Presbyakusis möglicherweise zu einer zusätzlichen Aktivierung nicht-auditorischer frontaler Kortextareale, durch deren kognitive Mehrleistung Defizite des auditorischen Systems teilkompensiert werden könnten (Atcherson *et al.* 2015, Cardin 2016). Eine äquivalente Schlussfolgerung ließ auch die Assoziation besserer Ergebnisse eines Sprachverständnistests im Störgeräusch mit höherem präfrontalen Kortextvolumen in einer Studie von Wong *et al.* (2010) zu.

Insgesamt ließ sich beim OLSA eine deutliche Verschlechterung des Ergebnisses mit zunehmender *Schwerhörigkeit* feststellen. Ob das schlechtere Ergebnis des normalhörenden Ü60-Subkollektivs im Vergleich zum Kontrollkollektiv auf einen reinen *Alterseffekt* zurückzuführen ist, erscheint aufgrund des bereits relevanten peripheren Hochtonhörverlusts fragwürdig. Vielmehr ist hier eine Mischung aus Alters- und Schwerhörigkeitseffekten anzunehmen, deren jeweiliger Anteil kaum ermittelbar ist.

Eine klare *topodiagnostische Zuordnung* der OLSA-Ergebnisse ist nicht möglich, da bislang keine Studien zu den für das OLSA-Resultat hauptsächlich relevanten Hörbahnstrukturen existieren. Insbesondere ist nicht klar, ob das Ergebnis des OLSA mehr durch das periphere Hörvermögen oder als Sprachtest mit durch das Störgeräusch verminderter extrinsischer Redundanz (siehe **1.1.2.2.2**) primär von zentral-auditiven Schallverarbeitungsleistungen abhängt. Nichtsdestotrotz liefert der OLSA in der vorliegenden Hörstudie eine wichtige Aussage, da er das alltägliche Hörerleben der Studienteilnehmer praxisnah widerspiegelt, das ja wesentlich von einem intakten Sprachverständnis bestimmt wird. Zugleich integriert der OLSA - wie oben dargelegt - a.e. die Defizite multipler Hörbahnstationen und kann damit ein übergeordneter und zusammenfassender Test für die Integrität multipler Strukturen des Hörsystems gewertet werden.

4.2.5 Einschätzung des Hörhandicaps - HHIE-S

Die medizinische Diagnosestellung allein lässt im Regelfall nur unzureichende Rückschlüsse auf die mit einer Erkrankung einhergehende Beeinträchtigung des Patienten zu (World Health

Organization 2002). Die Weltgesundheitsorganisation WHO stellt daher zusätzlich zur ätiologisch orientierten Diagnoseklassifikation ICD (*International Statistical Classification of Diseases and Related Health Problems*) eine Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit (*International Classification of Functioning, Disability and Health, ICF*) zur Verfügung. Funktionsfähigkeit (engl. *Functioning*) eines Individuums bzw. Behinderung (*Disability*) durch eine Erkrankung werden hierin als Ergebnis einer komplexen Interaktion zwischen ggf. beeinträchtigten Körperfunktionen bzw. -strukturen, Aktivitäten eines Individuums und Partizipation (Einbezogenheit in Lebenssituationen) gesehen, wobei Umweltfaktoren (z.B. sozialer Hintergrund) und personenbezogene Faktoren (z.B. Alter und Geschlecht) zusätzlich modulierend wirken (World Health Organization 2001, World Health Organization 2005). Insgesamt konzipiert die WHO damit ein biopsychosoziales Krankheitsmodell.

Bezogen auf Hörverlust bzw. Presbyakusis stellt das HHIE-S mit seinen emotionalen und sozialen Items ein valides Messinstrument für die psychosozialen Folgen einer Höreinschränkung dar. Im Rahmen dieser Studie fand sich ein jeweils signifikanter Anstieg der *medianen (und auch durchschnittlichen) HHIE-S-Scores* und damit des empfundenen Hörhandicaps vom jungen Kontrollkollektiv über das normalhörende Ü60-Subkollektiv bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (siehe 3.2.1). Der beim Kontrollkollektiv eindeutig im Bereich eines nicht vorhandenen Handicaps liegende mediane HHIE-S-Score von 2 Punkten, der klare Schwerpunkt der HHIE-S-Ergebnisse im niedrigen Bereich von 0 bis 2 Punkten bei mehr als drei Viertel der Kontrollpersonen und die Gesamtwertung des Scores als ein nicht vorhandenes Handicap bei 28 der 30 jungen Studienteilnehmer belegen, dass deren Hörvermögen nicht nur durch die verwendeten apparatetechnischen Messmethoden, sondern auch subjektiv als unbeeinträchtigt angesehen wird. In der Literatur konnten keine HHIE-S-Scores ähnlich junger Kollektive zum unmittelbaren Vergleich mit den vorliegenden Studienergebnissen gefunden werden. Das normalhörende Ü60-Subkollektiv gab in den meisten Fällen ein subjektiv noch unbeeinträchtigtes Hörvermögen, in 40% der Fälle jedoch ein bereits moderates bzw. schweres Hörhandicap an. Der im Vergleich zum Kontrollkollektiv höhere mediane HHIE-S-Score zeigt, dass die in den vorhergehenden Kapiteln (siehe 4.2.1 bis 4.2.4) diskutierten Einschränkungen der einzelnen Hörleistungen in Summe durchaus zu einer relevanten subjektiven Hörbeeinträchtigung führen können. Die in der vorliegenden Studie sogar strenger ausgelegte WHO-Eingruppierung des Hörvermögens als unbeeinträchtigt (*no impairment*) wird also von immerhin 40% der Studienteilnehmer dieses Subkollektivs subjektiv nicht geteilt. Erwartungsgemäß lag der mediane HHIE-S-Score beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv noch schlechter; die Mehrheit der Studienteilnehmer dieses

Kollektivs gab ein moderates Handicap an. Im Gegensatz zum jungen Kontrollkollektiv existieren für beide Ü60-Subkollektive Vorstudien mit HHIE-S-Ergebnissen für weitgehend äquivalente Alters- und Hörverlustkollektive. Eine Einordnung der in dieser Hörstudie angegebenen HHIE-S-Scores im Vergleich zu den Vorstudien über Mediane, Mittelwerte bzw. prozentuale Verteilungen der Handicap-Schweregrade liefert insgesamt ein uneinheitliches Bild: Teilweise finden sich in der Literatur vergleichbare Ergebnisse (Brennan-Jones *et al.* 2015), teilweise für beide Hörverlustgruppen tendenziell bessere Ergebnisse (Ventry und Weinstein 1983, Jupiter und DiStasio 1998, Chang *et al.* 2009, Tomioka *et al.* 2013). Diese Inhomogenität ist einerseits durch die in einigen Vorstudien im Vergleich zu dieser Hörstudie anders definierten Grenzwerte für Hörverlustklassen und HHIE-S-Handicapschweregrade zu erklären. Andererseits wird das subjektiv empfundene Hörhandicap - kongruent mit dem biopsychosozialen Funktionsfähigkeitsmodell der WHO - durch eine komplexe Interaktion multipler, z.T. nichtaudiologischer, Kofaktoren bestimmt. Neben dem objektivierbaren tonaudiometrischen Hörverlust spielen u.a. Allgemeinzustand, Persönlichkeit, Alter, sozioökonomischer und psychosozialer Status eine wichtige Rolle (Ventry und Weinstein 1982, Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996, Chang *et al.* 2009). Aufgrund der jeweils individuell unterschiedlich ausgeprägten Kofaktoren von Kollektiv zu Kollektiv ist eine Abweichung der HHIE-S-Ergebnisse in unterschiedlichen Studien und damit die inhomogene Einordnung der eigenen Ergebnisse in die der Vorliteratur nicht überraschend. Die in der vorliegenden Studie beobachtete Zunahme der *Streubreite des HHIE-S-Scores* vom Kontrollkollektiv bis zum schwerhörigen Ü60-Subkollektiv deckt sich mit früheren Studien, die eine besonders große Variabilität des subjektiven Hörhandicaps im moderaten Hörverlustbereich angeben (Ventry und Weinstein 1983, Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996). O.g. Kofaktoren wirken in diesem Hörverlustbereich offenbar besonders stark modulierend auf das subjektiv angegebene Handicap.

Zur Aufdeckung relevanter Einflussfaktoren auf das Hörhandicap wurde in vorangehenden Studien zum HHIE-S bzw. der Vollversion HHIE teilweise eine Korrelations- bzw. Regressionsanalyse durchgeführt. Auch in der vorliegenden Hörstudie wurden *Korrelationen* zwischen dem HHIE-S-Score sowie den im HNO-ärztlichen Routinebetrieb erhobenen Parametern (Alter, tonaudiometrischer Hörverlust, Sprachaudiogramm) berechnet, um deren Einfluss auf das Hörhandicap einschätzen zu können. Während das Alter aufgrund der großen Streuung der HHIE-S-Ergebnisse bei den Ü60-Subkollektiven insgesamt nur eine moderate Korrelation (Spearman-Koeffizient 0,62) mit dem HHIE-S-Score aufwies, konnten für den tonaudiometrischen Durchschnittshörverlust beider Ohren bei 500, 1000, 2000 und 4000Hz (PTA 500-4000Hz) und das

OLSA-Ergebnis jeweils knapp starke Korrelationen (Spearman-Koeffizient 0,71 bzw. 0,76) nachgewiesen werden. Damit liegen die hier erhobenen Koeffizienten im oberen Bereich bzw. höher als die in der Literatur angegebenen Korrelationskoeffizienten des HHIE(-S) mit dem Durchschnittshörverlust (in der Literatur 0,45-0,75 (Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996, Jupiter und DiStasio 1998, Chang *et al.* 2009, Tomioka *et al.* 2013, Diao *et al.* 2014)), der Sprachaudiometrie (in der Literatur 0,41-0,59 (Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996)) bzw. dem Alter (in der Literatur 0,14-0,48 (Bertoli *et al.* 1996, Diao *et al.* 2014)). Ein unmittelbarer Vergleich der Koeffizienten wird jedoch durch die Verwendung von Pearson-Korrelationen bzw. dem Fehlen von 4kHz in der Hörverlustdefinition in einigen Studien erschwert. Die in der vorliegenden Studie deutlich bessere Korrelation des HHIE-S-Scores mit dem Alter lässt sich durch das breite überdeckte Altersintervall des gesamten Studienkollektivs und damit einer schon rein rechnerischen Begünstigung starker Korrelationen erklären. Tonaudiometrischer Durchschnittshörverlust bzw. Sprachaudiometrie imponieren in dieser Studie als wesentliche und empfindliche Einflussfaktoren des Hörhandicaps. Allerdings implizieren die nur knapp starken Koeffizienten und die damit belegte imperfekte Korrelation die Bedeutung weiterer Kofaktoren auf das Hörhandicap und sprechen damit wie die o.g. Literatur für die Multifaktorialität des Handicaps. Der Versuch einer *Grenzwertziehung für einen relevanten HHIE-S-Anstieg* beim tonaudiometrischen Durchschnittshörverlust PTA 500-4000Hz beider Ohren ergab a.e. eine Schwelle von 30dB HL. Dieser Wert liegt niedriger als die von den Urhebern des HHIE bzw. HHIE-S und in einer weiteren Studie ermittelte Schwelle von 40dB HL (Ventry und Weinstein 1983, Weinstein und Ventry 1983, Jupiter und DiStasio 1998). Grund für die niedrigere Schwelle könnte die zusätzliche Berücksichtigung von 4kHz und damit einer für das Konsonantenverständnis wichtigen Frequenz (Lehnhardt und Laszig 2009) in der hier verwendeten Hörverlustdefinition im Vergleich zu den Vorstudien sein. Hörverluste bei 4000Hz begünstigen durch ein schlechteres Konsonanten- bzw. Sprachverständnis aufgrund dessen starker Korrelation mit dem HHIE-S-Score höhere HHIE-S-Werte, so dass sich die Anstiegsgrenze des HHIE-S bei zusätzlicher Berücksichtigung von 4kHz in der Hörverlustdefinition in einen tendenziell niedrigeren Hörverlustbereich verschiebt. Für die Sprachaudiometrie mittels OLSA lag der Schwellenwert für einen relevanten HHIE-S-Anstieg a.e. bei einer SVS L_{50} von -6dB SNR; Vergleichswerte in der Literatur lagen nicht vor. Interessanterweise rangiert diese Schwelle nur wenig oberhalb des SVS L_{50} -Normwertes von -7,1dB SNR, was nochmals - wie bereits die Korrelationsanalyse - den großen Stellenwert eines lediglich gering verschlechterten Sprachverständnisses für das Hörhandicap unterstützt.

Zusammenfassend belegen die Ergebnisse des HHIE-S in dieser Hörstudie die Variabilität der subjektiv empfundenen Höreinschränkung bei tonaudiometrisch identischem Hörvermögen und bestätigen die in zahlreichen Vorstudien bereits belegte Multifaktorialität des Hörhandicaps und die schwierige Vorhersagbarkeit der subjektiven Hörbeeinträchtigung im Einzelfall. Das im Median steigende Hörhandicap beider Ü60-Kollektive im Vergleich zum Kontrollkollektiv ist ein Beleg für eine subjektiv steigende Höreinschränkung mit zunehmendem Alter und tonaudiometrischem Hörverlust, wobei eine genauere Trennung des jeweiligen Anteils dieser beiden Faktoren auf das Hörhandicap aufgrund der weiteren Einflussfaktoren kaum durchführbar ist.

Tabelle 4.1: Überblick über Alters- und Schwerhörigkeitseffekte bei den Hörleistungen

Alters- und Schwerhörigkeitseffekte werden, soweit möglich, betroffenen Hörbahnstrukturen bzw. funktionellen Hörleistungen zugeordnet, mögliche Pathomechanismen sind in den entsprechenden Einzelkapiteln näher erläutert. *Effektstärke*: +: statistisch signifikanter Effekt; +?: statistisch signifikanter, jedoch in Gesamtzusammenschau nicht gesichert erscheinender Effekt; ?: statistisch nicht signifikante Tendenz; -: fehlender Nachweis eines statistisch signifikanten Effekts.

	DPOAE-Schwelle	BERA		LIPP-Diskriminationsschwellen				SVS L₅₀ des OLSA
		IPL I-III	IPL III-V	Interaurale DD / PD	Interaurale FD	Dichotische DD / PD	Dichotische FD	
Alters-effekt	+? (Anstieg)	-	+ (Latenz-zunahme)	+ (schlechter)	? (schlechter)	+ (schlechter)	? (schlechter)	+? (schlechter)
Schwerhörigkeits-effekt	+ (Anstieg)	-	-	-	+ (schlechter)	-	+ (schlechter)	+ (schlechter)
Struktur-morphologisches Korrelat / Repräsentierter Funktions-aspekt	Äußere Haarzellen	N. VIII bis Nucl. cochlearis (a.e. Myelin-Struktur)	Hirnstamm (A.e. für Lokalisation verantwortliche Fasertrakte / Kerngebiete von Nucl. cochlearis bis Lemniscus lateralis)	Hirnstamm (MSO / LSO, Lemniscus lateralis, IC): Statisches Richtungshören in der Horizontalen	Hirnstamm (exaktes Korrelat unklar): Dynamisches Richtungshören in der Horizontalen	Di- / Telenzephalon (exaktes Korrelat unklar)	Di- / Telenzephalon: Integrität der tonotopischen Struktur	A.e. sämtliche sprachreiz-verarbeitende Systeme (exaktes Korrelat unklar)
Mögliche Pathomechanismen	Noxenbedingte Abnahme der Zahl äußerer Haarzellen		Beeinträchtigung der verbindenden Fasertrakte Verändertes Transmittergleichgewicht Beeinträchtigung des zentralen Myelins Alterierte interneuronale Verschaltung im Nucl. cochlearis	Atrophie des auditorischen Kortex Beeinträchtigung der subkortikalen Fasertrakte Abnahme der zentralen Neuronenpopulationen Veränderter Zellmetabolismus Verändertes Transmittergleichgewicht Zentrale Plastizität mit Reorganisationsprozessen Veränderte kortikale Aktivierung				Beeinträchtigung des peripheren Hörvermögens Beeinträchtigung zentral-auditiver Schallverarbeitung (Nervenleitung, Richtungshören, Diskriminationsleistung) Erhöhte kognitive Inanspruchnahme

4.2.6 Zusammenfassung

Tabelle 4.1 fasst die in den Kapiteln 4.2.1 bis 4.2.4 dargelegten Studienergebnisse zusammen. Die Funktionseinbußen multipler Hörbahnstationen bzw. Hörleistungen schlagen sich auch subjektiv in einem beeinträchtigten Hörerleben nieder, das sich bei beiden Ü60-Subkollektiven im ansteigenden HHIE-S-Score (siehe 4.2.5) widerspiegelt.

4.3 Ausgewählte praxisrelevante Aspekte der Hörstudie

Im Folgenden werden ausgewählte alltags- und praxisrelevante Aspekte der Hörstudie dargelegt.

4.3.1 Exaktheit der DPOAE-Hörschwellschätzung im Vergleich zur subjektiven Tonaudiometrie

Bereits früh seit dem erstmaligen Nachweis otoakustischer Emissionen wurden Versuche unternommen, die subjektive Hörschwelle objektiv und kooperationsunabhängig über DPOAE-Messungen ermitteln zu können, beispielsweise über Korrelationen des DPOAE-Amplitudenverlaufs mit dem Hörschwellenverlauf (Gaskill und Brown 1990, Kummer *et al.* 1998). Im Vergleich zur objektiven Hörschwellschätzung mittels Hirnstammaudiometrie bieten die DPOAE den Vorteil einer kürzeren Messzeit und eines höheren Automatisierungsgrades bei der Auswertung (Boege und Janssen 2002). Boege und Janssen legten 2002 den Grundstein für die DPOAE-Hörschwellschätzung mittels extrapolierter DP-Wachstumsfunktionen, die im in dieser Studie eingesetzten COAST-Algorithmus von Rosner weiterentwickelt wurde (Boege und Janssen 2002, Rosner 2011).

Im Vergleich der objektiv über DPOAE geschätzten mit der subjektiven Hörschwelle fand sich in der vorliegenden Studie bei *subkollektiv- und frequenzübergreifender* Gesamtbetrachtung eine starke Korrelation zwischen DPOAE-Hörschwellschätzung und Reintonaudiometrie (Spearman-Koeffizient 0,70 bzw. 0,73). Die hohe Korrelation zwischen beiden Schwellenermittlungsverfahren spiegelte sich auch in der Ähnlichkeit der durchschnittlichen Hörschwellenverläufe und in der sehr kleinen mittleren Abweichung beider Schwellen ($MW \pm SD = 1,6 \pm 11 \text{ dB HL}$) wider. Weitere Studien zur DPOAE-Hörschwellschätzung mit vergleichbarer Methodik erzielten trotz teilweise anders charakterisierter Studienkollektive oft ähnlich gute Korrelationsergebnisse mit (z.T. Pearson-) Korrelationskoeffizienten zwischen 0,54 und 0,83 und vergleichbaren Standardabweichungen zwischen 7,6dB HL und 12,7dB HL (Boege und Janssen 2002, Gorga *et al.* 2003, Schmuziger *et al.* 2006, Rosner *et al.* 2011, Zelle *et al.* 2017b). Die in der vorliegenden Studie beobachtete Tendenz, mittels DPOAE-Hörschwellschätzung die subjektive Hörschwelle zu überschätzen (d.h. zu

schlecht einzuschätzen) wurde in Vorstudien nur teilweise beobachtet (Schmuziger *et al.* 2006, Rogers *et al.* 2010), andere Autoren geben eher eine Schwellenunterschätzung (d.h. zu gute Einschätzung) durch extrapolierte DP-Wachstumsfunktionen an (Boege und Janssen 2002, Hatzopoulos *et al.* 2009).

Die für die Patientenversorgung in der Praxis deutlich wichtigere Analyse der Abweichungen beider Schwellenermittlungsverfahren *beim einzelnen Individuum* mittels Histogrammen zeichnete ein inhomogeneres Bild: Zwar ergab sich bei subkollektiv- und frequenzübergreifender Betrachtung der Einzelergebnisse ebenfalls eine zumeist (in knapp 70% der Fälle) gute Übereinstimmung von subjektiver und objektiver Hörschwelle, im Einzelfall waren jedoch Abweichungen bis zu 52dB HL zu verzeichnen. Dies schränkt die Anwendbarkeit des DPOAE-Schwellenschätzverfahrens in der Praxis nicht unerheblich ein, da es bei alleiniger Anwendung der DPOAE-Schwellenschätzung nicht vorhersehbar ist, in welchem Fall eine deutliche Abweichung von der subjektiven Tonschwelle zu befürchten ist. Ein analoges Fazit zogen auch Schmuziger *et al.* (2006) bei der Evaluation eines kommerziell vertriebenen DPOAE-Hörschwellenschätzalgorithmus.

Mit zunehmender *Frequenz* wurde in der vorliegenden Studie insgesamt eine Abnahme der Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellenschätzung beobachtet. Diese Tendenz wurde bereits in zahlreichen Vorstudien dokumentiert, die die höchsten Korrelationen zwischen tonaudiometrischer und objektiver Hörschwelle im mittleren Frequenzbereich angeben (Gorga *et al.* 2003, Schmuziger *et al.* 2006, Hatzopoulos *et al.* 2009, Rogers *et al.* 2010, Zelle *et al.* 2017b). Auch mit zunehmendem *Alter* und zunehmender *Schwerhörigkeit* nahm die Genauigkeit der DPOAE-Schwellenschätzung - zusätzlich zu einem sinkenden Anteil nachweisbarer DPOAE- deutlich ab. Ähnlich wie bei den DPOAE-Schwellen (siehe 4.2.1) gelang trotz strenger Selektion der Ü60-Subkollektive keine exakte Einzelauftrennung von Alters- und Schwerhörigkeitseffekten auf die Schätzgenauigkeit, da bereits beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv in den DPOAE-relevanten Frequenzen 2kHz bis 8kHz ein relevanter Anstieg der tonaudiometrischen Hörschwelle im Vergleich zum Kontrollkollektiv vorlag. Dies schränkt die Aussagekraft der vorliegenden Studienergebnisse für die klinische Praxis jedoch kaum ein: bei älteren Patientenkollektiven ist eine Abnahme der Genauigkeit des DPOAE-Schwellenschätzalgorithmus zu erwarten, selbst wenn der entsprechende Patient (wie das normalhörende Ü60-Subkollektiv) zur am besten hörenden über-60-jährigen Bevölkerungsgruppe zählt. Vorstudien zu Alters- bzw. Schwerhörigkeitseffekten auf die Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellenschätzung konnten trotz ausführlicher Literaturrecherche nicht gefunden werden.

Folgende Aspekte sind zu diskutieren, um o.g. Ergebnisse *ursächlich* näher einordnen zu können:

(1) *Selektive Erfassung der äußeren Haarzellfunktion*: Im Gegensatz zur Reintonaudiometrie, deren Resultate als subjektives Messverfahren von der Gesamtfunktion sämtlicher Hörbahnstationen abhängen, erfassen die DPOAE selektiv die äußere Haarzellfunktion und bleiben von der Funktion der inneren Haarzellen bzw. der retrokochleären Hörbahn weitgehend unbeeinflusst (Boege und Janssen 2002, Klinke *et al.* 2005, Janssen 2009, Zelle *et al.* 2017b). Da exogene Noxen auf äußere und innere Haarzellfunktion unterschiedlich starken Schädigungseinfluss nehmen (Gorga *et al.* 2005, Uchida *et al.* 2008, Lehnhardt und Laszig 2009) und im Rahmen der Presbyakusis auch Veränderungen an retrokochleären Hörbahnanteilen auftreten (siehe 4.2.2, 4.2.3 und 4.2.4), sind Abweichungen zwischen der objektiven DPOAE-Hörschwellschätzung und der subjektiven tonaudiometrischen Hörschwelle bereits verfahrenstechnisch-physiologisch zu erwarten. Dies kann eine Erklärung für Schwellenabweichungen in allen Subkollektiven und über alle Frequenzen hinweg sein.

(2) *Stehende-Wellen-Problematik*: Im höheren Frequenzbereich ab 4kHz kann der tatsächliche Primärtonschalldruck am Trommelfell aufgrund des Auftretens stehender Wellen und Resonanzen im Gehörgang vom theoretisch aufgrund der In-Ear-Kalibrierung zu erwartenden Wert abweichen (Janssen und Müller 2008, Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011). Die sich dadurch möglicherweise ergebenden Messfehler könnten die mit zunehmender Frequenz abnehmende Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellschätzung begründen.

(3) *DPOAE-Feinstruktur*: Neben der primären DPOAE-Quelle am Kochleaort f_2 , an der die sog. nichtlineare Distorsionskomponente der DPOAE generiert wird, existiert eine sekundäre DPOAE-Quelle am Ort der charakteristischen Frequenz $2f_1-f_2$, die die sog. kohärente Reflexionskomponente der DPOAE liefert. Die im Gehörgang gemessene Amplitude der DPOAE entspricht der Vektorsumme beider Komponenten, wobei durch die teils konstruktive, teils destruktive Interferenz der Komponenten eine quasi-periodische Amplitudenoszillation der DPOAE bei Variation der Primärtonfrequenzen entsteht, die sog. DPOAE-Feinstruktur (Mauermann *et al.* 1999b, Mauermann *et al.* 1999a, Shera und Guinan 1999, Janssen 2009, Zelle *et al.* 2017a). Abhängig davon, ob bei der Messfrequenz der DPOAE-Hörschwellschätzung eine konstruktive bzw. destruktive Interaktion beider Quellen stattfindet, können somit deutliche Schwankungen in der DPOAE-Amplitude und entsprechende Schätzfehler bei der Hörschwellschätzung auftreten (Dalhoff *et al.* 2013, Zelle *et al.* 2017b). Abdala und Dhar (2012) konnten eine Zunahme der DPOAE-Feinstruktur bei Erwachsenen mit steigendem Alter nachweisen. Dies könnte eine mögliche Erklärung für die abnehmende Schätzgenauigkeit bei beiden Ü60-Subkollektiven im Vergleich zum jungen Kontrollkollektiv liefern.

(4) *Schalldruckpegelabnahme der DPOAE*: Aufgrund des mit zunehmender Schwerhörigkeit und ggf. zunehmendem Alter abnehmenden Schalldruckpegels der DPOAE (siehe 4.2.1) verkleinert sich bei beiden Ü60-Subkollektiven das überdeckte DPOAE-Amplitudenintervall der DP-Wachstumsfunktion im Vergleich zum Kontrollkollektiv. Hierdurch können bereits geringe, beispielsweise aufgrund o.g. Feinstruktur bzw. stehender Wellen auftretende Schalldruckpegelschwankungen einzelner Messpunkte der DP-Wachstumsfunktion zu einer relevanten Änderung der Lage der Regressionsgerade und damit der geschätzten Hörschwelle führen. Dieser Effekt könnte eine weitere Erklärung für die geringere Genauigkeit der DPOAE-Hörschwellenschätzung bei den Ü60-Subkollektiven sein.

Für die *klinisch-praktische Anwendung der DPOAE-Hörschwellenschätzung* ergeben sich damit zusammenfassend folgende Schlussfolgerungen:

- Bei jungen, gut hörenden Patientenkollektiven ist in den meisten Fällen eine gute Schätzgenauigkeit der DPOAE-Hörschwellenschätzung zu erwarten.
- Bei älteren Kollektiven muss über einen breiten Hörverlustbereich mit einer Abnahme der Schätzgenauigkeit des Verfahrens gerechnet werden. Zudem nimmt mit dem häufig beeinträchtigten Hörvermögen der Anteil der erfolgreichen Schwellenmessungen physiologisch bedingt erheblich ab.
- Unabhängig vom Kollektiv ist eine Abnahme der Schätzgenauigkeit mit steigender Frequenz zu beobachten. Zudem können im Einzelfall bei allen Altersgruppen, Hörverlustklassen und Frequenzen zum Teil deutliche Abweichungen zwischen objektiver und subjektiver Hörschwelle auftreten.

Insgesamt sind somit bei der DPOAE-Hörschwellenschätzung neben den physiologischen Frequenz- (im Tieftonbereich Messungenauigkeiten durch Atem- und Pulsgeräusche (Janssen und Müller 2008)) und Hörverlustlimitationen (DPOAE regelmäßig nur bis zu einem maximalen Hörverlust von 50dB nachweisbar (Janssen 2009, Mrowinski und Scholz 2011)) weitere, z.T. patientenabhängige Fallstricke in Hinblick auf die Zuverlässigkeit des erzielten Ergebnisses zu beachten. Um das Schätzverfahren in der klinischen Routine zuverlässig einsetzen zu können, sind weitere Verfeinerungen der Messalgorithmen erforderlich. Klinisch vielversprechend ist beispielsweise ein aktueller Ansatz, die sekundäre DPOAE-Quelle und damit Feinstruktur der DPOAE zu unterdrücken, um die Messgenauigkeit zu erhöhen (Zelle *et al.* 2017b); zur endgültigen klinischen Bewertung müssen jedoch noch weitere Studien folgen.

4.3.2 Anwendbarkeit der LIPP-Testbatterie in der Routinediagnostik

Mit der LIPP-Testbatterie steht ein relativ neues Messinstrument zur Verfügung, das die Verarbeitung der basalen Schallparameter Frequenz, Pegel und Tondauer durch ein einheitliches Testkonzept prüft und zugleich über Variation der Präsentationsart eine differenzierte Diagnostik der zentral-auditiven Verarbeitung in Hirnstamm und Großhirn zulässt (siehe 1.1.2.2.3).

In der Praxis zeigte sich in dieser Hörstudie, dass ein Großteil der Studienteilnehmer die Aufgabenstellung bei der LIPP-Testbatterie erfolgreich absolvierte; dies lässt sich an den hohen Raten valider Messergebnisse bei gleichzeitig integrierter Plausibilitätsprüfung ablesen. Lediglich bei der interauralen Tondauerdiskrimination waren zum Teil deutlich herabgesetzte Erfolgsquoten erkennbar; diese Testmodalität bereitete v.a. älteren Studienteilnehmern am meisten Probleme. Das Testkonzept über Spielkarten und Touchscreen-Bedienung wurde durchweg positiv bewertet. Im Gegensatz zu den Erstbeschreibern (Bungert-Kahl *et al.* 2004, Biedermann *et al.* 2008, Ludwig 2009), die ein One-up-One-down-Prinzip verwendeten, wurde im Rahmen des hier angewandten LIPP-Protokolls ein One-up-Two-down-Prinzip eingesetzt (siehe 2.6.3), um die Zuverlässigkeit der Ergebnisse zu erhöhen. Dadurch erhöhte sich allerdings durch die höhere benötigte Gesamttrialzahl die Messzeit: Inkl. binauraler Trainingsphase benötigten die Studienteilnehmer durchschnittlich 45 Minuten, um die gesamte LIPP-Testbatterie durchzuführen, was bei 15 Testprozeduren (3 binaurale, 6 interaurale, 6 dichotische Prozeduren) etwa drei Minuten je Einzeltest entspricht. Dieser Zeitaufwand erscheint nicht unwesentlich für die Anwendbarkeit der in dieser Studie verwendeten LIPP-Version im klinischen Alltag, da sich hierdurch die benötigte Diagnostikzeit pro Patient nicht unerheblich verlängert. Ein Verzicht auf die initiale binaurale Trainingsphase zur Zeitersparnis sollte nach den Erfahrungen dieser Studie dennoch nicht erfolgen, da diese für die nachfolgenden dichotischen Prozeduren wertvolle Hörerfahrung liefert und vielen Studienteilnehmern erst die Testparameter und den generellen Testablauf verdeutlicht, ohne dass sofort zuverlässige Ergebnisse erzielt werden müssen. Sinnvoll erscheint eher ein Verzicht auf die Tondauerdiskriminationstests, da deren Aussagekraft bei diesem Testmodus im Wesentlichen äquivalent zur Pegeldiskrimination ist und diese von vielen älteren Teilnehmern als schwierig empfunden wurden. Ein großer Vorteil des verwendeten Testkonzeptes mittels Spielkarten und Touchscreen-Bedienung liegt zudem darin, dass der Patient nach initialer Anleitung die weiteren Tests weitestgehend selbstständig durchführen kann, so dass der personaltechnische Aufwand für die LIPP-Testbatterie überschaubar bleibt.

Die nur geringen Korrelationen der theoretisch topodiagnostisch äquivalenten LIPP-Ergebnisse mit BERA III-V bzw. OLSA zeigen, dass die LIPP-Testbatterie BERA bzw. OLSA nicht ersetzen kann, da sich die Aussagekraft der Testverfahren unterscheidet. Die LIPP-Testbatterie prüft eben *nicht*

Hirnstammlaufzeiten bzw. Sprachverständnis, sondern die Verarbeitung basaler Schallparameter, und liefert dadurch zusätzliche - und nicht identische - Informationen über die Integrität der zentral-auditiven Hörbahn. In Hinblick auf Presbyakusis könnte dies eine Identifizierung von Patienten mit zentral-auditiven Verarbeitungsdefiziten ermöglichen, die im Falle eines peripheren Hörverlustes besonders von auditivem Training zusätzlich zur peripheren Amplifikation durch Hörgeräte profitieren bzw. im Falle eines regelrechten Tonaudiogramms frühzeitig einem präventiven auditiven Training zugeführt werden könnten. Weitere Studien müssen jedoch folgen, um diese theoretisch plausible diagnostische Wertigkeit auch in der Praxis zu bestätigen.

4.3.3 Trainingseffekte bei den Sprachverständnistests

Bereits während der Konzeption des OLSA wurde von Wagener und Mitarbeitern (Wagener *et al.* 1999b) ein Trainingseffekt bei wiederholter OLSA-Anwendung mit Verbesserung der SVS L_{50} um 1 bis 2dB SNR beschrieben, der im Wesentlichen (ca. 1dB SNR) zwischen der Darbietung der ersten beiden OLSA-Durchgänge auftritt. In den Handbüchern der kommerziell erhältlichen OLSA-Versionen wird daher die Durchführung mind. einer Testliste (ursprünglich eine Liste à 30 Sätzen, aktuell 2 Listen à 20 Sätzen) vor der gewerteten Messung empfohlen (HörTech gGmbH 2000, HörTech gGmbH 2011). Diese Empfehlung bestätigte sich auch nach den Erfahrungen der vorliegenden Hörstudie: Im Mittel erzielten die Probanden bei zwei Testlisten à 30 Sätzen einen Trainingseffekt um 1,2dB SNR, was dem initial beschriebenen 1dB-Wert sehr nahe kommt. Von einem Weglassen der Trainingsphase und stattdessen pauschalem Abzug von 1dB SNR vom Resultat der ersten Testliste zur Zeitersparnis muss eindeutig abgeraten werden, da der Trainingseffekt im hier untersuchten Kollektiv große Variabilität aufwies (Verbesserung um 6,3dB SNR bis hin zu minimaler Verschlechterung um 0,1dB SNR).

Für den SUN-Test wurden Trainingseffekte bislang nie untersucht; eine entsprechende Analyse wurde daher in dieser Studie vorgenommen. Aufgrund des monauralen Testkonzeptes wurde in diesem Fall eine Verbesserung der Ergebnisse zwischen zeitlich erstem und zweitem Testohr als Trainingseffekt definiert. Im Gesamtkollektiv ergab sich kein systematischer Trainingseffekt bei einem medianen Unterschied von 0 richtig verstandenen Logatomen zwischen erstem und zweitem Testohr. Dies kommt dem Konzept des SUN-Tests als Screeninginstrument entgegen, da die Durchführung einer zeitaufwendigen Trainingsphase in diesem Falle entbehrlich ist.

4.3.4 Aussagekraft von OLSA und SUN-Test im Vergleich

OLSA und SUN verfolgen unterschiedliche Ziele. Während der OLSA als ausführliches, exaktes Testinstrumentarium unter Berücksichtigung von Trainingseffekten, Verwendung phonematisch

balancierter Testlisten und durch Präsentation ganzer Sätze inkl. natürlichen Wortübergängen ausgearbeitet wurde (Wagener *et al.* 1999a, Wagener *et al.* 1999b, Wagener *et al.* 1999c), wurde der SUN-Test als schnelles Screening-Instrument konzipiert, das mittels Logatomen zeiteffizient Patienten mit Indikation zu weiterführender Diagnostik von Hörgesunden unterscheiden soll (Paglialonga *et al.* 2011b, Paglialonga *et al.* 2013, Paglialonga *et al.* 2014). Diese unterschiedliche Herangehensweise spiegelte sich in der vorliegenden Studie in der nur moderaten Korrelation zwischen den Ergebnissen von OLSA und SUN-Test wider. Die Betrachtung der Einzelergebnisse zeigte, dass der OLSA durch sein elaborierteres Konzept bereits signifikante Unterschiede im durchschnittlichen Sprachverständnis im Störgeräusch zwischen beiden normalhörenden Subkollektiven (Kontrollen vs. Ü60 NH_{mWHO}) erkennen kann, die auf den o.g. Unterschieden in der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Hörbahnstationen zwischen beiden Subkollektiven beruhen. Hingegen bescheinigte der SUN-Test beiden normalhörenden Subkollektiven ein nicht signifikant unterschiedliches Sprachverständnis im Störgeräusch allenfalls mit einer Tendenz zu schlechteren Leistungen des Ü60-Subkollektivs und erkannte erst zwischen beiden normalhörenden Kollektiven und schwerhörigem Subkollektiv signifikante Differenzen. Für die Praxis erscheint es daher trotz deutlicher diagnostischer Zeitersparnis nach den Ergebnissen der vorliegenden Studie nicht sinnvoll, ein ausführliches Sprachtestverfahren wie den OLSA durch das kurze SUN-Screeninginstrument zu ersetzen, da hierbei eine fein abgestufte Diagnostik durch ein eher dichotom unterscheidendes Testverfahren abgelöst wird, das geringe Defizite der Sprachverarbeitung nicht widerspiegelt.

4.3.5 Das HHIE-S als sinnvolle Ergänzung zur Standardhördiagnostik

Die meisten Menschen suchen ärztlichen Rat aufgrund einer subjektiv wahrgenommenen Beeinträchtigung des Alltags durch eine Erkrankung (World Health Organization 2010). Im biopsychosozialen Erkrankungsmodell der WHO (siehe 4.2.5) liegt der Grund ärztlicher Konsultation daher insbesondere bei den psychosozialen Komponenten einer Erkrankung, weniger bei den biologischen Faktoren. Auf die Presbyakusis bezogen, sind vor allem Einschränkungen der Alltagsaktivitäten und der sozialen Interaktion durch mangelndes Sprachverständnis relevant. Im Gegensatz dazu besteht momentan der Schwerpunkt ärztlicher Routinediagnostik bei Presbyakusis (Tonaudiogramm und Sprachaudiometrie) in der Identifikation gestörter Körperfunktionen, also der biologischen Komponente im WHO-Modell. Die routinemäßige Anwendung des HHIE-S könnte durch Erfassung der emotionalen und situationalen Folgen eingeschränkten Hörvermögens den Fokus der ärztlichen Standardhördiagnostik um psychosoziale Aspekte erweitern, bedeutet jedoch zusätzlichen Zeitaufwand und damit Kosten.

Im Rahmen dieser Hörstudie, die sämtliche o.g. Testverfahren anwandte, wurde daher untersucht, ob sich die psychosoziale Einschränkung durch die Presbyakusis hinreichend genau bereits durch die Standardverfahren Tonaudiogramm und Sprachaudiometrie vorhersagen lässt, so dass die Anwendung eines zusätzlichen Handicap-Erfassungstools wie des HHIE-S entbehrlich ist. Es wurden anhand der Verteilung des HHIE-S-Scores Grenzwerte für den tonaudiometrischen Durchschnittshörverlust beider Ohren bei 500, 1000, 2000 und 4000Hz (PTA 500-4000Hz) und die Sprachaudiometrie mittels OLSA ermittelt, anhand derer das Gesamtstudienkollektiv in zwei Gruppen mit höherer bzw. geringerer Wahrscheinlichkeit für eine subjektive Höreinschränkung eingeteilt wurde; anschließend wurde die Verteilung der Handicapschweregrade innerhalb dieser Gruppen ermittelt (siehe 3.3.1). Weder der tonaudiometrische Durchschnittshörverlust noch die Sprachaudiometrie trennten jedoch scharf zwischen subjektiv beeinträchtigten und unbeeinträchtigten Studienteilnehmern. In allen Gruppen gab es sowohl Personen mit als auch ohne subjektives Hörhandicap gemäß HHIE-S, wobei das Risiko für ein stärkeres Handicap in der jeweils schlechter hörenden Gruppe (höherer tonaudiometrischer Durchschnittshörverlust bzw. schlechteres Sprachaudiometrieergebnis) erhöht war. Auch die Kombination beider Grenzwerte lieferte keinen relevanten Zuwachs an diagnostischer Trennschärfe. Damit bestätigen sich die Aussagen weiterer Studien, die eine nur unzureichende Vorhersagbarkeit des subjektiven Hörhandicaps durch apparatetechnische audiometrische Routinemethoden angeben (Ventry und Weinstein 1982, Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996, Chang *et al.* 2009).

Für die Praxis erbringt die vorliegende Studie somit weitere Evidenz, dass die Implementation eines zusätzlichen Handicap-Erfassungstools in die HNO-ärztliche Routinediagnostik bei einem älteren Risikokollektiv sinnvoll und gerechtfertigt erscheint. Hierdurch ließe sich nicht nur das Phänomen der Presbyakusis aus psychosozialer Sicht vollständiger erfassen; auch die Patiententherapiecompliance ließe sich besser einschätzen, da Patienten mit einem relevanten subjektiven Handicap beispielsweise eine Hörgerätetherapie mit den damit einhergehenden Nachteilen (Tragekomfort, veränderter Höreindruck etc.) tendenziell besser akzeptieren (Bertoli *et al.* 1996). Die Empfehlung zur zusätzlichen Handicaperfassung wird nicht nur von zahlreichen Autoren u.a. von HHIE(-S)-Studien geteilt (Ventry und Weinstein 1982, Ventry und Weinstein 1983, Weinstein und Ventry 1983, Bertoli *et al.* 1996, Chang *et al.* 2009, Baiduc *et al.* 2013); auch WHO und die American Speech-Language-Hearing Association (ASHA) legen eine standardmäßige Handicaperfassung durch ein spezielles Messinstrument in der Routinediagnostik nahe (World Health Organization 2001, World Health Organization 2005, American Speech-Language-Hearing-Association 2016). In der Praxis wäre das HHIE-S nach den Erfahrungen der

vorliegenden Studie aufgrund der kurzen Dauer (ca. 2 Minuten), der selbstständigen Durchführbarkeit und des geringen Auswertungsaufwands gut geeignet, zu diesem Zweck standardmäßig bei allen Presbyakusis-Risikopatienten zum Einsatz zu kommen.

4.3.6 Die WHO-Klassifikation des Hörvermögens: Limitationen

In ihrer Klassifikation des Hörvermögens berücksichtigt die WHO den durchschnittlichen Hörverlust der tonaudiometrischen Frequenzen 500, 1000, 2000 und 4000Hz des besser hörenden Ohres (World Health Organization 1991). Die darauf aufbauende Schwerhörigkeitsklassifikation wurde in verstrengter und leicht modifizierter Form auch zur Einteilung des Studienkollektivs in normalhörende und schwerhörige Personen genutzt (siehe 2.1). Wie in den vorangegangenen Abschnitten diskutiert, konnten jedoch bereits beim „normalhörenden“ Ü60-Subkollektiv signifikant schlechtere Ergebnisse in multiplen Testparametern und auch bei der subjektiven Höreinschränkung im Vergleich zum Kontrollkollektiv nachgewiesen werden. Für die praktische Anwendung der WHO-Klassifikation muss daher stets bedacht werden, dass trotz der Zuordnung des Hörvermögens zur „no impairment“-Kategorie der WHO-Klassifikation bereits relevante Höreinbußen vorliegen können. Hierauf verweist auch die WHO in ihrem Kommentar zu den einzelnen Kategorien (World Health Organization 1991).

Interessehalber wurde in der vorliegenden Studie über Korrelationsberechnung eruiert, ob eine stärkere Berücksichtigung des bei Presbyakusis beeinträchtigten Hochtonbereiches (d.h. Hinzunahme der Frequenzen 6kHz und 8kHz) in der Klassifikation eine bessere Übereinstimmung der Höreinstufung mit den alltagsrelevanten Ergebnissen der Sprachverständnistests und der subjektiven Hörbeeinträchtigung vorliegt (siehe 3.3.5). Die nur minimal besseren Korrelationen zeigten jedoch, dass der zeitliche und messtechnische Zusatzaufwand bei Berücksichtigung der Hochtonfrequenzen nicht durch einen relevanten Trennschärfezuwachs der Klassifikation bei Presbyakusis gerechtfertigt wird. Für die praktische Anwendung der WHO-Klassifikation als orientierende, universal einsetzbare Einstufung des Hörvermögens erscheint daher die Beschränkung auf die bisher berücksichtigten Frequenzen als guter Kompromiss zwischen geringem zeitlichen, apparatetechnischen und finanziellen Messaufwand und hinreichend genauer Einschätzung des Hörvermögens.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Studie wurden alters- und altersschwerhörigkeitsassoziierte Veränderungen der Hörleistungen mithilfe einer topodiagnostisch strukturierten Testbatterie erfasst. Die möglichst scharfe Trennung zwischen Alters- und Schwerhörigkeitseffekten war bei einem Großteil der Untersuchungsmethoden durch ein Dreigruppenkonzept bei der Kollektivauswahl möglich. Insgesamt konnte gezeigt werden, dass sich die Presbyakusis multidimensional manifestiert; für fast alle untersuchten Hörbahnabschnitte von der Cochlea bis zum telenzephalen Hörkortex konnte eine signifikante Beeinträchtigung des Funktionsniveaus mit steigendem Alter, zunehmender Altersschwerhörigkeit oder beiden Faktoren nachgewiesen werden. Selbst bei тонаudiometrisch intaktem Hörvermögen ist bei einem älteren Patientenkollektiv eine Funktionseinbuße multipler Hörbahnstationen mit konsekutiven Defiziten auditiver Leistungen zu erwarten. Insbesondere konnte die vorliegende Studie weitere Evidenz für eine primäre, vom peripheren Hörvermögen unabhängige zentrale Presbyakusiskomponente liefern, die in den letzten Jahren zunehmend diskutiert wurde.

Wie bei vorangegangenen vergleichbaren Studien bestand eine wesentliche Schwierigkeit darin, eine ausreichend große Anzahl über-60-Jähriger mit unbeeinträchtigtem Hörvermögen zu rekrutieren. Trotz Sichtung der gesamten Klinikdatenbank der HNO-Klinik des Klinikums rechts der Isar (und damit eines überregionalen Klinikums der Maximalversorgung) nach Patienten mit geeigneten Hörschwellenverläufen ergab sich beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv bereits ein relevanter Hochtonhörverlust, der die Ergebnisinterpretation von Untersuchungsmethoden mit breit erfasstem Frequenzspektrum (DPOAE, OLSA) erschwerte. Für zukünftige vergleichbar konzipierte Studien ist daher ein multizentrischer Rekrutierungsansatz mit verstrengerten Einschlusskriterien im Hochtonbereich zu erwägen. Zudem sind longitudinale Studienkonzepte vonnöten, um an ein und demselben Studienkollektiv die Dynamik der festgestellten Defizite über einen längeren Zeitraum analysieren und ggf. pathogenetisch näher zuordnen zu können.

Neben dem primären Studienziel, nämlich der Erfassung alters- und schwerhörigkeitsassoziiierter Hörleistungsveränderungen bei Presbyakusis, konnte auch das sekundäre Studienziel, die Evaluation audiometrischer Methoden, erfolgreich umgesetzt werden. Während die LIPP-Testbatterie als praxistaugliches zentral-auditives Diagnoseinstrument und der SUN-Test als geeignete subjektive Screeningmethode für eine abklärungsbedürftige Höreinschränkung bewertet werden konnten, wurden bei der objektiven DPOAE-Hörschwellenschätzung Fallstricke festgestellt, die die Ergebnisinterpretation im Einzelfall erschweren und weitere Verfeinerungen der Methodik

vor breiter Anwendbarkeit erforderlich machen. Eine routinemäßige Anwendung des HHIE-S bei einem älteren Patientenkollektiv zur Erfassung des subjektiven Hörerlebens erschien sinnvoll und umsetzbar.

Insgesamt ergeben sich unter Berücksichtigung der Studienergebnisse für die Zukunft drei zentrale Gesichtspunkte beim Management der Presbyakusis als häufigster erworbener Schwerhörigkeit mit aktuell steigender Prävalenz:

1. Steigerung des Präventionserfolgs, insbesondere durch Minimierung vermeidbarer Noxen (Lärmexposition, Meidung ototoxischer Agentien, adäquate Therapie kardiovaskulärer Risikofaktoren und otologischer Erkrankungen).
2. Adäquate und frühzeitige Diagnosestellung inkl. Erfassung zentraler Presbyakusis-Komponenten (z.B. mittels LIPP-Testbatterie), Erfassung des subjektiven Hörerlebens (z.B. mittels HHIE-S) und breitflächigem Screening des älteren Risikokollektivs (z.B. mittels SUN-Test).
3. Einführung multimodaler Therapiekonzepte, die neben dem Ausgleich peripherer Hörleistungsdefizite durch Amplifikation auch die Kompensation zentraler Funktionseinbußen, z.B. mittels auditiven Trainings, anstreben.

6 Literaturverzeichnis

- Abdala, C. und Dhar, S. (2012). "Maturation and aging of the human cochlea: a view through the DPOAE looking glass." *J Assoc Res Otolaryngol* **13**(3): 403-421.
- American Academy of Audiology (2012). "Report from the Academy Task Force on Central Presbycusis." Aufgerufen am 05.12.2016, von <http://www.audiology.org/publications-resources/document-library/central-presbycusis>.
- American Speech-Language-Hearing-Association (1997). "Guidelines for Audiologic Screening." Aufgerufen am 27.09.2015, von www.asha.org/policy.
- American Speech-Language-Hearing-Association (2016). "Adult Hearing Screening." Aufgerufen am 11.07.2017, von http://www.asha.org/PRPSpecificTopic.aspx?folderid=8589942721§ion=Key_Issues.
- Anderson, S. und Kraus, N. (2010). "Objective Neural Indices of Speech-in-Noise Perception." *Trends Amplif* **14**(2): 73-83.
- Anderson, S. und Kraus, N. (2013). "Auditory Training: Evidence for Neural Plasticity in Older Adults." *Perspect Hear Hear Disord Res Res Diagn* **17**: 37-57.
- Arnal, L. H., Poeppel, D. und Giraud, A. L. (2015). "Temporal coding in the auditory cortex." *Handb Clin Neurol* **129**: 85-98.
- Atcherson, S. R., Nagaraj, N. K., Kennett, S. E. und Levissee, M. (2015). "Overview of Central Auditory Processing Deficits in Older Adults." *Semin Hear* **36**(3): 150-161.
- Baiduc, R. R., Poling, G. L., Hong, O. und Dhar, S. (2013). "Clinical measures of auditory function: the cochlea and beyond." *Dis Mon* **59**(4): 147-156.
- Behrbohm, H., Kaschke, O. und Nawka, T. (2012). *Kurzlehrbuch Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Bender, R., Lange, S. und Ziegler, A. (2007). "Wichtige Signifikanztests." *Dtsch Med Wochenschr* **132 Suppl 1**: e24-25.
- Bertoli, S., Probst, R. und Jordan, P. (1996). "Das Hörhandicap - Eine Ergänzung zum audiometrischen Hörverlust. Ergebnisse einer explorativen Studie über auditive Kommunikationsstörungen im Alter." *HNO* **44**(7): 376-384.
- Bertoli, S., Smurzynski, J. und Probst, R. (2002). "Temporal resolution in young and elderly subjects as measured by mismatch negativity and a psychoacoustic gap detection task." *Clin Neurophysiol* **113**(3): 396-406.
- Biedermann, F., Bungert, P., Dorrscheidt, G. J., von Cramon, D. Y. und Rubsamen, R. (2008). "Central auditory impairment in unilateral diencephalic and telencephalic lesions." *Audiol Neurootol* **13**(2): 123-144.

- Billings, C., Tremblay, K. und Willot, J. (2012). The Aging Auditory System. In: Burkard, R. F. und Tremblay, K. (Hrsg.). *Translational Perspectives in Auditory Neuroscience*. San Diego, Plural Publishing Inc: 63-82.
- Blanchet, C., Pommie, C., Mondain, M., Berr, C., Hillaire, D. und Puel, J. L. (2008). "Pure-tone threshold description of an elderly French screened population." *Otol Neurotol* **29**(4): 432-440.
- Boege, P. und Janssen, T. (2002). "Pure-tone threshold estimation from extrapolated distortion product otoacoustic emission I/O-functions in normal and cochlear hearing loss ears." *J Acoust Soc Am* **111**(4): 1810-1818.
- Boettcher, F. A. (2002). "Presbycusis and the auditory brainstem response." *J Speech Lang Hear Res* **45**(6): 1249-1261.
- Brant, L. J. und Fozard, J. L. (1990). "Age changes in pure-tone hearing thresholds in a longitudinal study of normal human aging." *J Acoust Soc Am* **88**(2): 813-820.
- Brennan-Jones, C. G., Taljaard, D. S., Brennan-Jones, S. E., Bennett, R. J., Swanepoel, W. und Eikelboom, R. H. (2015). "Self-reported hearing loss and manual audiometry: A rural versus urban comparison." *Aust J Rural Health* DOI: 10.1111/ajr.12227.
- Bungert-Kahl, P., Biedermann, F., Dörrscheidt, G. J., von Cramon, D. Y. und Rübsamen, R. (2004). "Psychoacoustic test tools for the detection of deficits in central auditory processing: Normative data." *Z Audiol* **43**(2): 48-71.
- Burkard, R. F. und Sims, D. (2001). "The human auditory brainstem response to high click rates: aging effects." *Am J Audiol* **10**(2): 53-61.
- Buser, K., Schneller, T. und Wildgrube, K. (2007). *Medizinische Psychologie, medizinische Soziologie*. München [u.a.], Elsevier, Urban & Fischer.
- Cardin, V. (2016). "Effects of Aging and Adult-Onset Hearing Loss on Cortical Auditory Regions." *Front Neurosci* **10**: 199.
- Caspary, D. M., Ling, L., Turner, J. G. und Hughes, L. F. (2008). "Inhibitory neurotransmission, plasticity and aging in the mammalian central auditory system." *J Exp Biol* **211**(Pt 11): 1781-1791.
- Chang, H. P., Ho, C. Y. und Chou, P. (2009). "The factors associated with a self-perceived hearing handicap in elderly people with hearing impairment--results from a community-based study." *Ear Hear* **30**(5): 576-583.
- Chu, N. S. (1985). "Age-related latency changes in the brain-stem auditory evoked potentials." *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* **62**(6): 431-436.
- Cilento, B. W., Norton, S. J. und Gates, G. A. (2003). "The effects of aging and hearing loss on distortion product otoacoustic emissions." *Otolaryngol Head Neck Surg* **129**(4): 382-389.
- Ciorba, A., Hatzopoulos, S., Bianchini, C., Aimoni, C., Skarzynski, H. und Skarzynski, P. H. (2015). "Genetics of presbycusis and presbystasis." *Int J Immunopathol Pharmacol* **28**(1): 29-35.
- Cochran, W. G. (1957). "Analysis of Covariance: Its Nature and Uses." *Biometrics* **13**(3): 261-281.

- Costa, P., Benna, P., Bianco, C., Ferrero, P. und Bergamasco, B. (1990). "Aging effects on brainstem auditory evoked potentials." *Electromyogr Clin Neurophysiol* **30**(8): 495-500.
- Dalhoff, E., Turcanu, D., Vetesnik, A. und Gummer, A. W. (2013). "Two-source interference as the major reason for auditory-threshold estimation error based on DPOAE input-output functions in normal-hearing subjects." *Hear Res* **296**: 67-82.
- de Heer, W. A., Huth, A. G., Griffiths, T. L., Gallant, J. L. und Theunissen, F. E. (2017). "The Hierarchical Cortical Organization of Human Speech Processing." *J Neurosci* **37**(27): 6539-6557.
- Diao, M., Sun, J., Jiang, T., Tian, F., Jia, Z., Liu, Y. und Chen, D. (2014). "Comparison between self-reported hearing and measured hearing thresholds of the elderly in China." *Ear Hear* **35**(5): e228-232.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2002). DIN EN 60645-1:2002-09, Akustik - Audiometer - Teil 1: Reinton-Audiometer (IEC 60645-1:2001). Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2005). DIN EN 60645-5:2005-08, Akustik - Audiometer - Teil 5: Geräte zur Messung der akustischen Impedanzen/Admittanzen des Gehörs (IEC 60645-5:2004). Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2009). DIN EN ISO 389-9:2009-12, Akustik - Standard-Bezugspegel für die Kalibrierung audiometrischer Geräte - Teil 9: Vorzugs-Messbedingungen zur Bestimmung von Bezugs-Hörschwellenpegeln (ISO 389-9:2009). Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2011). DIN EN ISO 8253-1:2011-04, Akustik - Audiometrische Prüfverfahren - Teil 1: Grundlegende Verfahren der Luft- und Knochenleitungsschwellenaudiometrie mit reinen Tönen (ISO 8253-1:2010). Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. (2014). E DIN EN ISO 7029:2014-09, Entwurf: Akustik - Statistische Verteilung von Hörschwellen in Bezug auf das Alter und das Geschlecht (ISO/CD 7029:2014). Berlin, Beuth Verlag GmbH.
- Dobрева, M. S., O'Neill, W. E. und Paige, G. D. (2011). "Influence of aging on human sound localization." *J Neurophysiol* **105**(5): 2471-2486.
- Eckert, M. A., Cute, S. L., Vaden, K. I., Jr., Kuchinsky, S. E. und Dubno, J. R. (2012). "Auditory cortex signs of age-related hearing loss." *J Assoc Res Otolaryngol* **13**(5): 703-713.
- Elberling, C. und Parbo, J. (1987). "Reference data for ABRs in retrocochlear diagnosis." *Scand Audiol* **16**(1): 49-55.
- Elliot, D. N., Riach, W. D., Sheposh, J. P. und Trahiotis, C. (1966). "Discrimination performance of high school sophomores on a battery of auditory tests." *Acta Otolaryngol* **62**(s216): 1-59.
- Fischer, N., Weber, B. und Riechelmann, H. (2016). "Presbyakusis – Altersschwerhörigkeit." *Laryngo-Rhino-Otologie* **95**(07): 497-510.
- Fowler, C. G. und Noffsinger, D. (1983). "Effects of stimulus repetition rate and frequency on the auditory brainstem response in normal cochlear-impaired, and VIII nerve/brainstem-impaired subjects." *J Speech Hear Res* **26**(4): 560-567.
- Fowler, J., Cohen, L. und Jarvis, P. (1998). *Practical statistics for field biology*. Chichester, Wiley.

- Fransen, E., Topsakal, V., Hendrickx, J. J., Van Laer, L., Huyghe, J. R., Van Eyken, E., Lemkens, N., Hannula, S., Maki-Torkko, E., Jensen, M., Demeester, K., Tropitzsch, A., Bonaconsa, A., Mazzoli, M., Espeso, A., Verbruggen, K., Huyghe, J., Huygen, P. L., Kunst, S., Manninen, M., Diaz-Lacava, A., Steffens, M., Wienker, T. F., Pyykko, I., Cremers, C. W., Kremer, H., Dhooge, I., Stephens, D., Orzan, E., Pfister, M., Bille, M., Parving, A., Sorri, M., Van de Heyning, P. und Van Camp, G. (2008). "Occupational noise, smoking, and a high body mass index are risk factors for age-related hearing impairment and moderate alcohol consumption is protective: a European population-based multicenter study." *J Assoc Res Otolaryngol* **9**(3): 264-276; discussion 261-263.
- Freigang, C., Richter, N., Rubsamen, R. und Ludwig, A. A. (2015). "Age-related changes in sound localisation ability." *Cell Tissue Res* **361**(1): 371-386.
- Freigang, C., Schmidt, L., Wagner, J., Eckardt, R., Steinhagen-Thiessen, E., Ernst, A. und Rubsamen, R. (2011). "Evaluation of central auditory discrimination abilities in older adults." *Front Aging Neurosci* **3**: 6.
- Freigang, C., Schmiedchen, K., Nitsche, I. und Rubsamen, R. (2014). "Free-field study on auditory localization and discrimination performance in older adults." *Exp Brain Res* **232**(4): 1157-1172.
- Friederici, A. D. (2015). "White-matter pathways for speech and language processing." *Handb Clin Neurol* **129**: 177-186.
- Frisina, R. D. und Walton, J. P. (2006). "Age-related structural and functional changes in the cochlear nucleus." *Hear Res* **216-217**: 216-223.
- Füessl, H. S., Middeke, M. R. F. und Würtemberger, G. (2014). *Anamnese und klinische Untersuchung*. Stuttgart, Thieme.
- Gallun, F. J., McMillan, G. P., Molis, M. R., Kempel, S. D., Dann, S. M. und Konrad-Martin, D. L. (2014). "Relating age and hearing loss to monaural, bilateral, and binaural temporal sensitivity." *Front Neurosci* **8**: 172.
- Gaskill, S. A. und Brown, A. M. (1990). "The behavior of the acoustic distortion product, 2f1-f2, from the human ear and its relation to auditory sensitivity." *J Acoust Soc Am* **88**(2): 821-839.
- Gates, G. A., Feeney, M. P. und Mills, D. (2008). "Cross-sectional age-changes of hearing in the elderly." *Ear Hear* **29**(6): 865-874.
- Gates, G. A., Mills, D., Nam, B. H., D'Agostino, R. und Rubel, E. W. (2002). "Effects of age on the distortion product otoacoustic emission growth functions." *Hear Res* **163**(1-2): 53-60.
- Gates, G. A. und Mills, J. H. (2005). "Presbycusis." *Lancet* **366**(9491): 1111-1120.
- Gemeinsamer Bundesausschuss (2014). "Richtlinie des Gemeinsamen Bundesausschusses über die Verordnung von Hilfsmitteln in der vertragsärztlichen Versorgung (Hilfsmittel-Richtlinie/Hilfsm-RL) in der Neufassung vom 21. Dezember 2011/ 15. März 2012, zuletzt geändert am 17. Juli 2014." Aufgerufen am 08.08.2015, von <https://www.g-ba.de/informationen/richtlinien/13/>.
- George, E. L., Zekveld, A. A., Kramer, S. E., Goverts, S. T., Festen, J. M. und Houtgast, T. (2007). "Auditory and nonauditory factors affecting speech reception in noise by older listeners." *J Acoust Soc Am* **121**(4): 2362-2375.

- Gomez-Alvarez, M. und Saldana, E. (2016). "Different tonotopic regions of the lateral superior olive receive a similar combination of afferent inputs." *J Comp Neurol* **524**(11): 2230-2250.
- Gorga, M. P., Dierking, D. M., Johnson, T. A., Beauchaine, K. L., Garner, C. A. und Neely, S. T. (2005). "A validation and potential clinical application of multivariate analyses of distortion-product otoacoustic emission data." *Ear Hear* **26**(6): 593-607.
- Gorga, M. P., Neely, S. T., Dorn, P. A. und Hoover, B. M. (2003). "Further efforts to predict pure-tone thresholds from distortion product otoacoustic emission input/output functions." *J Acoust Soc Am* **113**(6): 3275-3284.
- Gorga, M. P., Nelson, K., Davis, T., Dorn, P. A. und Neely, S. T. (2000). "Distortion product otoacoustic emission test performance when both 2f₁-f₂ and 2f₂-f₁ are used to predict auditory status." *J Acoust Soc Am* **107**(4): 2128-2135.
- Grehl, H., Reinhardt, F. und Erbguth, F. (2013). *Checkliste Neurologie*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Grothe, B., Pecka, M. und McAlpine, D. (2010). "Mechanisms of sound localization in mammals." *Physiol Rev* **90**(3): 983-1012.
- Grouven, U., Bender, R., Ziegler, A. und Lange, S. (2007). "Vergleich von Messmethoden." *Dtsch Med Wochenschr* **132 Suppl 1**: e69-73.
- Hackett, T. A. (2015). "Anatomic organization of the auditory cortex." *Handb Clin Neurol* **129**: 27-53.
- Harkins, S. W. (1981). "Effects of age and interstimulus interval on the brainstem auditory evoked potential." *Int J Neurosci* **15**(1-2): 107-118.
- Hatzopoulos, S., Ciorba, A., Petruccelli, J., Grasso, D., Sliwa, L., Kochanek, K., Skarzynski, H. und Martini, A. (2009). "Estimation of pure-tone thresholds in adults using extrapolated distortion product otoacoustic emission input/output-functions and auditory steady state responses." *Int J Audiol* **48**(9): 625-631.
- Heger, D. und Holube, I. (2010). "Wie viele Menschen sind schwerhörig?" *Z Audiol* **49**(2): 61-70.
- Hesse, G. (2015). *Innenohrschwerhörigkeit*. Stuttgart, Thieme.
- Hickok, G. und Poeppel, D. (2015). "Neural basis of speech perception." *Handb Clin Neurol* **129**: 149-160.
- Hinojosa, R. und Nelson, E. G. (2011). "Cochlear nucleus neuron analysis in individuals with presbycusis." *Laryngoscope* **121**(12): 2641-2648.
- HörTech gGmbH (2000). *Oldenburger Satztest, Handbuch und Hintergrundwissen, Version vom 25. Juli 2000, CD Audio*. Oldenburg.
- HörTech gGmbH (2011). "Oldenburger Satztest, Bedienungsanleitung für den manuellen Test auf Audio-CD, Version 1.0 vom 21.09.2011." Aufgerufen am 11.02.2018, von http://www.hoertech.de/web/dateien/HT.OLSA_Handbuch_Rev01.0_mitUmschlag.pdf.

- Hoth, S., Gudmundsdottir, K. und Plinkert, P. (2010). "Age dependence of otoacoustic emissions: the loss of amplitude is primarily caused by age-related hearing loss and not by aging alone." *Eur Arch Otorhinolaryngol* **267**(5): 679-690.
- Humes, L. E., Dubno, J. R., Gordon-Salant, S., Lister, J. J., Cacace, A. T., Cruickshanks, K. J., Gates, G. A., Wilson, R. H. und Wingfield, A. (2012). "Central presbycusis: a review and evaluation of the evidence." *J Am Acad Audiol* **23**(8): 635-666.
- Janssen, J. und Laatz, W. (2013). *Statistische Datenanalyse mit SPSS : Eine anwendungsorientierte Einführung in das Basissystem und das Modul Exakte Tests*. Berlin, Springer Gabler.
- Janssen, T. (1989). *Untersuchung des Einflusses der Reizpolarität und der Reizdauer auf die Auslösung früher akustisch evozierter Potentiale der Hörbahn durch Messung und Modellrechnung*. Dissertation, Technische Universität Berlin.
- Janssen, T. (2000). Otoakustische Emissionen (OAE). In: Lehnhardt, E. und Dillier, N. (Hrsg.). *Praxis der Audiometrie*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Janssen, T. (2009). Otoakustische Emissionen. In: Lehnhardt, E. und Laszig, R. (Hrsg.). *Praxis der Audiometrie*. Stuttgart, Thieme: 113-136.
- Janssen, T. und Müller, J. (2008). Otoacoustic Emissions as a Diagnostic Tool in a Clinical Context. In: Manley, G. A., Fay, R. R. und Popper, A. N. (Hrsg.). *Active Processes and Otoacoustic Emissions in Hearing*. New York, Springer.
- Janssen, T. und Schirkonyer, V. (2012). White paper on the use of ABR in the detection of eight nerve and brainstem lesions. Unveröffentlichtes Paper.
- Jewett, D. L. (1970). "Volume-conducted potentials in response to auditory stimuli as detected by averaging in the cat." *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* **28**(6): 609-618.
- Johannesen, P. T., Perez-Gonzalez, P., Kalluri, S., Blanco, J. L. und Lopez-Poveda, E. A. (2016). "The Influence of Cochlear Mechanical Dysfunction, Temporal Processing Deficits, and Age on the Intelligibility of Audible Speech in Noise for Hearing-Impaired Listeners." *Trends Hear* **20**.
- Jupiter, T. und DiStasio, D. (1998). "An Evaluation of the HHIE-S as a Screening Tool for the Elderly Homebound Population." *Journal of the Academy of Rehabilitative Audiology* **31**: 11-21.
- Kang, W. S., Hyun, S. M., Lim, H. K., Shim, B. S., Cho, J. H. und Lee, K. S. (2012). "Normative diameters and effects of aging on the cochlear and facial nerves in normal-hearing Korean ears using 3.0-tesla magnetic resonance imaging." *Laryngoscope* **122**(5): 1109-1114.
- Kemp, D. T. (1978). "Stimulated acoustic emissions from within the human auditory system." *J Acoust Soc Am* **64**(5): 1386-1391.
- Kemp, D. T. (2008). Otoacoustic Emissions: Concepts and Origins. In: Manley, G. A., Fay, R. R. und Popper, A. N. (Hrsg.). *Active Processes and Otoacoustic Emissions in Hearing*. New York, Springer.
- Keppler, H., Dhooge, I., Corthals, P., Maes, L., D'Haenens, W., Bockstael, A., Philips, B., Swinnen, F. und Vinck, B. (2010). "The effects of aging on evoked otoacoustic emissions and efferent suppression of transient evoked otoacoustic emissions." *Clin Neurophysiol* **121**(3): 359-365.

- Kepler, H., Dhooge, I. und Vinck, B. (2015). "Hearing in young adults. Part II: The effects of recreational noise exposure." *Noise Health* **17**(78): 245-252.
- King, A., Hopkins, K. und Plack, C. J. (2014). "The effects of age and hearing loss on interaural phase difference discrimination." *J Acoust Soc Am* **135**(1): 342-351.
- Klinke, R., Pape, H.-C. und Silbernagl, S. (2005). *Physiologie*. Stuttgart, Thieme.
- Konrad-Martin, D., Dille, M. F., McMillan, G., Griest, S., McDermott, D., Fausti, S. A. und Austin, D. F. (2012). "Age-related changes in the auditory brainstem response." *J Am Acad Audiol* **23**(1): 18-35; quiz 74-15.
- Kujawa, S. G. und Liberman, M. C. (2015). "Synaptopathy in the noise-exposed and aging cochlea: Primary neural degeneration in acquired sensorineural hearing loss." *Hear Res* **330**(Pt B): 191-199.
- Kummer, P., Janssen, T. und Arnold, W. (1998). "The level and growth behavior of the 2 f₁-f₂ distortion product otoacoustic emission and its relationship to auditory sensitivity in normal hearing and cochlear hearing loss." *J Acoust Soc Am* **103**(6): 3431-3444.
- Kummer, P., Janssen, T., Hulin, P. und Arnold, W. (2000). "Optimal L1-L2 primary tone level separation remains independent of test frequency in humans." *Hear Res* **146**(1-2): 47-56.
- Kurakata, K., Mizunami, T. und Matsushita, K. (2006). "Pure-tone audiometric thresholds of young and older adults." *Acoustical Science and Technology* **27**(2): 114-116.
- Kurakata, K., Mizunami, T., Matsushita, K. und Shiraishi, K. (2011). "Air conduction hearing thresholds of young and older Japanese adults for pure tones from 125 Hz to 16 kHz." *Acoustical Science and Technology* **32**(1): 16-22.
- Kurata, N., Schachern, P. A., Paparella, M. M. und Cureoglu, S. (2016). "Histopathologic Evaluation of Vascular Findings in the Cochlea in Patients With Presbycusis." *JAMA Otolaryngol Head Neck Surg* **142**(2): 173-178.
- Kuwada, S., Yin, T. C. und Wickesberg, R. E. (1979). "Response of cat inferior colliculus neurons to binaural beat stimuli: possible mechanisms for sound localization." *Science* **206**(4418): 586-588.
- Leaver, A. M. und Rauschecker, J. P. (2016). "Functional Topography of Human Auditory Cortex." *J Neurosci* **36**(4): 1416-1428.
- Lee, J. Y. (2015). "Aging and Speech Understanding." *J Audiol Otol* **19**(1): 7-13.
- Lee, K. Y. (2013). "Pathophysiology of age-related hearing loss (peripheral and central)." *Korean J Audiol* **17**(2): 45-49.
- Legatt, A. D. (2012). Brainstem Auditory Evoked Potentials: Methodology, Interpretation, and Clinical Application. In: Aminoff, M. J. (Hrsg.). *Aminoff's Electrodiagnosis in Clinical Neurology (Sixth Edition)*. London, W.B. Saunders: 519-552.
- Lehnhardt, E. und Laszig, R. (2009). *Praxis der Audiometrie*. Stuttgart, Thieme.
- Lenarz, T. und Boenninghaus, H.-G. (2012). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. Berlin [u.a.], Springer.

- Lieberman, M. C. und Kujawa, S. G. (2017). "Cochlear synaptopathy in acquired sensorineural hearing loss: Manifestations and mechanisms." *Hear Res* **349**: 138-147.
- Lin, F. R., Yaffe, K., Xia, J., Xue, Q. L., Harris, T. B., Purchase-Helzner, E., Satterfield, S., Ayonayon, H. N., Ferrucci, L., Simonsick, E. M. und Health, A. B. C. S. G. (2013). "Hearing loss and cognitive decline in older adults." *JAMA Intern Med* **173**(4): 293-299.
- Ludwig, A. (2009). *Psychoakustische und elektrophysiologische Untersuchungen zu zentral-auditiven Verarbeitungsstörungen während der Kindesentwicklung*. Dissertation, Universität Leipzig, Leipziger Universitäts-Verlag.
- Lüllmann-Rauch, R. (2006). *Taschenlehrbuch Histologie*. Stuttgart, Thieme.
- Lutz, J., Hemminger, F., Stahl, R., Dietrich, O., Hempel, M., Reiser, M. und Jager, L. (2007). "Evidence of subcortical and cortical aging of the acoustic pathway: a diffusion tensor imaging (DTI) study." *Acad Radiol* **14**(6): 692-700.
- Makary, C. A., Shin, J., Kujawa, S. G., Liberman, M. C. und Merchant, S. N. (2011). "Age-related primary cochlear neuronal degeneration in human temporal bones." *J Assoc Res Otolaryngol* **12**(6): 711-717.
- Martini, A., Comacchio, F. und Magnavita, V. (1991). "Auditory evoked responses (ABR, MLR, SVR) and brain mapping in the elderly." *Acta Otolaryngol Suppl* **476**: 97-104.
- Martini, A. E. (1996). "European Working Group on Genetics of Hearing Impairment. European Commission Directorate, Biomedical and Health Research Programme (HEAR)." *Infoletter* 2.
- Mathers, C., Smith, A. und Concha, M. (2000). "Global burden of hearing loss in the year 2000." Aufgerufen am 08.07.2018, von http://www.who.int/healthinfo/statistics/bod_hearingloss.pdf.
- Mauermann, M., Uppenkamp, S., van Hengel, P. W. und Kollmeier, B. (1999a). "Evidence for the distortion product frequency place as a source of distortion product otoacoustic emission (DPOAE) fine structure in humans. I. Fine structure and higher-order DPOAE as a function of the frequency ratio f_2/f_1 ." *J Acoust Soc Am* **106**(6): 3473-3483.
- Mauermann, M., Uppenkamp, S., van Hengel, P. W. und Kollmeier, B. (1999b). "Evidence for the distortion product frequency place as a source of distortion product otoacoustic emission (DPOAE) fine structure in humans. II. Fine structure for different shapes of cochlear hearing loss." *J Acoust Soc Am* **106**(6): 3484-3491.
- Middlebrooks, J. C. (2015). "Sound localization." *Handb Clin Neurol* **129**: 99-116.
- Moerel, M., De Martino, F., Ugurbil, K., Yacoub, E. und Formisano, E. (2015). "Processing of frequency and location in human subcortical auditory structures." *Sci Rep* **5**.
- Momi, S. K., Wolber, L. E., Fabiane, S. M., MacGregor, A. J. und Williams, F. M. (2015). "Genetic and Environmental Factors in Age-Related Hearing Impairment." *Twin Res Hum Genet* **18**(4): 383-392.
- Moore, B. C. (2016). "Effects of Age and Hearing Loss on the Processing of Auditory Temporal Fine Structure." *Adv Exp Med Biol* **894**: 1-8.

- Mrowinski, D. (2009). Elektrische Reaktionsaudiometrie. In: Lehnhardt, E. und Laszig, R. (Hrsg.). *Praxis der Audiometrie*. Stuttgart, Thieme: XII, 268 S.
- Mrowinski, D. und Scholz, G. (2011). *Audiometrie : eine Anleitung für die praktische Hörprüfung*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Musiek, F. E. und Chermak, G. D. (2015). "Psychophysical and behavioral peripheral and central auditory tests." *Handb Clin Neurol* **129**: 313-332.
- Nadol Jr, J. (2010). Disorders of Aging. In: Merchant, S. N. und Schuknecht, H. F. (Hrsg.). *Schuknecht's pathology of the ear*. Shelton, CT, People's Medical Publ. House.
- Naguib, N. N. N., Hey, C., Shaaban, M. S., Elabd, A. M., Hassan, H. H. M., Gruber-Rouh, T., Kaltenbach, B., Harth, M., Ackermann, H., Stover, T., Vogl, T. J. und Nour-Eldin, N. A. (2017). "Assessment of the cochlear nerve to facial nerve size ratio using MR multiplanar reconstruction of the internal auditory canal in patients presenting with acquired long-standing hearing loss." *Br J Radiol* **90**(1073): 20160870.
- Nakashima, T., Miller, J. M. und Nuttall, A. L. (1995). "Autoregulation of cochlear blood flow in young and aged mice." *Eur Arch Otorhinolaryngol* **252**(5): 308-311.
- Nelson, E. G. und Hinojosa, R. (2006). "Presbycusis: a human temporal bone study of individuals with downward sloping audiometric patterns of hearing loss and review of the literature." *Laryngoscope* **116**(Suppl 112): 1-12.
- Neumann, K. und Rübsamen, R. (2005). Zentrale Hörstörungen bei hirngeschädigten Erwachsenen. In: Jochims, S. (Hrsg.). *Musiktherapie in der Neurorehabilitation internationale Konzepte, Forschung und Praxis*. Bad Honnef, Hippocampus-Verlag.
- Oeken, J., Lenk, A. und Bootz, F. (2000). "Influence of age and presbycusis on DPOAE." *Acta Otolaryngol* **120**(3): 396-403.
- Oestreich, M. und Romberg, O. (2014). *Keine Panik vor Statistik! : Erfolg und Spaß im Horrorfach nichttechnischer Studiengänge*. Wiesbaden, Springer Spektrum.
- Oku, T. und Hasegawa, M. (1997). "The influence of aging on auditory brainstem response and electrocochleography in the elderly." *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec* **59**(3): 141-146.
- Ortmann, A. J. und Abdala, C. (2016). "Changes in the Compressive Nonlinearity of the Cochlea During Early Aging: Estimates From Distortion OAE Input/Output Functions." *Ear Hear* **37**(5): 603-614.
- Ottaviani, F., Maurizi, M., D'Alatri, L. und Almadori, G. (1991). "Auditory brainstem responses in the aged." *Acta Otolaryngol Suppl* **476**: 110-113.
- Ouda, L., Profant, O. und Syka, J. (2015). "Age-related changes in the central auditory system." *Cell Tissue Res* **361**(1): 337-358.
- Paglialonga, A., Grandori, F. und Tognola, G. (2013). "Using the Speech Understanding in Noise (SUN) Test for Adult Hearing Screening." *Am J Audiol* **22**(1): 171-174.
- Paglialonga, A., Tognola, G. und Grandori, F. (2011a). "Pilot initiatives of adult hearing screening in Italy." *Audiol Res* **1**(e17): 64-68.

- Paglialonga, A., Tognola, G. und Grandori, F. (2011b). "SUN-test (Speech Understanding in Noise): a method for hearing disability screening." *Audiol Res* **1**(e13): 49-54.
- Paglialonga, A., Tognola, G. und Grandori, F. (2014). "A user-operated test of suprathreshold acuity in noise for adult hearing screening: The SUN (SPEECH UNDERSTANDING IN NOISE) test." *Comput Biol Med* **52c**: 66-72.
- PATH medical GmbH (2015a). "Bedienungsanleitung Senti & Sentiero." Aufgerufen am 28.09.2015, von <http://www.pathme.de/index.php/en/downloads>.
- PATH medical GmbH (2015b). "Technical specifications, manufacturer's data." Aufgerufen am 28.09.2015, von <http://www.pathme.de/index.php/en/support/downloads>.
- Penhune, V. B., Cismaru, R., Dorsaint-Pierre, R., Petitto, L. A. und Zatorre, R. J. (2003). "The morphometry of auditory cortex in the congenitally deaf measured using MRI." *Neuroimage* **20**(2): 1215-1225.
- Pickles, J. O. (2015). "Auditory pathways: anatomy and physiology." *Handb Clin Neurol* **129**: 3-25.
- Probst, R., Grevers, G., Iro, H. und Rosanowski, F. (2008). *Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Profant, O., Balogova, Z., Dezortova, M., Wagnerova, D., Hajek, M. und Syka, J. (2013). "Metabolic changes in the auditory cortex in presbycusis demonstrated by MR spectroscopy." *Exp Gerontol* **48**(8): 795-800.
- Profant, O., Skoch, A., Balogova, Z., Tintera, J., Hlinka, J. und Syka, J. (2014). "Diffusion tensor imaging and MR morphometry of the central auditory pathway and auditory cortex in aging." *Neuroscience* **260**: 87-97.
- Profant, O., Tintera, J., Balogova, Z., Ibrahim, I., Jilek, M. und Syka, J. (2015). "Functional changes in the human auditory cortex in ageing." *PLoS One* **10**(3): e0116692.
- Prosser, S. und Rosignoli, M. (1992). "Observations on the ABR I-V interval in a clinical sample of elderly patients." *Br J Audiol* **26**(5): 271-274.
- Rogers, A. R., Burke, S. R., Kopun, J. G., Tan, H., Neely, S. T. und Gorga, M. P. (2010). "Influence of Calibration Method on Distortion-Product Otoacoustic Emission Measurements: II. Threshold Prediction." *Ear Hear* **31**(4): 546-554.
- Rosen, S., Bergman, M., Plester, D., El-Mofty, A. und Satti, M. H. (1962). "Presbycusis Study of a Relatively Noise-Free Population in the Sudan." *Ann Otol Rhinol Laryngol* **71**(3): 727-743.
- Rosenhall, U., Bjorkman, G., Pedersen, K. und Kall, A. (1985). "Brain-stem auditory evoked potentials in different age groups." *Electroencephalogr Clin Neurophysiol* **62**(6): 426-430.
- Rosenhall, U., Moller, C. und Hederstierna, C. (2013). "Hearing of 75-year old persons over three decades: has hearing changed?" *Int J Audiol* **52**(11): 731-739.
- Rosenhall, U., Pedersen, K. und Dotevall, M. (1986). "Effects of presbycusis and other types of hearing loss on auditory brainstem responses." *Scand Audiol* **15**(4): 179-185.

- Rosner, T. R. (2011). *Zeitoptimierte Hörschwellenbestimmung mit otoakustischen Emissionen und auditorischen Potentialen*. Dissertation, Technische Universität München, Verlag Dr. Hut.
- Rosner, T. R., Kandzia, F., Oswald, J. und Janssen, T. (2011). "Gleichzeitige Messung der DPOAE und ASSR zur Schätzung der cochleären Hörleistung." *Z Audiol* **50**(3): 92-105.
- Roth, T. N. (2015). "Aging of the auditory system." *Handb Clin Neurol* **129**: 357-373.
- Roth, T. N., Hanebuth, D. und Probst, R. (2011). "Prevalence of age-related hearing loss in Europe: a review." *Eur Arch Otorhinolaryngol* **268**(8): 1101-1107.
- Ruan, Q., Ma, C., Zhang, R. und Yu, Z. (2014). "Current status of auditory aging and anti-aging research." *Geriatr Gerontol Int* **14**(1): 40-53.
- Salminen, N. H., Takanen, M., Santala, O., Lamminsalo, J., Altoe, A. und Pulkki, V. (2015). "Integrated processing of spatial cues in human auditory cortex." *Hear Res* **327**: 143-152.
- Sangster, J. F., Gerace, T. M. und Seewald, R. C. (1991). "Hearing loss in elderly patients in a family practice." *CMAJ: Canadian Medical Association Journal* **144**(8): 981-984.
- Schirkonyer, V. (2007). *Entwicklung eines Tympanometriemoduls - Kombination von Tympanometrie und OAE-Messung*. Diplomarbeit, TU München.
- Schmuziger, N., Patscheke, J. und Probst, R. (2006). "Automated pure-tone threshold estimations from extrapolated distortion product otoacoustic emission (DPOAE) input/output functions." *J Acoust Soc Am* **119**(4): 1937.
- Schreiner, C. E. und Malone, B. J. (2015). "Representation of loudness in the auditory cortex." *Handb Clin Neurol* **129**: 73-84.
- Schuknecht, H. F. (1955). "Presbycusis." *Laryngoscope* **65**(6): 402-419.
- Schuknecht, H. F. und Gacek, M. R. (1993). "Cochlear pathology in presbycusis." *Ann Otol Rhinol Laryngol* **102**(1 Pt 2): 1-16.
- Sergeyenko, Y., Lall, K., Liberman, M. C. und Kujawa, S. G. (2013). "Age-related cochlear synaptopathy: an early-onset contributor to auditory functional decline." *J Neurosci* **33**(34): 13686-13694.
- Shera, C. A. und Guinan, J. J., Jr. (1999). "Evoked otoacoustic emissions arise by two fundamentally different mechanisms: a taxonomy for mammalian OAEs." *J Acoust Soc Am* **105**(2 Pt 1): 782-798.
- Shi, X. (2011). "Physiopathology of the cochlear microcirculation." *Hear Res* **282**(1-2): 10-24.
- Sildiroglu, O., Cincik, H., Sonmez, G., Ozturk, E., Mutlu, H., Gocgeldi, E., Tunca Keskin, A., Basekim, C. und Kizilkaya, E. (2010). "Evaluation of cochlear nerve size by magnetic resonance imaging in elderly patients with sensorineural hearing loss." *Radiol Med* **115**(3): 483-487.
- Steland, A. (2013). *Basiswissen Statistik : Kompaktkurs für Anwender aus Wirtschaft, Informatik und Technik*. Berlin [u.a.], Springer.

- Strutz, J. und Mann, W. (2010). *Praxis der HNO-Heilkunde, Kopf- und Halschirurgie*. Stuttgart [u.a.], Thieme.
- Suzuki, T., Ren, T., Nuttall, A. L. und Miller, J. M. (1998). "Age-related changes in cochlear blood flow response to occlusion of anterior inferior cerebellar artery in mice." *Ann Otol Rhinol Laryngol* **107**(8): 648-653.
- Tadros, S. F., Frisina, S. T., Mapes, F., Kim, S., Frisina, D. R. und Frisina, R. D. (2005). "Loss of peripheral right-ear advantage in age-related hearing loss." *Audiol Neurootol* **10**(1): 44-52.
- Tomioka, K., Ikeda, H., Hanaie, K., Morikawa, M., Iwamoto, J., Okamoto, N., Saeki, K. und Kurumatani, N. (2013). "The Hearing Handicap Inventory for Elderly-Screening (HHIE-S) versus a single question: reliability, validity, and relations with quality of life measures in the elderly community, Japan." *Qual Life Res* **22**(5): 1151-1159.
- Trepel, M. (2008). *Neuroanatomie: Struktur und Funktion*. München [u.a.], Elsevier, Urban & Fischer.
- Uchida, Y., Ando, F., Shimokata, H., Sugiura, S., Ueda, H. und Nakashima, T. (2008). "The effects of aging on distortion-product otoacoustic emissions in adults with normal hearing." *Ear Hear* **29**(2): 176-184.
- Ueberfuhr, M. A., Fehlberg, H., Goodman, S. S. und Withnell, R. H. (2016). "A DPOAE assessment of outer hair cell integrity in ears with age-related hearing loss." *Hear Res* **332**: 137-150.
- Ventry, I. M. und Weinstein, B. E. (1982). "The hearing handicap inventory for the elderly: a new tool." *Ear Hear* **3**(3): 128-134.
- Ventry, I. M. und Weinstein, B. E. (1983). "Identification of elderly people with hearing problems." *Asha* **25**(7): 37-42.
- Viana, L. M., O'Malley, J. T., Burgess, B. J., Jones, D. D., Oliveira, C. A., Santos, F., Merchant, S. N., Liberman, L. D. und Liberman, M. C. (2015). "Cochlear neuropathy in human presbycusis: Confocal analysis of hidden hearing loss in post-mortem tissue." *Hear Res* **327**: 78-88.
- Wagener, K., Brand, T. und Kollmeier, B. (1999a). "Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache Teil II: Optimierung des Oldenburger Satztests." *Z Audiol* **38**(2): 44-56.
- Wagener, K., Brand, T. und Kollmeier, B. (1999b). "Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache Teil III: Evaluation des Oldenburger Satztests." *Z Audiol* **38**(3): 86-95.
- Wagener, K., Kühnel, V. und Kollmeier, B. (1999c). "Entwicklung und Evaluation eines Satztests für die deutsche Sprache I: Design des Oldenburger Satztests." *Z Audiol* **38**(1): 4-15.
- Wang, S. J., Furusho, M., D'Sa, C., Kuwada, S., Conti, L., Morest, D. K. und Bansal, R. (2009). "Inactivation of fibroblast growth factor receptor signaling in myelinating glial cells results in significant loss of adult spiral ganglion neurons accompanied by age-related hearing impairment." *J Neurosci Res* **87**(15): 3428-3437.
- Weinstein, B. E. (1986). "Validity of a screening protocol for identifying elderly people with hearing problems." *Asha* **28**(5): 41-45.

- Weinstein, B. E., Spitzer, J. B. und Ventry, I. M. (1986). "Test-Retest Reliability of the Hearing Handicap Inventory for the Elderly." *Ear Hear* **7**(5): 295-299.
- Weinstein, B. E. und Ventry, I. M. (1983). "Audiometric correlates of the Hearing Handicap Inventory for the elderly." *J Speech Hear Disord* **48**(4): 379-384.
- Weiß, C. (2013). *Basiswissen medizinische Statistik : [mit Epidemiologie] ; mit ... 20 Tabellen*. Berlin [u.a.], Springer.
- Wong, P. C., Ettlinger, M., Sheppard, J. P., Gunasekera, G. M. und Dhar, S. (2010). "Neuroanatomical characteristics and speech perception in noise in older adults." *Ear Hear* **31**(4): 471-479.
- World Health Organization (1991). Report of the Informal Working Group on Prevention of Deafness and Hearing Impairment Programme Planning. WHO Geneva.
- World Health Organization (2001). *International classification of functioning, disability and health*. Geneva, World Health Organization.
- World Health Organization (2002). "Towards a Common Language for Functioning, Disability and Health: ICF The International Classification of Functioning, Disability and Health." Aufgerufen am 08.07.2018, von <http://www.who.int/classifications/icf/en/>.
- World Health Organization (2005). *ICF Internationale Klassifikation der Funktionsfähigkeit, Behinderung und Gesundheit*. Köln, DIMDI.
- World Health Organization (2010). "Measuring Health and Disability Manual for WHO Disability Assessment Schedule WHODAS 2.0." Aufgerufen am 08.07.2018, von <http://www.who.int/classifications/icf/en/>.
- Yang, C. H., Schrepfer, T. und Schacht, J. (2015). "Age-related hearing impairment and the triad of acquired hearing loss." *Front Cell Neurosci* **9**: 276.
- Zelle, D., Dalhoff, E. und Gummer, A. W. (2017a). "Objective audiometry with DPOAEs : New findings for generation mechanisms and clinical applications." *HNO* **65**(Suppl 2): 122-129.
- Zelle, D., Lorenz, L., Thiericke, J. P., Gummer, A. W. und Dalhoff, E. (2017b). "Input-output functions of the nonlinear-distortion component of distortion-product otoacoustic emissions in normal and hearing-impaired human ears." *J Acoust Soc Am* **141**(5): 3203.

7 Anhang

7.1 Einzelergebnisse aller Messmethoden

Allgemeine Anmerkungen zu den Tabellen

Die Ergebnisse werden nach Subkollektiven getrennt dargestellt.

Fehlende Patientenidentifikationsnummern entsprachen Probanden, die die Einschlusskriterien nicht erfüllten bzw. bei denen Ausschlusskriterien zutrafen.

Geschlecht: 1 = männlich; 2 = weiblich

Bei Lücken in den Tabellen konnte kein valider, die Plausibilitätskriterien erfüllender Messwert erhoben werden (bei der Reintonaudiometrie z.T. Schwelle bis 100dB HL nicht erreicht).

Legende zum Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

Tabellenspalten Einzelfragen:

Fragen 2, 3, 4, 5, 6, 10, 11: 0 = Nein; 1 = Ja

Frage 7 (Konzerte / Diskotheken): 0 = Nie; 1 = 1x/Jahr; 2 = mind. 2x/Jahr

Frage 8 (Musikinstrument): 0 = Niemals Instrument gespielt; 1 = ehemaliger; 2 = aktiver Spieler

Frage 9 (Tragb. Wiedergabegeräte): 0 = Kein Gebrauch; 1 = unter 2h/Woche; 2 = mind. 2h/Woche

Tabellenspalten Detailantworten:

Frage 2 (Vorerkrankungen): HST = Hörsturz; OMA = Otitis media acuta; PRES = Presbyakusis; TIN = Tinnitus; SH = Schwerhörigkeit; bds = beidseits; li = links; re = rechts; falls keine Seitenangabe vorliegt, konnte sich der Proband nicht mehr an die betroffene Seite erinnern.

Frage 8 (Musikinstrument): AKK = Akkordeon; FLÖ = Flöte; GIT = Gitarre; KLAV = Klavier; KLAR = Klarinette; PERK = Schlagzeug

Frage 8 (Rockband/Sinf.orchester): 0 = Nein; 1 = Ja

Frage 11 (Familienanamnese): M = Mutter; V = Vater; S = Schwester; B = Bruder; K = Kind; Abkürzungen der Erkrankungen siehe Frage 2.

KONTROLLEN

Personen-ID	Geschlecht	Alter	PTA-Hörschwelle (dB HL)																HHIE-S (Score)	OLSA (dB SNR)		SUN (richtig/15)				LIPP																														
			links								rechts									1. Messung	2. Messung	links	rechts	1. Testohr	2. Testohr	binaural			dichotisch			interaural																								
			250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	DD (ms)	PD (dB)								FD (Hz)	links	rechts	links	rechts	links	rechts	links	rechts																						
			1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8		1	2	3	4	5	6	7	8	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)
1	2	24,1	1	8	10	4	-3	0	-2	2	7	10	9	-7	10	-8	2	-7,5	-9,3	12	12	12	12	23,5	1,0	6,0	31,5	1,6	7,0	44,5	1,0	4,0	14,5	1,9	3,0	11,0	2,4	1,5																		
2	2	24,5	3	5	7	5	-4	9	-7	7	9	18	12	-1	10	0	0	-8,5	-9,7	12	13	13	12	45,5	2,5	3,0	21,0	1,0	3,5	48,0	2,2	6,0	11,5	3,3	2,5	12,5	1,8	2,0																		
3	2	23,5	2	-1	7	0	0	5	-6	6	8	7	4	6	13	3	2	-7,4	-8,1	14	13	13	14	58,5	3,8	2,5	78,3	4,3	4,0	98,5	4,9	6,0	57,5	4,5	3,5	57,5	3,9	6,5																		
4	2	24,4	-3	3	16	8	0	2	8	-5	1	8	6	0	17	4	0	-7,7	-8,5	12	12	12	12	28,5	1,8	14,0	73,5	2,2	3,0	71,8	2,8	2,5	76,5	3,0	1,0	69,0	2,6	1,5																		
5	2	24,6	-1	3	9	-1	0	8	0	10	9	8	-1	2	12	0	2	-6,6	-7,9	14	14	14	14	68,8	2,2	4,0	43,5	1,3	3,5	73,0		4,0	23,0	1,6	1,5	12,5	1,8	0,5																		
6	1	23,9	6	4	10	-1	0	8	-1	9	7	18	3	0	8	3	10	-6,5	-8,2	14	10	10	14	16,0	1,8	5,0	51,0	1,4	2,5	31,0		2,0	25,0	1,6	0,5	11,5	2,0	2,0																		
7	1	25,3	0	0	-2	0	1	10	-2	1	2	1	0	7	3	3	4	-7,9	-9,1	12	12	12	12	15,0	1,6	4,0	66,5	2,6	3,5	68,0	1,8	2,0	28,5	2,1	2,5	15,0	1,1	1,5																		
8	1	23,5	-2	-4	0	5	0	0	-2	8	5	2	8	2	4	2	4	-6,6	-7,9	13	13	13	13	52,8	1,6	5,0		2,7	8,5	76,5	2,9	11,0	73,0	2,8	4,0	75,8	4,9	2,5																		
9	1	24,2	5	4	5	5	-1	14	1	2	10	12	17	11	11	-1	10	-6,5	-7,7	11	8	11	8	65,0	2,8	12,5	69,8	3,9	4,5	51,0	4,6	5,0	44,0	4,9	3,5	39,0	3,9	9,0																		
10	1	25,1	-5	0	5	0	-2	4	-7	2	5	4	-2	-3	0	-8	2	-6,8	-8,5	15	14	15	14	43,0	4,0	8,0		1,5	2,5	48,0	1,6	3,0	12,5	2,7	2,0	16,0	4,1	0,5																		
11	2	24,8	-4	3	3	-1	-5	6	-4	-10	-3	0	0	1	8	-3	2	-7,2	-8,4	15	15	15	15	31,0	3,7	4,0	41,5	3,0	3,0	31,0	4,9	3,0	24,5	4,7	4,0	15,5	7,0	3,5																		
12	1	25,5	1	2	3	0	7	13	-3	1	2	2	0	4	8	-1	0	-7,5	-8,9	12	13	12	13	64,0	5,3	10,5	68,0	2,3	5,0	45,0	2,8	3,0	57,0	2,6	4,0	25,0	4,3	3,5																		
13	2	22,3	-4	-3	1	5	8	9	13	1	0	2	6	8	11	24	2	-7,4	-9	10	12	10	12	52,5	1,8	6,3	88,8	2,4	3,0	64,5	2,3	4,5	91,5	2,9	3,5	65,0	2,8	2,0																		
14	2	24,0	-7	-3	0	1	-4	0	-1	-10	-1	0	0	4	7	7	0	-7,1	-8,4	13	14	14	13	68,3	1,6	5,0	34,5	1,4	7,0	72,8	3,4	2,5	15,0	3,7	2,5			3,7	0,8																	
15	2	23,9	2	6	9	8	-2	13	6	6	8	11	4	-1	18	-1	0	-6,7	-8,3	12	11	12	11	32,5	2,0	7,0	41,0	1,8	2,5	33,0	3,1	1,0	23,5		2,5	29,0	2,9	1,0																		
16	2	24,0	-1	2	6	9	10	18	4	3	6	7	9	12	19	3	6	-7,1	-8,4	10	13	10	13	43,8	2,6	6,0	45,0	3,0	4,0	154,0	2,9	4,5	98,0	2,3	4,5			2,2	6,5																	
17	1	24,0	0	1	7	7	11	17	12	0	1	11	0	0	12	0	2	-7,6	-8,1	13	14	13	14	21,5	2,4	11,0	53,0	3,4	13,0	57,0	5,2	21,5	33,0	4,2	2,0	14,5	3,8																			
18	2	23,9	0	-4	0	0	1	10	2	-5	-7	-1	0	-4	20	0	0	-7	-8,5	11	13	13	11	65,8	4,0	4,0	49,5	2,4	1,5	55,0	3,6	2,5	23,0	2,7	2,5	26,5	2,7	2,5																		
19	2	18,8	6	2	4	2	4	0	0	10	9	2	14	6	4	7	2	-6,2	-7,5	15	15	15	15	65,0	3,3	9,5	87,0	8,3	16,0	95,8	7,0	7,8	160,8	4,6	1,0			5,5	3,0																	
20	1	24,9	12	12	9	0	4	2	-2	18	24	25	9	0	13	-3	2	-7,5	-8,4	12	9	9	12	21,5	2,5	11,5	73,0	6,4	13,5	108,5	4,9	3,0	14,0	2,8	1,0	19,0	2,8	2,5																		
21	2	24,2	2	4	0	-5	-7	7	0	6	4	7	-2	-10	4	8	0	-7,6	-9,7	14	14	14	14	35,5	2,1	4,5	28,0	2,6	6,5	62,5	2,3	4,5	16,5	3,2	2,0	17,0	2,6	1,5																		
22	1	24,8	-3	1	5	-5	-5	5	-6	-1	0	4	1	-5	-3	-5	6	-6,5	-8,8	13	13	13	13	30,0	1,2	2,5	56,5	1,5	3,5	29,0	1,8	1,0	10,0	1,3	1,5	6,0	1,3	3,0																		
23	1	25,1	-1	-1	-1	1	8	2	0	3	0	-3	0	2	2	0	8	-7	-8,1	14	15	15	14	32,0	2,2	6,0	37,0	2,3	4,0	54,3	2,5	4,5	12,5	2,8	1,0	19,5	2,6	0,5																		
24	1	26,2	0	-1	-1	0	0	10	5	8	5	2	1	9	14	-1	2	-7,5	-9	13	13	13	13	34,5	1,1	4,0	32,0		3,0	49,5	1,6	0,5	18,0	1,7	2,5	10,0	2,0	1,0																		
25	1	24,2	-7	-5	0	0	8	12	6	-1	-5	0	5	2	19	13	2	-7,1	-8,6	9	12	12	9	68,8	2,2	7,0	28,0	1,7	4,5	64,5	2,5	4,5	39,5	1,8	1,0	16,0	4,0	3,0																		
26	1	19,3	3	1	0	4	13	3	0	15	10	4	4	5	16	4	2	-7,2	-8	11	11	11	11	48,0	1,0	4,5	52,5	2,6	2,5	88,8	3,1	2,5	19,0	2,7	0,5	6,5	2,2	1,0																		
27	1	26,8	1	-3	0	3	6	8	15	3	-2	-1	5	10	15	5	2	-7,7	-9,1	13	14	14	13	36,0	2,2	6,5	43,5	1,6	2,5	17,5		1,0	7,5	2,3	2,0	14,0	1,7	1,5																		
28	2	25,1	-5	1	-2	0	-1	1	0	1	0	-1	3	-6	7	2	2	-7,6	-8,4	14	15	14	15	21,0	2,0	4,5	29,5	0,8	3,0	32,0	1,5	1,5	4,5	1,6	2,0	7,0	2,4	2,0																		
29	1	26,4	2	0	0	1	6	12	10	1	1	0	1	7	14	13	2	-7,5	-8,8	10	12	10	12	53,5	2,1	5,0	70,5	2,7	4,5	94,5	2,6	1,5	50,5	2,1	3,5	24,0	2,7	0,5																		
30	2	25,1	-7	-8	1	-2	-7	0	-1	-2	0	4	2	-4	9	10	2	-7,3	-8,5	12	12	12	12	47,5	3,4	4,0	78,0	1,5	2,5	68,3	1,8	1,5	58,0	3,1	1,5	54,5	3,1	1,5																		

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

KONTROLLEN

Personen-ID	DPOAE																		BERA																	
	DPOAE-Schwelle (dB SPL)									DPOAE-Hörschwellenschätzung (dB HL)									Absolutlatenz Messung1 (ms)						Absolutlatenz Messung2 (ms)											
	links			rechts						links			rechts						links			rechts			links			rechts								
	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	I	III	V	I	III	V	I	III	V	I	III	V						
1	10	15	10	10	10	14	10	15	15	10	10	10	3,5	3,0	2,3	-0,7	-1,9	-2,8	3,5	4,6	4,0	1,0	-3,0	-4,5	1,5	3,6	5,5	1,5	3,5	5,1	1,5	3,6	5,5	1,5	3,5	5,2
2	10	8	10	10	10	15	10	10	6	10	10	19	0,2	0,8	0,1	-0,7	-1,7	-2,5	1,0	-0,1	-0,8	-2,1	-0,4	-0,7	1,5	3,5	5,5	1,5	3,5	5,5	1,4	3,5	5,5	1,5	3,5	5,5
3	10	13	10	10	19	40	10	20	10	10	19	35	2,4	2,2	1,6	2,4	9,7	14,6	6,0	4,7	4,0	2,2	7,9	11,9	1,7	3,9	5,6	1,7	3,9	5,8	1,6	3,9	5,6	1,7	3,9	5,8
4	10	20	10	16	10	20	20	10	15	10	15	20	6,0	4,7	5,9	1,2	1,9	0,0	6,0	6,3	2,3	2,7	1,8	2,7	1,5	3,6	5,5	1,5	3,7	5,5	1,5	3,6	5,5	1,5	3,7	5,5
5	7	10	10	10	10	14	18	10	10	10	10	10	-0,6	0,3	0,7	-0,7	-2,0	-3,0	4,9	3,9	0,7	-0,7	-3,0	-4,5	1,6	3,6	5,5	1,6	3,7	5,6	1,6	3,6	5,6	1,6	3,7	5,6
6	20	10	10	10	15	45	24	11	10	10	15	60	6,1	4,8	0,8	1,0	10,0	15,0	8,3	6,2	0,9	1,0	15,0	22,5	1,6	3,7	5,9	1,5	3,7	5,9	1,5	3,7	5,8	1,5	3,7	6
7	10	15	10	10	25	65	10	10	10	27	40	45	3,5	3,0	2,3	4,3	20,0	30,0	1,0	1,3	6,4	15,1	24,1	27,5	1,6	3,8	5,6	1,6	3,3	5,4	1,6	3,8	5,6	1,6	3,3	5,3
8	2	18	40	14	35	55	23	36	20	14	28	55	1,4	11,6	14,7	19,1	21,4	30,0	20,6	17,7	14,2	10,1	19,1	26,6	1,6	3,8	5,5	1,6	3,8	5,3	1,6	3,8	5,4	1,6	3,7	5,5
9	15	18	10	10	27	21	50	50	20	29	10	45	7,5	5,7	3,3	5,1	6,0	9,0	41,0	31,3	23,6	8,9	14,6	12,5	1,7	3,6	5,9	1,5	4,2	6	1,7	3,6	5,9	1,8	4,2	6
10	10	10	10	10	15	19	10	11	10	10	20	21	1,0	1,3	0,7	1,0	1,3	1,9	1,4	1,6	1,0	2,6	3,6	5,3	1,5	3,6	5,5	1,5	3,5	5,3	1,4	3,6	5,4	1,5	3,5	5,4
11	10	10	10	11	30	45	10	10	10	10	15	14	1,0	1,3	1,1	6,4	15,4	22,5	1,0	1,3	0,7	1,0	-0,3	-0,5	1,5	3,5	5,5	1,5	3,7	5,5	1,5	3,6	5,5	1,5	3,7	5,5
12	10	10	10	10	20	35	10	12	10	10	13	40	1,0	1,3	0,7	2,6	8,3	12,4	2,0	2,0	1,4	0,4	7,7	11,6	1,6	3,8	5,8	1,6	3,9	5,9	1,6	3,9	5,8	1,6	4	5,9
13	35	17	24	10	10	15	25	10	10	10	10	35	16,9	16,5	7,5	3,9	-1,7	-2,5	8,5	6,3	0,7	-0,7	5,0	7,5	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3
14	10	19	10	20	21	40	14	18	10	10	9	50	5,5	4,3	7,0	6,2	13,6	15,4	7,2	5,5	3,4	-1,0	9,7	14,5	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3	1,5	3,5	5,3
15	10	25	12	10	10	33	10	23	10	10	15	23	8,4	6,8	6,1	-0,2	4,2	6,3	7,5	5,7	5,0	1,0	2,7	4,0	1,6	3,5	5,5	1,5	3,4	5,4	1,6	3,5	5,4	1,5	3,4	5,3
16	9	20	24	15	10	15	34	13	17	10	10	55	5,7	9,2	10,4	5,8	0,0	-2,5	14,5	12,7	4,1	1,7	11,7	17,5	1,4	3,5	5,4	1,4	3,6	5,5	1,4	3,5	5,4	1,4	3,6	5,5
17	10	20	14	20	25	50	13	10	15	10	15	33	6,1	6,3	8,9	9,2	18,3	22,5	2,4	3,9	2,3	2,7	6,0	9,0	1,6	3,6	5,8	1,6	3,7	5,8	1,6	3,6	5,8	1,6	3,7	5,8
18	19	7	10	10	10	30	18	10	17	10	15	27	3,9	3,3	-0,3	-0,7	3,3	5,0	5,1	6,5	3,1	3,4	4,0	6,0	1,6	3,7	5,6	1,6	3,5	5,4	1,6	3,7	5,6	1,6	3,5	5,4
19	21	24	30	20	30	31	14	31	11	10	10	55	13,7	16,5	15,3	15,9	13,6	15,5	13,7	10,2	8,1	-0,3	11,7	17,5	1,6	3,8	5,8	1,7	3,9	5,7	1,6	3,9	5,7	1,6	3,8	5,7
20	9	19	16	20	15	35			35	12	16	26	5,1	6,1	9,2	6,3	9,9	9,9			14,3	10,1	4,5	5,9	1,6	3,8	5,7	1,7	3,8	5,7	1,6	3,7	5,6	1,6	3,8	5,6
21	10	22	10	10	10	20	10	10	10	10	23	7,2	5,5	4,8	-0,7	0,0	0,0	0,0	1,0	1,3	0,7	-0,7	0,9	1,4	1,5	3,9	5,5	1,5	3,8	5,4	1,5	3,9	5,5	1,5	3,6	5,4
22	10	10	10	10	10	19	10	12	10	10	10	10	1,0	1,3	0,7	-0,7	-0,2	-0,4	2,1	2,1	1,4	-0,7	-3,0	-4,5	1,5	3,7	5,6	1,6	3,8	5,6	1,5	3,7	5,5	1,6	3,8	5,6
23	10	20	13	11	15	33	9	10	19	10	12	13	6,0	5,7	5,5	2,5	6,4	8,9	0,4	4,1	3,8	3,0	-1,7	-2,6	1,6	3,9	5,7	1,6	3,8	5,7	1,6	3,9	5,8	1,6	3,8	5,7
24	10	10	10	10	30	50	25	15	10	10	24	45	1,0	1,3	0,7	6,0	16,7	25,0	11,0	8,0	2,3	4,1	13,1	19,7	1,6	3,7	5,5	1,6	3,5	5,4	1,6	3,7	5,5	1,7	3,5	5,4
25	15	10	10	10	10	20	10	10	10	10	20	17	3,5	3,0	0,7	-0,7	0,0	0,0	1,0	1,3	0,7	2,7	2,2	3,3	1,6	4	5,6	1,6	3,9	5,6	1,6	3,9	5,6	1,7	3,9	5,6
26	10	10	10	10	10	16	10	10	10	10	15	18	1,0	1,3	0,7	-0,7	-1,3	-1,9	1,0	1,3	0,7	1,0	1,1	1,7	1,6	3,9	6	1,6	4	6	1,6	3,9	6	1,6	4	6
27	10	25	10	10	28	13	19	24	10	26	35	50	8,7	6,5	5,8	5,3	3,6	5,4	12,2	8,8	10,6	13,1	23,7	27,5	1,5	3,9	5,7	1,5	3,9	5,8	1,5	3,9	5,7	1,6	3,9	5,8
28	10	10	10	10	20	35	10	19	10	10	9	18	1,0	1,3	0,7	2,7	8,3	12,5	5,5	4,3	3,6	-1,0	-1,1	-1,7	1,6	3,8	5,5	1,7	3,8	5,5	1,6	3,9	5,5	1,7	3,8	5,4
29	10	20	15	10	10	27	10	10	10	10	10	35	6,0	6,3	5,6	1,0	2,2	3,4	1,0	1,3	0,7	-0,7	5,0	7,5	1,8	3,9	5,8	1,8	4	5,7	1,8	3,9	5,8	1,8	4	5,7
30	10	10	10	10	10	35	10	10	10	10	25	39	1,0	1,3	0,7	-0,7	4,9	7,3	1,0	1,3	0,7	4,3	11,3	17,0	1,5	3,6	5,2	1,5	3,6	5,2	1,5	3,6	5,3	1,5	3,5	5,2

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

KONTROLLEN

Personen-ID	Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12										Risikoscore									
	Einzelfragen										Details zu den Einzelfragen				Gesamtwertung					
	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	4. Medikamente	5. Berufsexposition	6. Gehörschutz	7. Konzerte/Diskothek	8. Musikinstrument	9. Tragb. Wiedergabegeräte	10. Weitere Lärnexposition	11. Familienanamnese	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	5. Berufsexposition	8. Musikinstrument	8. Rockband/Sinfonieorchester	10. Weitere Lärnexposition	11. Familienanamnese	Exogene Risikofaktoren	Familiäre Vorbelastung	GESAMT
1	0	0	0	0	0	1	0	2	0	0				0			0	3	0	3
2	0	0	0	0	0	2	1	1	0	0			KLAV, AKK, FLÖ	0			0	3	0	3
3	1	0	0	0	0	2	2	0	0	1	OMA		KLAV, GIT, Chor	0		V: HST	1	2	1	4
4	1	0	0	0	0	2	0	1	0	0	TIN, OMA			0			1	3	0	4
5	1	0	0	0	0	2	0	2	0	0	OMA			0			1	4	0	5
6	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0				0			0	2	0	2
7	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			KLAV, GIT	0			0	3	0	3
8	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0		Industriestaubsauger		0			0	3	0	3
9	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	OMA			0			1	2	0	3
10	0	0	0	0	0	2	0	0	1	0				0	Kettensäge		0	3	0	3
11	0	0	0	0	0	2	0	1	0	1				0		M: TIN; V/B: HST	0	3	1	4
12	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0		Industrielärm		0			0	3	0	3
13	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			Quer-FLÖ	0			0	3	0	3
14	0	0	0	1	0	1	0	2	0	0				0			0	4	0	4
15	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0			Quer-FLÖ	0	Industriepraktikum		0	4	0	4
16	0	0	0	0	0	2	0	2	0	1				0		TIN	0	4	1	5
17	0	0	0	1	1	0	0	2	1	0		Flugzeugcockpit		0	Motorradfahrer		0	4	0	4
18	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	HST li			0			1	2	0	3
19	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			KLAV	0			0	3	0	3
20	0	0	0	0	0	2	2	2	1	1			KLAV	0	Militär	M: Otosklerose	0	5	1	6
21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				0			0	0	0	0
22	0	0	0	0	0	2	2	1	1	0			KLAV	0	Militär		0	4	0	4
23	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			KLAV, KLAR	0			0	3	0	3
24	1	0	0	0	0	2	2	1	0	0	TIN, OMA		KLAV, GIT	0			1	3	0	4
25	0	0	0	1	1	2	0	0	1	1		Industrielärm		0	Kettensäge	B: HST, TIN	0	4	1	5
26	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			GIT	0			0	3	0	3
27	1	0	0	0	0	2	0	2	0	1	OMA			0		V: HST	1	4	1	6
28	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0			Piccolo/Block-FLÖ	0			0	3	0	3
29	0	0	0	1	0	2	0	0	0	0		Industrielärm		0			0	3	0	3
30	0	0	0	1	1	2	0	1	0	0		Schmiede		0			0	4	0	4

Legende: siehe oben

Ü60 NH_mWHO

Personen-ID	Geschlecht	Alter	PTA-Hörschwelle (dB HL)															HHIE-S (Score)	OLSA (dB SNR)		SUN (richtig/15)				LIPP														
			links					rechts					1. Messung	2. Messung	links	rechts	1. Testohr		2. Testohr	binaural			dichotisch			interaural													
			250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	250Hz	500Hz	1000Hz								2000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	links	rechts											
P03	1	69,7	8	0	2	16	23	38	60	-1	-1	4	2	10	23	19	10	-6,2	-7,3	9	10	9	10	51,5	3,3	6,0	93,0	3,0	10,0	71,5	2,8	10,5	71,8	3,5	7,0	114,0	7,6	17,3	
P04	2	62,3	3	0	0	0	2	28	33	-4	-3	0	1	0	3	27	0	-6,2	-7,9	12	13	12	13	70,8	7,0	31,0	66,5	4,5	30,0	63,3	5,6	16,0		6,3	30,5		4,6	6,3	
P05	1	64,3	5	4	10	16	24	28	23	2	1	6	7	14	16	22	0	-6	-6,7	14	11	11	14	66,0	2,0	13,5	58,5	0,9	12,5	31,5	1,8	19,5		3,7	7,0		2,8	31,5	
P06	1	64,1	6	5	4	15	24	32	41	12	7	3	10	29	36	53	20	-5	-6,1	10	9	10	9	71,5	4,7	28,0	86,5	8,2	15,0		4,2	20,0	70,5	6,9	9,5	65,0	4,5	4,0	
P07	2	66,0	0	0	4	3	5	11	10	-1	0	2	7	23	24	16	16		-6,3	13	10	10	13	82,8	6,4	55,0			10,8	14,5		10,8	43,8		7,3	32,3			
P08	1	73,8	0	-1	5	4	47	74	80	4	5	-2	0	31	66	70	12	-4,6	-5,8	11	12	11	12	62,3	3,5	10,3	98,5	2,5	4,0		8,8	6,0		2,6	7,5		3,7	6,0	
P09	1	65,5	5	13	7	1	21	7	31	4	3	-1	5	23	43	42	8	-6,5	-7	14	14	14	14	31,5	4,6	5,5	66,0	4,4	7,0	72,5	3,1	3,0	32,0	3,6	10,0	70,0	3,2	5,5	
P10	2	66,2	-1	0	-1	7	20	33	21	2	-2	1	7	24	28	41	4	-5,7	-6,7	9	10	10	9	79,3	7,7	9,0	163,0	6,1	10,0	147,0	9,8	26,3		7,0	24,0		6,8	16,5	
P13	1	65,5	4	5	1	0	12	27	50	9	5	1	2	9	36	55	6	-5,3	-6	11	8	11	8	48,0	2,6	14,0	59,3	2,2	11,0	45,3	3,4	33,5	46,0	2,7	2,5	56,0	2,5	4,0	
P14	1	63,1	4	-1	0	21	52	37	59	12	3	1	18	51	31	31	10	-6,6	-6,5	8	10	8	10	25,0	1,3	14,0	46,0	1,4	8,5	47,5	2,1	10,0	63,0	2,1	9,5	41,0	2,6	12,5	
P18	2	62,8	2	-1	1	6	-1	3	13	-1	-3	3	5	7	14	12	6	-4,8	-6,5	12	12	12	12	29,0	1,5	7,0	46,8	3,5	4,5	73,0	3,3	4,0	84,3	4,1	4,5	36,0	3,9	6,5	
P19	2	76,0	6	8	6	7	6	21	58	2	9	6	4	8	26	50	4	-5,9	-6,3	14	14	14	14	69,8	2,9	15,8	72,0	6,1	11,5	28,5	4,3	5,0		5,5	11,0		6,5	13,8	
P20	2	73,6	4	2	2	4	16	37	59	10	3	4	7	15	40	54	14	-5,1	-6,4	11	10	11	10	66,5	8,4	34,8	123,5	7,2	9,5		8,1	26,8		20,0		8,5	26,0		
P22	2	68,2	5	9	11	19	34	43	64	2	4	16	34	33	53	68	34	-4,4	-5,7	7	9	9	7	137,5		11,0	116,5	8,6	23,0		7,9	3,0		4,7	7,5		2,6	1,5	
P24	2	70,1	-1	4	2	5	25	19	18	-10	9	6	3	10	17	9	4	-6,6	-7,4	12	8	8	12	68,0	5,6	14,0	65,0	7,3	4,5	65,5	6,8	1,5	82,5	4,4	14,0		7,5	9,5	
P25	1	71,1	9	16	17	24	16	59	51	12	15	20	14	15	30	43	10	-6,6	-7,3	13	14	14	13	81,5	6,0	15,0		2,6	6,0	123,0	4,7	14,5	75,5	4,7	13,0		6,9	7,5	
P27	2	66,3	9	12	11	13	38	69	67	12	13	11	7	23	56	59	8	-5,1	-5,9	9	10	10	9	63,0	5,1	15,3	57,5	4,3	8,0	68,5	5,5	12,8		7,9	2,5		5,4	7,0	
P31	2	66,8	5	9	15	0	41	64	35	2	12	8	3	45	17	22	12	-5,3	-6,8	14	15	14	15		3,6	59,8	157,5	6,4		137,5	5,2			8,2			6,5		
P35	2	65,0	11	14	12	10	27	36	38	13	12	11	12	13	29	15	16	-5,9	-6,9	10	12	10	12	52,0	2,3	9,0	69,8	5,2	9,3	98,8	4,3	5,5	161,5	2,5	6,0		2,6	5,5	
P36	1	75,0	0	2	8	8	6	18	10	9	5	5	10	14	13	17	8	-7,4	-8,1	12	10	12	10	79,0	2,0	4,5	113,0	1,2	1,5	102,5	3,2	3,5	91,0	3,9	4,5		4,1	3,0	
P38	2	66,2	0	0	0	12	43	50	55	-1	0	-1	15	51	61	61	8	-5,6	-6,3	11	11	11	11	77,5	5,0	20,0	70,5	2,7	19,5		6,0	27,0		5,3	12,0		7,1	11,8	
P39	2	66,9	9	9	8	7	5	22	5	5	10	8	9	2	27	17	8	-6,9	-7,9	12	12	12	12	66,5	7,8	7,0	76,0	2,7	7,5	80,8	7,5	8,0		4,4	10,5		5,7	3,0	
P40	1	71,9	4	6	4	14	23	28	31	9	8	7	19	20	34	36	18	-4,8	-5,5	9	10	9	10	84,0	6,0	8,8		8,0	5,5	142,0	9,8	25,5		7,3	17,0		10,1	21,0	
P45	1	61,4	7	13	16	3	23	41	20	8	13	13	3	10	17	39	2	-6,5	-7,3	12	13	13	12		5,2	6,0		3,1	7,0	90,0	3,6	5,5	123,3	3,0	10,5	38,8	4,5	4,0	
P54	1	64,7	-2	-3	0	0	24	18	43	2	0	-4	10	12	44	56	10	-6,8	-7,7	13	14	14	13	119,0	5,2	14,5	109,3	4,1	26,0	123,3	5,2	36,5		3,8	3,5		5,7	18,5	
P57	1	62,3	-3	4	0	3	11	1	12	1	2	0	4	31	15	12	8	-7,4	-7,3	13	15	13	15	59,0	1,6	2,0			7,5	79,5	2,7	3,5	18,0	2,1	2,0	18,5	2,8	2,0	
P58	1	64,2	3	-2	1	7	12	8	13	-1	1	2	10	16	14	25	6	-6,9	-7,9	14	13	14	13	69,3	3,2	4,5	60,5	1,5	4,5	64,3	2,8	4,5	12,0	6,1	1,0	24,0	3,9	4,5	
P61	1	60,4	1	5	5	15	1	15	19	9	8	2	6	0	10	21	6	-7,2	-8,5	14	14	14	14	50,0	1,4	6,5		1,1	4,0	71,5	1,9	6,0	20,0	2,0	2,5	31,0	3,7	0,5	
P65	2	64,8	-8	-6	6	11	1	3	0	-8	-4	9	-5	16	10	6	2	-6,3	-6,4	13	14	13	14	36,5	3,5	5,0	43,0	3,5	3,5	147,5	7,0	3,5	58,0	6,5	5,0		8,6	12,5	
P67	2	61,7	-9	-2	-2	4	8	9	35	-6	-2	0	8	0	10	20	2	-7,2	-7,9	13	14	13	14	53,0	2,2	4,5	68,5	4,6	8,5	66,5	2,5	3,5	42,5	3,4	2,0	32,5	4,8	3,0	

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

Ü60 NH_{mWHO}

Personen-ID	DPOAE																			BERA																
	DPOAE-Schwelle (dB SPL)									DPOAE-Hörschwellenschätzung (dB HL)										Absolutlatenz Messung1 (ms)						Absolutlatenz Messung2 (ms)										
	links					rechts				links					rechts					links			rechts			links			rechts							
	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	I	III	V	I	III	V	I	III	V	I	III	V
P03	-1	20	27	24	60		-3	16	17	19		2,3	7,7	14,1	26,3	30,1		0,4	3,2	8,1	9,2			1,9	4,1	6,4		4,1	6,3	1,9	4,1	6,4		4,1	6,3	
P04	22	13	30	20	15	30	17	10	21	10	21	26	8,1	12,8	11,5	11,0	8,3	7,5	4,6	7,4	4,4	6,9	5,9	8,9	1,8	4	5,7	1,7	3,8	5,6	1,8	3,9	5,7	1,7	3,7	5,5
P05		60	28	36			20	23	21	25	10	65		35,1	32,1	23,1			12,5	12,5	13,4	7,8	19,9	22,6	1,9	4	5,9	1,6	4	5,8	1,8	4	5,8	1,7	3,9	5,8
P06	35	25	31	29	60		50	31	50	35			21,1	21,8	19,0	29,3	32,4		31,3	34,9	29,3	33,6			2,2	4	6	1,8	4,2	6,1	2,2	4,1	6,1	1,8	4,2	6,2
P07																									1,6	3,8	5,7		4	5,9	1,7	3,9	5,6		4,2	5,9
P08	40	15	34	39	60		30	21			45		18,4	21,0	20,0	33,7	37,5		16,4	16,4		35,0			4,3	6,5	1,7	4,3	6,5	2	4,3	6,4	2	4,3	6,4	
P09	13	10	26	27	29	55	18	25	11	20		50	2,7	7,6	11,4	16,3	23,4	26,8	12,4	9,4	9,4	6,6		34,0	2	3,9	6,2	1,9	4	6,3	2	4	6,2	2,1	4	6,6
P10	17	19	4	27	28	60	10	10	10	15	30		8,7	4,6	7,4	9,1	24,9	28,9	1,0	1,3	2,3	7,7	10,5		1,9	3,9	6	1,9	3,9	6	1,9	3,9	6	2	4	6
P13	8	10	15	22	65		17	13	4	32			0,0	2,3	6,4	23,4	31,5		6,3	3,0	7,2	9,1			2	4	5,8	2	4,1	5,8	2	3,9	5,7	1,8	4,1	5,8
P14	20	20	60		50		23	17	42	40	35	65	11,2	24,8	31,2		36,0		10,9	18,7	23,7	28,4	33,3	34,9	1,5	4,1	6	1,9	4,1	6,1	1,8	4,1	5,9	1,9	4,1	6
P18	10	15	10	10	15	36	10	9	19	14	10	14	3,6	3,1	2,4	1,1	7,1	10,6	0,4	3,9	4,6	3,7	-0,6	-2,9	1,7	3,7	5,6	1,7	3,7	5,6	1,5	3,7	5,6	1,8	3,7	5,6
P19	15	10	23	36	55		15	25	26	10	60		3,3	7,3	13,7	27,3	33,3		11,0	13,5	11,2	21,5	23,0		1,8	3,9	6,1	1,8	4	5,8	2	4	6	1,9	4,1	5,9
P20	13	15	35	22	55		13	26	25	25	43	60	5,0	12,3	14,8	26,8	26,7		10,1	12,5	16,0	20,4	29,2	36,4	1,6		6,1	1,6	4	6,1	1,6	4	6,2	1,6	4,1	6,1
P22	31	38	35	50			50	50	35	55	65	60	25,5	25,9	31,8	33,4			41,0	36,3	37,3	41,0	46,7	47,5	1,9	3,7	5,5	2	3,8	5,6	2	3,7	5,6	2	3,8	5,6
P24	15	12	40	65	40		10	20	25	13	14	40	2,4	13,7	29,7	37,7	40,5		2,9	9,6	9,8	6,5	8,8	11,9	1,6	3,9	5,9	1,6	3,9	5,8	1,6	3,9	5,9	1,7	3,8	5,7
P25	30			20			28	28	21	30	55		22,0			10,0			18,9	16,9	16,8	24,6	30,5		1,8	3,9	6	1,9	4,1	5,9	1,8	4	6,1	1,9	4	6
P27	19	55	39	38			22	31	30	30			27,8	28,9	34,8	29,7			17,4	18,9	20,8	20,9			1,8	3,8	5,7	1,8	3,8	5,6	1,9	3,9	5,7	1,8	3,8	5,6
P31	20	65	55	55			55	25	40	37	65	60	33,5	38,0	49,0	46,0			31,0	31,3	24,7	36,7	40,7	47,5	1,9	4,4	6,5	1,8	4,1	6	1,8	4,5	6,4	1,9	4	5,9
P35	15	26	15	36	65		5	15	10	10	55		11,4	9,9	16,3	28,1	38,6		1,0	1,3	2,3	14,3	20,5		1,8	4,1	5,9	1,6	4	5,9	1,8	4,1	6	1,8	4,1	6
P36	10	10	10	10	22	60	6	27	18	20	65		1,0	1,3	0,7	3,5	17,5	26,2	7,6	8,4	12,4	23,7	30,5		1,7	4	6	1,6	4,1	6,1	1,7	4	6	1,6	4,1	6,1
P38	24	25	43	55			23	25	55	39			15,7	22,2	31,7	40,1			15,2	25,8	30,3	38,0			1,5	3,9	5,8	1,6	4	5,8	1,6	4	5,9	1,8	4	5,8
P39	11	8	23	15	26		15	25	10	30	38		0,5	5,4	6,2	10,8	8,6		11,0	8,0	12,3	15,2	21,8		1,6	3,7	5,6	1,6	3,6	5,6	1,5	3,7	5,7	1,6	3,6	5,6
P40	65		50	39	50		28	55	40	38	50		57,0		35,3	35,5	32,3		32,3	32,1	34,7	31,7	31,8		1,7	3,9	6,1	1,7	3,9	6,1	1,7	3,9	6,1	1,6	3,9	6,1
P45	16	12	20	30	65		11	-1	14	10	35		5,4	7,6	11,4	27,7	35,5		-0,9	1,4	0,3	9,0	10,5		1,8	3,9	6	1,8	4	6	1,8	3,9	5,9	1,9	4	6
P54	12	15	18	25	27		24	16	0	13	35	65	4,5	6,3	9,9	12,5	13,8		11,3	5,9	1,6	6,5	24,5	35,0	1,6	3,7	5,5	1,7	3,8	5,7	1,6	3,8	5,6	1,6	3,8	5,7
P57	10	10	15	19	25	45	27	10	10	25	35		1,0	3,0	5,3	9,0	16,3	20,1	9,5	7,0	5,7	12,7	18,0		1,7	4,1	6	1,7	4,2	6,1	1,7	4,2	6	1,8	4,1	6,2
P58	24	40	17	30	30	55	23	23	26	15	14	65	22,8	18,4	19,8	15,2	25,0	27,5	14,2	15,4	12,1	7,8	18,1	24,7	1,7	3,5	5,8	1,8	3,9	5,8	1,6	3,7	5,8	2	3,9	5,8
P61	20	28	20	11	40		30	21	15	10	15	50	15,0	14,0	10,3	13,0	13,4		16,7	13,5	6,2	2,7	11,7	17,6	1,6	3,8	5,8	1,6	3,6	5,6	1,5	3,8	5,7	1,5	3,6	5,6
P65	4	27	16	10	30	60	32	20	11	25	35		6,2	6,9	8,3	8,0	19,9	29,9	17,0	12,2	9,2	12,9	18,0		1,5	3,8	5,7	1,6	3,9	5,8	1,5	3,8	5,7	1,7	3,9	5,8
P67	38	29	20	25	37		20	25	10	10	21	60	24,8	20,5	15,5	16,8	19,2		13,5	9,7	5,7	3,1	17,1	25,7	1,6	3,6	5,5	1,5	3,5	5,5	1,5	3,6	5,5	1,5	3,5	5,5

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

Ü60 NH_mWHO

Personen-ID	Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12											Risikoscore									
	Einzelfragen										Details zu den Einzelfragen						GESAMT				
	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	4. Medikamente	5. Berufsexposition	6. Gehörschutz	7. Konzerte/Diskothek	8. Musikinstrument	9. Tragb. Wiedergabegeräte	10. Weitere Lärmexposition	11. Familienanamnese	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	5. Berufsexposition	8. Musikinstrument	8. Rockband/Sinfonieorchester	10. Weitere Lärmexposition		11. Familienanamnese	Exogene Risikofaktoren	Familiäre Vorbelastung	
P03	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	HST re 2011				0	Militär		1	1	0	2
P04	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	TIN re				0			1	1	0	2
P05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P06	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		Fliesenleger			0			0	1	0	1
P07	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	TIN li	Gastronomie			0	M: TIN		1	1	1	3
P08	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HST li				0			1	0	0	1
P09	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	OMA				0			1	0	0	1
P10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HST				0			1	0	0	1
P13	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0	TIN bds	Rundfunkbeleuchter			0			1	1	0	2
P14	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	TIN bds				0	Militär		1	1	0	2
P18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					0	S: fast taub		0	0	1	1
P22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P24	1	0	0	0	0	0	2	0	0	1	HST 2011			KLAV	0	M: HST		1	0	1	2
P25	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0					0	Militär		0	1	0	1
P27	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	OMA				0			1	0	0	1
P31	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0		Laborlärm			0			0	1	0	1
P35	0	0	0	0	0	2	0	0	1				AKK		0	S: angeb. SH		0	0	1	1
P36	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0			KLAV, GIT		0			0	0	0	0
P38	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1					0		K: TIN	0	1	1	2
P39	1	0	0	0	0	2	0	0	1		TIN re			KLAV	0		K: TIN	1	0	1	2
P40	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P45	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	OMA				0			1	0	0	1
P54	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	TIN li			PERK	1	S: HST		1	1	1	3
P57	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0		Brauerei			0			0	2	0	2
P58	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	Exostosen				0		M: PRES	1	0	1	2
P61	1	0	0	0	0	2	1	1	1		TIN bds			GIT	0	Motorrad, Militär	V: HST, PRES	1	2	1	4
P65	0	0	0	0	0	0	1	0	1						0		K: TIN	0	1	1	2
P67	1	0	0	0	0	2	0	0	0	0	HST 2006			KLAV	0			1	0	0	1

Legende: siehe oben

Ü60 SH

Personen-ID	Geschlecht	Alter	PTA-Hörschwelle (dB HL)												HHIE-S (Score)	OLSA (dB SNR)		SUN (richtig/15)		LIPP																				
			links						rechts							1. Messung	2. Messung	links	rechts	1. Testohr	2. Testohr	binaural			dichotisch			interaural												
			250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz	250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	8000Hz								DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)							
P11	1	74,2	14	19	26	48	65	83	96	23	21	41	70	91	67	64	38	-2,2	-3,5	8	5	8	5	111,0	2,7	9,5	42,3	2,6	18,8	141,0	4,2	11,5	65,0	2,5	8,0	34,5	3,4	24,8		
P15	2	75,2	5	5	6	35	55	61	81	10	12	10	30	51	67	64	14	-4,5	-4,8	7	13	13	7	74,8	8,2	11,0	62,0	4,0	9,5	29,5	2,5	8,5		5,5	9,0			9,0		
P16	1	73,8	8	0	4	18	58	60	67	8	11	20	22	69	69	68	16	-3,3	-3,7	9	10	9	10	127,5	4,4	8,5	70,0	4,7	7,0		4,9	6,0	39,0	2,9	3,0	68,5	5,1	2,0		
P21	1	78,5	20	23	22	39	66	73		5	12	23	25	69	65	90	12	-4,7	-7,1	10	9	9	10	92,5	3,5	9,5	72,0	6,5	9,5	71,0	5,7	6,0		4,7	10,0	64,5	6,2	9,5		
P23	2	74,4	17	21	42	34	44	72	61	17	24	34	42	53	65	61	8	-5,1	-5,7	9	11	9	11	25,0	1,8	13,5	78,8	2,5	8,5	81,0	1,9	12,0	11,0	2,7	2,0	16,5	0,8	2,0		
P29	2	73,3	8	20	17	51	63	90	67	8	14	18	34	62	90	72	22	-2,2	-3,4	11	10	10	11	85,5	3,4	16,5	51,5	2,6	36,5	73,5	5,0	33,5	42,0	3,2		74,0	4,2	18,0		
P30	2	66,1	7	17	20	43	48	57	60	6	18	33	31	51	64	62	24	-4,6	-5,8	9	10	10	9	73,5	3,3	8,0	92,0	1,8	7,0		4,3	7,5		2,6	9,0	26,5	2,6	19,0		
P32	2	67,8	-1	13	34	83	84	90	90	6	18	33	45	72	82	81	38	0,7	-1,3	7	9	7	9	46,0	2,6		105,0	6,6	47,3	87,3	6,3	33,0	38,5	5,5	82,5	75,8	3,2			
P33	1	73,3	14	21	18	29	50	58	46	14	26	20	31	48	68	49	16	-6,1	-7,3	13	13	13	13	144,5	3,3	4,0	140,0	4,0	8,5	145,3	4,1	4,0	66,8	3,5	8,0	35,0	5,2	9,5		
P34	1	63,0	6	11	15	61	73	63	60	9	13	18	50	76	82	80	36	0,6	-1,6	7	8	7	8		5,1		100,5	7,4	141,5		9,4	96,5		7,0		123,5	6,0	39,0		
P37	1	76,5	8	10	19	18	61	66	47	8	8	14	15	63	57	46	16	-2,5	-3,9	8	9	8	9	54,5	3,7	15,5	55,8	2,5	8,5	39,5	3,7	14,5	57,3	2,5	6,5		5,4	17,5		
P42	1	70,9	9	13	22	33	92	90	73	5	12	17	23	63	90	84	8	-4,1	-5,1	8	10	8	10	43,0	1,3	4,0	65,3	1,3	3,5	59,8	1,8	2,0	41,5	1,8	4,5	13,0	3,6	3,5		
P43	2	71,6	21	30	32	30	20	50	45	19	32	28	22	19	59	56	6	-6,2	-6,9	10	9	10	9	40,5	0,8	6,0	61,0	2,4	4,0	64,5	2,4	4,5	134,5	1,8	10,5	88,5	1,6	8,0		
P44	2	71,6	9	13	24	37	25	43	60	12	20	23	39	43	59	66	8	-5	-6,6	11	10	11	10	132,8	9,8		88,0	7,4			7,2	31,0	74,8	3,7	69,5	26,5	9,1	15,5		
P46	2	74,3	7	15	35	33	62	65	52	8	24	27	41	56	73	54	14	-4,9	-5,6	13	12	13	12	69,0	3,1	8,0	23,5	5,9	32,3	62,0	2,1	2,5	35,5	2,6	17,5	49,5	3,5	4,5		
P47	2	75,8	30	33	31	22	31	36	42	29	39	38	31	56	64	64	10	-3,3	-3,9	11	10	11	10	82,3	3,5	38,3	104,0	6,9	29,5	83,5	7,5	85,0		7,1	23,0		4,0			
P48	2	74,8	-1	8	23	24	50	62	58	-3	10	16	25	49	54	60	14	-4	-5,6	8	10	8	10	59,0	2,2	6,0	80,0	3,9	8,5	65,3	2,4	4,5		2,7	3,5		5,4	7,0		
P49	2	79,7	3	16	23	47	60	61	85	-1	13	24	36	54	70	72	28	-3,4	-4,7	5	11	5	11	62,0	2,3	12,0		3,4	7,5		2,7	6,5	73,3	7,1	6,0		4,2	24,5		
P50	2	70,6	30	23	27	24	51	68	60	25	32	35	36	59	66	69	16	-5,2	-5,8	7	12	7	12		4,5		180,5	7,1			26,0		6,8	87,8		8,7				
P51	2	70,9	28	27	19	28	54	55	48	40	34	35	27	55	66	61	22	-3,1	-4,4	8	5	8	5	161,0	12,7	32,8					12,2				84,0		8,2			
P52	2	78,6	21	23	15	25	79	86	90	30	31	24	37	57	64	66	18	-3,7	-4,7	11	9	9	11	66,0	2,3	17,0	112,0	1,7	35,5		3,0	28,0		3,4	56,0		3,1	36,0		
P53	2	78,7	4	6	22	37	49	56	69	12	22	34	47	59	62	57	10	-2,1	-2,8	8	9	8	9		5,5	8,0	114,5	3,3	20,8	61,0	5,3	32,8	64,5	3,3	18,0	33,5	4,6	8,5		
P55	1	73,8	12	16	21	46	62	66	71	11	18	22	41	56	67	76	12	-2,5	-4,7	9	10	9	10	15,5	1,0	16,5	57,5	1,8	8,0	42,8		7,0	34,5	2,4	7,0	24,0	2,6	16,0		
P56	1	76,1	-5	6	17	34	56	45	66	0	12	26	46	53	59	59	30	-3,2	-6	9	10	9	10	41,5	1,6	12,5	56,0	3,3	8,0	74,0	2,1	11,0	53,0	3,4	8,5		3,3	10,0		
P59	1	69,0	22	21	28	42	61	58	57	21	28	31	35	52	55	57	8	-2,6	-4,2	11	11	11	11	73,5	1,9	7,0	75,3	2,2	3,0	94,5	1,5	21,5	20,5	1,9	9,5	74,0	3,1	23,0		
P60	1	78,1	25	30	30	40	70	80	80	10	15	20	30	60	75	80	0	-5,7	-6,1	11	10	11	10	84,5	4,7	11,0		9,4	13,5	81,0	4,0	12,5			13,5	194,5	5,6	11,5		
P62	1	76,3	-2	12	12	29	56	57	68	8	15	20	33	45	51	55	2	-4,6	-5,7	7	9	7	9	57,3	3,1	14,0	132,3	3,3	8,0	83,5	3,5	13,5		6,1	12,0			11,0		
P63	1	70,6	0	8	10	39	61	62	82	5	11	15	26	61	61	86	18	-2,7	-4,4	8	10	8	10	78,3	6,0	14,0	45,5	3,9	11,5	51,3	2,7	5,0		5,3	7,0	83,3	3,8	13,5		
P64	1	75,6	-5	-2	-1	50	47	54	60	5	6	3	40	56	62	63	18	-1,7	-3,6	6	8	6	8	116,5	6,8	22,5	136,0	6,6	12,5		4,4	10,5		9,6	29,0		7,0	11,0		
P66	1	64,5	19	28	29	54	54	60	63	26	21	19	45	52	62	67	30	-3,5	-4,3	10	8	8	10	83,0	2,2	12,0		2,8	8,5	90,0	2,3	11,5		7,9		58,3	8,4	7,5		

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

Ü60 SH

Personen-ID	DPOAE														BERA																						
	DPOAE-Schwelle (dB SPL)							DPOAE-Hörschwellenschätzung (dB HL)							Absolutlatenz Messung1 (ms)						Absolutlatenz Messung2 (ms)																
	links				rechts			links				rechts			links			rechts			links			rechts													
	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	I	III	V	I	III	V	I	III	V	I	III	V							
P11	55	65				60						51,0	51,0				44,0				1,7	4,1	5,9	1,9	4,2	6	1,7	4,1	5,9	1,6	4,1	5,9	7,2	7,2			
P15	34	55	65	65			43	55	60	50		65	35,3	42,5	52,3	56,0			39,8	43,9	45,7	46,0		49,0	1,8	3,6	5,6	3,9	6	1,6	3,9	5,7	1,8	3,9	5,9		
P16	35	30		65			34	35	60				23,5	23,5		55,0			25,8	34,5	38,6				1,8	3,6	5,6	3,9	6	1,6	3,9	5,7	1,8	3,9	5,9		
P21	65	60	40	50			55	55	55				53,5	46,5	40,8	36,2			46,0	46,3	46,0				1,7	3,9	6	1,9	4,2	6,2	1,7	3,9	6	1,9	4,2	6,2	
P23			65												57,0											1,8	4,2	6,1	1,6	4,3	5,9	1,7	4,1	6	2	4,3	5,7
P29	55	65	65				25	35					51,0	53,0	56,0				20,9	20,9					2,1	4,1	6	2	4,1	6	2,1	4,1	6	1,9	3,9	6,1	
P30	42	60	60				55	55	50	65			41,9	45,2	51,0				46,0	44,7	47,3	48,5			1,9	3,9	6	2	3,8	5,8	1,9	3,9	5,9	2	3,9	5,8	
P32						60												44,0								4,8	6,3				6		4,7	6,5			6,2
P33	39	44	55	60			39	44	40	50			32,5	37,4	43,6	48,5			32,3	32,1	35,2	35,9			1,6	3,8	6,3	1,5	3,8	6,2	1,6	3,7	6,2	1,5	3,8	6,3	
P34	50		60					65	60				42,0		52,0					53,5	53,5				2,1	4,2	6,5					2,2	4,2	6,5			
P37	21	25	65				10	33					18,8	28,2	36,0				12,7	12,7					1,8	4,1	6,1	1,8	4,1	6,1	1,8	4,1	6,2	1,7	4,1	6,1	
P42	60	60	60				60	50	55	55			51,0	51,3	51,0				46,0	46,3	44,0	46,0			2,3	4,5	6,7	2,4	4,6	6,5	2,3	4,4	6,7	2,3	4,6	6,5	
P43	24	37	28	20			34	35	24	20			21,5	21,0	19,1	15,0			25,5	22,4	17,1	13,1			1,6	3,9	6	1,5	3,8	5,9	1,6	3,9	5,9	1,6	3,8	5,9	
P44	65	65		55			65			55		60	56,0	56,0		45,0			57,0			45,0		44,0	1,5	3,8	5,6	1,7	3,8	5,5	1,6	3,8	5,5	1,8	3,9	5,6	
P46	55	50	50	65			65		50	65			43,5	43,0	45,7	48,5			57,0		48,5	48,5			1,6	4	5,9	2	4	6	1,6	4	5,9	2	4	6	
P47	50	42	50	42	65		60	50	50	60		65	36,9	38,6	35,3	41,7	41,5		46,0	44,7	44,0	46,0		49,0	1,5	4	5,8	1,8	4,1	5,9	1,5	4	5,8		4	5,9	
P48	55	60	65	65			40	55	60	65			48,5	51,3	54,0	56,0			38,7	43,1	50,7	53,5			1,7	3,8	5,5	1,6	3,6	5,5	1,7	3,7	5,5	1,5	3,5	5,5	
P49	65						65			60			57,0						57,0			50,0			1,7	4,1	6	1,6	4	5,8	1,8	4,1	6,1	2	4	5,8	
P50	45	36	41	38			55	36	55	50			31,6	32,1	29,1	30,5			36,5	40,0	37,7	43,5			1,7	4	6,1	1,9	3,9	6	1,5	4	6,1	1,9	4,1	5,9	
P51	44	41	43	42			41	38	35	65			33,6	34,1	32,7	33,4			30,4	29,3	36,8	41,1			2	4	6	2,2	3,9	5,9	1,9	3,9	6,1		3,9	5,9	
P52	60	60						65					51,0	51,0						55,0					2,2	4,4	6,5	2,1	4,1	6,3	2,2	4,7	6,4	2		6,2	
P53	65			60	65								57,0			50,5	50,5								1,9	4,3	6,2	1,7	4,3	6,1	1,7	4,4	6,2	1,9	4,3	6,1	
P55	60			50		60	60				60		52,0			40,0		44,0	52,0				46,0			1,9			1,6	4	6,3	1,8	4,3	6,5	1,7	4	6,3
P56	55	65		65			50	60	60	60			51,0	51,0		55,0			46,0	48,0	50,7	51,0			1,8	4	5,9		4		1,7	4,1	5,9	1,9	4	6	
P59	60	55					65	60		60		65	48,5	48,5					53,5	53,5		50,0		49,0	1,8	3,9	5,9	1,9	4	5,9	1,6	3,8	6	1,8	4	5,9	
P60	60	65	65				50	55	60	60			53,5	54,7	56,0				43,5	46,3	49,0	51,0			1,8	4,5	6,5	1,9	4,3	6,1		4,3	6,5	1,8	4,3	6,2	
P62	42	55	65				50	50	50	60			39,7	45,5	51,0				41,0	41,3	44,0	46,0			1,6	3,9	5,8	1,6	3,7	5,7	1,5	4	5,7	1,5	3,7	5,6	
P63	50	65				60	50	50	65	65			48,5	48,5					41,0	46,3	50,7	56,0			2	4,3		1,7	4,3	6,5	1,9	4,2	6,5	2,1	4,3	6,5	
P64							60												52,0						1,8	3,8	5,8	1,7	4,2	5,8	1,7	4	5,8	1,7	4,2	5,8	
P66																										2,1	4,2	6,2	1,9	4,2	6,2		4,2	6,2	1,8	4,2	6,1

Legende: Personen-ID=Personen-Identifikationsnummer; weitere Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis bzw. Hauptteil der Dissertation

Ü60 SH

Personen-ID Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12																					
Personen-ID	Einzelfragen										Details zu den Einzelfragen				Risikoscore						
	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	4. Medikamente	5. Berufsexposition	6. Gehörschutz	7. Konzerte/Diskothek	8. Musikinstrument	9. Tragb. Wiedergabegeräte	10. Weitere Lärmexposition	11. Familienanamnese	2. Vorerkrankungen	3. Ohr-OP	5. Berufsexposition	8. Musikinstrument	8. Rockband/Sinfonieorchester	10. Weitere Lärmexposition	11. Familienanamnese	Exogene Risikofaktoren	Familiäre Vorbelastung	GESAMT	
P11	0	0	0	1	1	0	0	2	0	1			Tiefbau		0		V/B: PRES	0	3	1	4
P15	1	0	0	0	0	0	2	0	0	0	TIN bds, HAST			Geige	0			1	0	0	1
P16	1	0	0	1	0	0	0	2	0	0	HST li 2012	Schlosser, Lokführer			0			1	3	0	4
P21	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0				KLAV	0			0	1	0	1
P23	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0					Autorennbahn		0	2	0	2
P29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	OMA				0	PRES gehäuft	1	0	1	2	
P30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	TIN bds, HST li				0	M: PRES	1	0	1	2	
P32	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	TIN bds	Werksbüro			0			1	2	0	3
P33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P34	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	Fazialisparese	Autotestfahrer			0		V: PRES	1	1	1	3
P37	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0				KLAV	0			0	0	0	0
P42	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	TIN bds	Lärmgutachter		Trompete	0	Militär		1	2	0	3
P43	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	HST re 2013				0	Motorrad	M: PRES	1	1	1	3
P44	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0					0			0	1	0	1
P46	1	0	0	0	0	0	0	2	0	0	OMA			KLAV	0			1	0	0	1
P47	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	HAST				0			1	0	0	1
P48	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	TIN li				0	K: TIN	1	0	1	2	
P49	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	TIN bds				0	M: PRES	1	0	1	2	
P50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P51	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0				AKK	0			1	0	0	1
P52	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TIN				0			1	0	0	1
P53	0	0	0	0	0	0	2	0	0	1				Block-FLÖ	0		M: PRES	0	0	1	1
P55	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	TIN, Felsenbein# 2013				0	Militär		1	1	0	2
P56	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TIN bds				0			1	0	0	1
P59	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	TIN li				0			1	0	0	1
P60	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	HST re 2013				0			1	1	0	2
P62	0	0	0	1	1	0	0	0	0	1		Landwirt			0		M/S: PRES	0	1	1	2
P63	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					0			0	0	0	0
P64	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					0	Trennschleifer, Traktor		0	1	0	1
P66	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1					0		V: PRES	0	0	1	1

Legende: siehe oben

7.2 Übersicht über die Einzelkorrelationen aller Messmethoden

Anmerkungen zu den Tabellen

Abkürzungen: siehe Abkürzungsverzeichnis

Angegeben werden jeweils die Spearman-Rangkorrelationskoeffizienten (Spearman's Rho). Grau hinterlegte Werte in den Tabellen waren auf 5%-Niveau nicht signifikant.

Für die Korrelationen wurden die Ergebnisse ausschließlich der Studienteilnehmer berücksichtigt, die bei beiden zu korrelierenden Messverfahren ein valides Ergebnis erzielt hatten (paarweise Korrelation).

Bei den Spalten / Zeilen mit blauer Legende wurden jeweils die Gesamtergebnisse der Studienteilnehmer für das jeweilige Messverfahren zur Korrelationsberechnung gemäß Definition im Material-Methodik-Teil der Dissertation herangezogen, bei den Spalten / Zeilen mit roter Legende ausnahmsweise nach Ohrseite getrennte Ergebnisse (Begründung für diese Ausnahmen im Ergebnisteil der Dissertation).

Korrelationen 1 (Legende s.o.)			Alter (a)	DIN-Gesamtscore	PTA 500-4000Hz (dB HL)	PTA 500-8000Hz (dB HL)	PTA-Hörschwelle (dB HL)								HHIE-S (Score)	OLSA (dB SNR)		SUN (richtig/15)
							250Hz	500Hz	1000Hz	2000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	1. Messung		2. Messung		
Alter (a)																		
DIN-Gesamtscore			-0,60															
PTA 500-4000Hz (dB HL)			0,75	-0,44														
PTA 500-8000Hz (dB HL)			0,81	-0,47	0,96													
PTA-Hörschwelle (dB HL)	250 Hz		0,40	-0,33	0,67	0,61		0,79	0,65	0,54	0,51	0,56	0,45	0,40	0,44	0,47	-0,37	
	500Hz		0,57	-0,35	0,84	0,75	0,79		0,89	0,69	0,62	0,68	0,57	0,50	0,57	0,58	-0,46	
	1000Hz		0,53	-0,27	0,81	0,71	0,65	0,89		0,71	0,59	0,64	0,54	0,46	0,59	0,58	-0,49	
	2000Hz		0,68	-0,38	0,91	0,89	0,54	0,69	0,71		0,82	0,80	0,79	0,67	0,75	0,78	-0,71	
	4000Hz		0,78	-0,45	0,91	0,94	0,51	0,62	0,59	0,82		0,92	0,89	0,74	0,82	0,87	-0,69	
	6000Hz		0,80	-0,43	0,89	0,96	0,56	0,68	0,64	0,80	0,92		0,92	0,69	0,81	0,83	-0,70	
	8000Hz		0,82	-0,50	0,82	0,94	0,45	0,57	0,54	0,79	0,89	0,92		0,68	0,83	0,85	-0,67	
	HHIE-S (Score)			0,62	-0,43	0,71	0,73	0,40	0,50	0,46	0,67	0,74	0,69	0,68		0,76	0,76	-0,60
OLSA (dB SNR)	1. Messung		0,73	-0,50	0,79	0,83	0,44	0,57	0,59	0,75	0,82	0,81	0,83	0,76		0,94	-0,69	
	2. Messung		0,77	-0,51	0,83	0,87	0,47	0,58	0,58	0,78	0,87	0,83	0,85	0,76			-0,68	
SUN (richtig/15)			-0,55	0,25	-0,68	-0,71	-0,37	-0,46	-0,49	-0,71	-0,69	-0,70	-0,67	-0,60	-0,69	-0,68		
LIPP	binaural	DD (ms)	0,47	-0,41	0,43	0,49	0,27	0,26	0,19	0,43	0,49	0,49	0,51	0,42	0,48	0,49	-0,30	
		PD (dB)	0,34	-0,33	0,21	0,25	0,10	0,09	0,05	0,12	0,26	0,32	0,29	0,25	0,32	0,33	-0,16	
		FD (Hz)	0,49	-0,37	0,50	0,55	0,28	0,32	0,27	0,44	0,49	0,53	0,54	0,43	0,56	0,57	-0,43	
	dichotisch	DD (ms)	0,36	-0,30	0,44	0,43	0,27	0,29	0,26	0,37	0,41	0,37	0,41	0,42	0,35	0,40	-0,30	
		PD (dB)	0,36	-0,36	0,35	0,37	0,19	0,22	0,18	0,27	0,37	0,37	0,38	0,39	0,43	0,47	-0,29	
		FD (Hz)	0,52	-0,45	0,60	0,65	0,42	0,42	0,36	0,60	0,60	0,59	0,62	0,51	0,63	0,69	-0,43	
	interaural	DD (ms)	0,35	-0,37	0,44	0,47	0,23	0,25	0,30	0,45	0,48	0,43	0,50	0,35	0,45	0,47	-0,41	
		PD (dB)	0,40	-0,44	0,29	0,33	0,04	0,11	0,11	0,29	0,32	0,31	0,37	0,32	0,42	0,44	-0,23	
		FD (Hz)	0,68	-0,54	0,67	0,71	0,33	0,44	0,42	0,64	0,70	0,69	0,67	0,57	0,72	0,73	-0,55	
DPOAE-Schwelle (dB SPL)	1500Hz		0,64	-0,39	0,79	0,82	0,39	0,57	0,58	0,79	0,78	0,77	0,80	0,61	0,75	0,74	-0,53	
	2000Hz		0,67	-0,40	0,82	0,80	0,50	0,64	0,64	0,86	0,76	0,72	0,74	0,61	0,72	0,73	-0,52	
	3000Hz		0,70	-0,46	0,82	0,83	0,44	0,60	0,58	0,79	0,80	0,77	0,77	0,62	0,76	0,79	-0,56	
	4000Hz		0,84	-0,57	0,87	0,91	0,40	0,61	0,56	0,79	0,91	0,85	0,87	0,71	0,82	0,88	-0,59	
	6000Hz		0,75	-0,53	0,59	0,70	0,39	0,31	0,16	0,41	0,69	0,65	0,70	0,69	0,57	0,71	-0,27	
	8000Hz		0,71	-0,54	0,63	0,71	0,30	0,23	0,16	0,59	0,75	0,63	0,73	0,61	0,56	0,72	-0,34	
DPOAE-Hörschwellenschätzung (dB HL)	1500Hz		0,67	-0,40	0,82	0,83	0,45	0,61	0,61	0,85	0,79	0,77	0,80	0,64	0,75	0,76	-0,54	
	2000Hz		0,68	-0,43	0,85	0,87	0,49	0,63	0,63	0,86	0,82	0,80	0,82	0,64	0,77	0,78	-0,55	
	3000Hz		0,77	-0,50	0,88	0,89	0,47	0,63	0,59	0,85	0,86	0,82	0,83	0,67	0,79	0,84	-0,56	
	4000Hz		0,85	-0,57	0,85	0,90	0,42	0,59	0,55	0,78	0,90	0,84	0,87	0,70	0,82	0,88	-0,57	
	6000Hz		0,78	-0,62	0,70	0,79	0,41	0,34	0,19	0,51	0,80	0,72	0,77	0,70	0,62	0,77	-0,34	
	8000Hz		0,74	-0,51	0,65	0,72	0,33	0,31	0,23	0,57	0,77	0,66	0,74	0,69	0,61	0,74	-0,35	
BERA-IPL (ms)	I-III		0,35	-0,22	0,27	0,25	0,18	0,15	0,12	0,22	0,32	0,23	0,23	0,15	0,17	0,22	-0,14	
	III-V		0,23	-0,27	0,37	0,35	0,38	0,31	0,26	0,24	0,35	0,33	0,24	0,32	0,21	0,23	-0,17	
	I-V		0,42	-0,34	0,50	0,46	0,39	0,34	0,30	0,36	0,51	0,43	0,37	0,36	0,31	0,36	-0,23	
SUN (richtig/15)			-0,52	0,23	-0,62	-0,67	-0,29	-0,38	-0,41	-0,67	-0,68	-0,69	-0,67	-0,55	-0,64	-0,63	0,94	
LIPP	links	DD (ms)	0,44	-0,37	0,41	0,45	0,22	0,27	0,22	0,35	0,39	0,39	0,44	0,40	0,37	0,39	-0,35	
		PD (dB)	0,33	-0,37	0,35	0,37	0,19	0,26	0,19	0,30	0,38	0,33	0,38	0,35	0,39	0,42	-0,27	
		FD (Hz)	0,48	-0,39	0,54	0,60	0,33	0,37	0,29	0,54	0,57	0,54	0,59	0,47	0,57	0,62	-0,39	
	rechts	DD (ms)	0,15	-0,12	0,30	0,27	0,21	0,23	0,19	0,23	0,28	0,18	0,20	0,22	0,15	0,23	-0,08	
		PD (dB)	0,24	-0,20	0,23	0,26	0,16	0,11	0,10	0,14	0,25	0,27	0,27	0,30	0,35	0,37	-0,21	
		FD (Hz)	0,46	-0,37	0,54	0,59	0,41	0,35	0,32	0,55	0,54	0,56	0,57	0,46	0,59	0,63	-0,42	

Korrelationen 2 (Legende s.o.)			LIPP									DPOAE-Schwelle (dB SPL)						
			binaural			dichotisch			interaural									
			DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	
Alter (a)			0,47	0,34	0,49	0,36	0,36	0,52	0,35	0,40	0,68	0,64	0,67	0,70	0,84	0,75	0,71	
DIN-Gesamtscore			-0,41	-0,33	-0,37	-0,30	-0,36	-0,45	-0,37	-0,44	-0,54	-0,39	-0,40	-0,46	-0,57	-0,53	-0,54	
PTA 500-4000Hz (dB HL)			0,43	0,21	0,50	0,44	0,35	0,60	0,44	0,29	0,67	0,79	0,82	0,82	0,87	0,59	0,63	
PTA 500-8000Hz (dB HL)			0,49	0,25	0,55	0,43	0,37	0,65	0,47	0,33	0,71	0,82	0,80	0,83	0,91	0,70	0,71	
PTA-Hörschwelle (dB HL)	250 Hz		0,27	0,10	0,28	0,27	0,19	0,42	0,23	0,04	0,33	0,39	0,50	0,44	0,40	0,39	0,30	
	500Hz		0,26	0,09	0,32	0,29	0,22	0,42	0,25	0,11	0,44	0,57	0,64	0,60	0,61	0,31	0,23	
	1000Hz		0,19	0,05	0,27	0,26	0,18	0,36	0,30	0,11	0,42	0,58	0,64	0,58	0,56	0,16	0,16	
	2000Hz		0,43	0,12	0,44	0,37	0,27	0,60	0,45	0,29	0,64	0,79	0,86	0,79	0,79	0,41	0,59	
	4000Hz		0,49	0,26	0,49	0,41	0,37	0,60	0,48	0,32	0,70	0,78	0,76	0,80	0,91	0,69	0,75	
	6000Hz		0,49	0,32	0,53	0,37	0,37	0,59	0,43	0,31	0,69	0,77	0,72	0,77	0,85	0,65	0,63	
	8000Hz		0,51	0,29	0,54	0,41	0,38	0,62	0,50	0,37	0,67	0,80	0,74	0,77	0,87	0,70	0,73	
HHIE-S (Score)			0,42	0,25	0,43	0,42	0,39	0,51	0,35	0,32	0,57	0,61	0,61	0,62	0,71	0,69	0,61	
OLSA (dB SNR)	1. Messung		0,48	0,32	0,56	0,35	0,43	0,63	0,45	0,42	0,72	0,75	0,72	0,76	0,82	0,57	0,56	
	2. Messung		0,49	0,33	0,57	0,40	0,47	0,69	0,47	0,44	0,73	0,74	0,73	0,79	0,88	0,71	0,72	
SUN (richtig/15)			-0,30	-0,16	-0,43	-0,30	-0,29	-0,43	-0,41	-0,23	-0,55	-0,53	-0,52	-0,56	-0,59	-0,27	-0,34	
LIPP	binaural	DD (ms)		0,63	0,38	0,49	0,54	0,52	0,41	0,61	0,56	0,51	0,50	0,39	0,51	0,32	0,45	
		PD (dB)	0,63		0,44	0,39	0,73	0,46	0,39	0,73	0,53	0,23	0,20	0,28	0,35	0,39	0,28	
		FD (Hz)	0,38	0,44		0,26	0,50	0,70	0,41	0,50	0,62	0,43	0,45	0,52	0,52	0,45	0,41	
	dichotisch	DD (ms)	0,49	0,39	0,26		0,60	0,47	0,59	0,48	0,48	0,35	0,35	0,30	0,37	0,49	0,48	
		PD (dB)	0,54	0,73	0,50	0,60		0,59	0,57	0,75	0,58	0,32	0,37	0,41	0,47	0,52	0,36	
		FD (Hz)	0,52	0,46	0,70	0,47	0,59		0,40	0,53	0,74	0,52	0,55	0,54	0,63	0,53	0,57	
	interaural	DD (ms)	0,41	0,39	0,41	0,59	0,57	0,40		0,55	0,59	0,31	0,41	0,52	0,45	0,42	0,46	
		PD (dB)	0,61	0,73	0,50	0,48	0,75	0,53	0,55		0,61	0,31	0,40	0,39	0,44	0,47	0,48	
		FD (Hz)	0,56	0,53	0,62	0,48	0,58	0,74	0,59	0,61		0,62	0,60	0,59	0,71	0,57	0,66	
DPOAE-Schwelle (dB SPL)	1500Hz		0,51	0,23	0,43	0,35	0,32	0,52	0,31	0,31	0,62		0,78	0,74	0,78	0,42	0,64	
	2000Hz		0,50	0,20	0,45	0,35	0,37	0,55	0,41	0,40	0,60	0,78		0,82	0,80	0,46	0,68	
	3000Hz		0,39	0,28	0,52	0,30	0,41	0,54	0,52	0,39	0,59	0,74	0,82		0,83	0,44	0,46	
	4000Hz		0,51	0,35	0,52	0,37	0,47	0,63	0,45	0,44	0,71	0,78	0,80	0,83		0,81	0,79	
	6000Hz		0,32	0,39	0,45	0,49	0,52	0,53	0,42	0,47	0,57	0,42	0,46	0,44	0,81		0,78	
	8000Hz		0,45	0,28	0,41	0,48	0,36	0,57	0,46	0,48	0,66	0,64	0,68	0,46	0,79	0,78		
DPOAE-Hörschwellen-schätzung (dB HL)	1500Hz		0,49	0,20	0,47	0,36	0,34	0,54	0,35	0,34	0,61	0,94	0,93	0,81	0,80	0,46	0,72	
	2000Hz		0,54	0,26	0,52	0,38	0,40	0,59	0,48	0,40	0,67	0,90	0,94	0,92	0,85	0,48	0,69	
	3000Hz		0,46	0,31	0,56	0,36	0,48	0,63	0,49	0,44	0,66	0,79	0,93	0,93	0,94	0,67	0,73	
	4000Hz		0,51	0,36	0,51	0,40	0,46	0,61	0,54	0,47	0,71	0,77	0,80	0,86	0,97	0,90	0,86	
	6000Hz		0,35	0,35	0,49	0,50	0,49	0,56	0,50	0,45	0,67	0,54	0,59	0,58	0,90	0,92	0,94	
	8000Hz		0,43	0,34	0,43	0,49	0,43	0,57	0,41	0,49	0,66	0,67	0,68	0,47	0,82	0,89	0,96	
BERA-IPL (ms)	I-III		0,03	0,01	0,24	0,15	0,06	0,13	0,21	0,09	0,19	0,18	0,16	0,24	0,22	0,26	0,22	
	III-V		0,13	0,11	0,04	0,18	0,14	0,02	0,26	0,13	0,23	0,25	0,26	0,29	0,29	0,29	0,18	
	I-V		0,09	0,12	0,19	0,27	0,17	0,18	0,35	0,17	0,34	0,31	0,29	0,38	0,38	0,42	0,35	
SUN (richtig/15)			-0,27	-0,16	-0,36	-0,33	-0,26	-0,38	-0,39	-0,18	-0,49	-0,52	-0,45	-0,55	-0,55	-0,26	-0,27	
LIPP	links	rechts		-0,31	-0,15	-0,46	-0,27	-0,29	-0,42	-0,38	-0,22	-0,52	-0,44	-0,48	-0,47	-0,50	-0,23	-0,31
		rechts	DD (ms)	0,43	0,42	0,36	0,84	0,55	0,46	0,49	0,50	0,49	0,34	0,34	0,33	0,44	0,56	0,51
	dichotisch	links	PD (dB)	0,42	0,60	0,40	0,52	0,92	0,54	0,55	0,68	0,49	0,33	0,37	0,41	0,46	0,46	0,35
			FD (Hz)	0,45	0,39	0,65	0,35	0,58	0,91	0,38	0,45	0,63	0,43	0,50	0,54	0,58	0,48	0,49
			rechts	DD (ms)	0,39	0,19	0,04	0,91	0,48	0,30	0,48	0,31	0,21	0,12	0,22	0,14	0,18	0,23
		rechts	PD (dB)	0,52	0,70	0,47	0,56	0,91	0,49	0,43	0,68	0,50	0,21	0,23	0,23	0,30	0,53	0,31
			FD (Hz)	0,46	0,45	0,66	0,46	0,47	0,90	0,44	0,51	0,71	0,46	0,46	0,45	0,50	0,47	0,51

Korrelationen 3 (Legende s.o.)			DPOAE-Hörschwellschätzung (dB HL)						BERA-IPL (ms)			SUN (richtig/15)		LIPP dichotisch					
			1500Hz	2000Hz	3000Hz	4000Hz	6000Hz	8000Hz	I-III	III-V	I-V	links	rechts	links			rechts		
														DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)	DD (ms)	PD (dB)	FD (Hz)
Alter (a)			0,67	0,68	0,77	0,85	0,78	0,74	0,35	0,23	0,42	-0,52	-0,49	0,44	0,33	0,48	0,15	0,24	0,46
DIN-Gesamtscore			-0,40	-0,43	-0,50	-0,57	-0,62	-0,51	-0,22	-0,27	-0,34	0,23	0,24	-0,37	-0,37	-0,39	-0,12	-0,20	-0,37
PTA 500-4000Hz (dB HL)			0,82	0,85	0,88	0,85	0,70	0,65	0,27	0,37	0,50	-0,62	-0,63	0,41	0,35	0,54	0,30	0,23	0,54
PTA 500-8000Hz (dB HL)			0,83	0,87	0,89	0,90	0,79	0,72	0,25	0,35	0,46	-0,67	-0,62	0,45	0,37	0,60	0,27	0,26	0,59
PTA-Hörschwelle (dB HL)	250 Hz		0,45	0,49	0,47	0,42	0,41	0,33	0,18	0,38	0,39	-0,29	-0,42	0,22	0,19	0,33	0,21	0,16	0,41
	500Hz		0,61	0,63	0,63	0,59	0,34	0,31	0,15	0,31	0,34	-0,38	-0,47	0,27	0,26	0,37	0,23	0,11	0,35
	1000Hz		0,61	0,63	0,59	0,55	0,19	0,23	0,12	0,26	0,30	-0,41	-0,49	0,22	0,19	0,29	0,19	0,10	0,32
	2000Hz		0,85	0,86	0,85	0,78	0,51	0,57	0,22	0,24	0,36	-0,67	-0,62	0,35	0,30	0,54	0,23	0,14	0,55
	4000Hz		0,79	0,82	0,86	0,90	0,80	0,77	0,32	0,35	0,51	-0,68	-0,58	0,39	0,38	0,57	0,28	0,25	0,54
	6000Hz		0,77	0,80	0,82	0,84	0,72	0,66	0,23	0,33	0,43	-0,69	-0,59	0,39	0,33	0,54	0,18	0,27	0,56
	8000Hz		0,80	0,82	0,83	0,87	0,77	0,74	0,23	0,24	0,37	-0,67	-0,55	0,44	0,38	0,59	0,20	0,27	0,57
HHIE-S (Score)			0,64	0,64	0,67	0,70	0,70	0,69	0,15	0,32	0,36	-0,55	-0,53	0,40	0,35	0,47	0,22	0,30	0,46
OLSA (dB SNR)	1. Messung		0,75	0,77	0,79	0,82	0,62	0,61	0,17	0,21	0,31	-0,64	-0,63	0,37	0,39	0,57	0,15	0,35	0,59
	2. Messung		0,76	0,78	0,84	0,88	0,77	0,74	0,22	0,23	0,36	-0,63	-0,60	0,39	0,42	0,62	0,23	0,37	0,63
SUN (richtig/15)			-0,54	-0,55	-0,56	-0,57	-0,34	-0,35	-0,14	-0,17	-0,23	0,94	0,91	-0,35	-0,27	-0,39	-0,08	-0,21	-0,42
LIPP	binaural	DD (ms)	0,49	0,54	0,46	0,51	0,35	0,43	0,03	0,13	0,09	-0,27	-0,31	0,43	0,42	0,45	0,39	0,52	0,46
		PD (dB)	0,20	0,26	0,31	0,36	0,35	0,34	0,01	0,11	0,12	-0,16	-0,15	0,42	0,60	0,39	0,19	0,70	0,45
		FD (Hz)	0,47	0,52	0,56	0,51	0,49	0,43	0,24	0,04	0,19	-0,36	-0,46	0,36	0,40	0,65	0,04	0,47	0,66
	dichotisch	DD (ms)	0,36	0,38	0,36	0,40	0,50	0,49	0,15	0,18	0,27	-0,33	-0,27	0,84	0,52	0,35	0,91	0,56	0,46
		PD (dB)	0,34	0,40	0,48	0,46	0,49	0,43	0,06	0,14	0,17	-0,26	-0,29	0,55	0,92	0,58	0,48	0,91	0,47
		FD (Hz)	0,54	0,59	0,63	0,61	0,56	0,57	0,13	0,02	0,18	-0,38	-0,42	0,46	0,54	0,91	0,30	0,49	0,90
	interaural	DD (ms)	0,35	0,48	0,49	0,54	0,50	0,41	0,21	0,26	0,35	-0,39	-0,38	0,49	0,55	0,38	0,48	0,43	0,44
		PD (dB)	0,34	0,40	0,44	0,47	0,45	0,49	0,09	0,13	0,17	-0,18	-0,22	0,50	0,68	0,45	0,31	0,68	0,51
		FD (Hz)	0,61	0,67	0,66	0,71	0,67	0,66	0,19	0,23	0,34	-0,49	-0,52	0,49	0,49	0,63	0,21	0,50	0,71
DPOAE-Schwelle (dB SPL)	1500Hz		0,94	0,90	0,79	0,77	0,54	0,67	0,18	0,25	0,31	-0,52	-0,44	0,34	0,33	0,43	0,12	0,21	0,46
	2000Hz		0,93	0,94	0,93	0,80	0,59	0,68	0,16	0,26	0,29	-0,45	-0,48	0,34	0,37	0,50	0,22	0,23	0,46
	3000Hz		0,81	0,92	0,93	0,86	0,58	0,47	0,24	0,29	0,38	-0,55	-0,47	0,33	0,41	0,54	0,14	0,23	0,45
	4000Hz		0,80	0,85	0,94	0,97	0,90	0,82	0,22	0,29	0,38	-0,55	-0,50	0,44	0,46	0,58	0,18	0,30	0,50
	6000Hz		0,46	0,48	0,67	0,90	0,92	0,89	0,26	0,29	0,42	-0,26	-0,23	0,56	0,46	0,48	0,23	0,53	0,47
	8000Hz		0,72	0,69	0,73	0,86	0,94	0,96	0,22	0,18	0,35	-0,27	-0,31	0,51	0,35	0,49	0,25	0,31	0,51
DPOAE-Hör- schwellschätzung (dB HL)	1500Hz		0,97	0,89	0,80	0,60	0,74	0,22	0,22	0,32	-0,52	-0,46	0,35	0,35	0,48	0,16	0,23	0,47	
	2000Hz		0,97	0,96	0,86	0,64	0,69	0,17	0,31	0,34	-0,50	-0,49	0,37	0,40	0,53	0,20	0,26	0,50	
	3000Hz		0,89	0,96	0,94	0,81	0,72	0,21	0,30	0,38	-0,52	-0,50	0,41	0,47	0,63	0,20	0,31	0,51	
	4000Hz		0,80	0,86	0,94	0,95	0,90	0,27	0,27	0,39	-0,54	-0,47	0,47	0,47	0,56	0,20	0,28	0,51	
	6000Hz		0,60	0,64	0,81	0,95	0,96	0,26	0,34	0,46	-0,28	-0,32	0,57	0,42	0,52	0,22	0,51	0,47	
	8000Hz		0,74	0,69	0,72	0,90	0,96	0,24	0,17	0,35	-0,31	-0,29	0,52	0,45	0,50	0,25	0,38	0,49	
BERA-IPL (ms)	I-III		0,22	0,17	0,21	0,27	0,26	0,24	0,00	-0,01	0,70	-0,17	-0,10	0,18	0,11	0,12	0,07	0,02	0,19
	III-V		0,22	0,31	0,30	0,27	0,34	0,17	-0,01	0,67	0,00	0,00	0,13	0,08	-0,02	0,12	0,18	0,07	
	I-V		0,32	0,34	0,38	0,39	0,46	0,35	0,70	0,67	0,00	0,00	0,29	0,19	0,16	0,14	0,17	0,22	
SUN (richtig/15)	links		-0,52	-0,50	-0,52	-0,54	-0,28	-0,31	-0,17	-0,11	-0,21	0,72	0,72	-0,34	-0,27	-0,35	-0,12	-0,15	-0,39
	rechts		-0,46	-0,49	-0,50	-0,47	-0,32	-0,29	-0,10	-0,20	-0,21	0,72	0,72	-0,34	-0,24	-0,38	-0,07	-0,28	-0,39
LIPP	links	DD (ms)	0,35	0,37	0,41	0,47	0,57	0,52	0,18	0,13	0,29	-0,34	-0,34	0,49	0,38	0,47	0,48	0,46	
		PD (dB)	0,35	0,40	0,47	0,47	0,42	0,45	0,11	0,08	0,19	-0,27	-0,24	0,49	0,58	0,43	0,67	0,36	
		FD (Hz)	0,48	0,53	0,63	0,56	0,52	0,50	0,12	-0,02	0,16	-0,35	-0,38	0,38	0,58	0,19	0,44	0,69	
	rechts	DD (ms)	0,16	0,20	0,20	0,20	0,22	0,25	0,07	0,12	0,14	-0,12	-0,07	0,47	0,43	0,19	0,44	0,29	0,46
		PD (dB)	0,23	0,26	0,31	0,28	0,51	0,38	0,02	0,18	0,17	-0,15	-0,28	0,48	0,67	0,44	0,44	0,44	0,46
		FD (Hz)	0,47	0,50	0,51	0,51	0,47	0,49	0,19	0,07	0,22	-0,39	-0,39	0,46	0,36	0,69	0,29	0,46	0,46

7.3 Ergebnisse der binauralen LIPP-Präsentationsart

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum der Tondauerdiskriminationsschwellen in der Präsentationsart binaural für den Testmodus Tondauerdiskrimination (DD), Pegeldiskrimination (PD) und Frequenzdiskrimination (FD) beim Kontrollkollektiv, beim normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 NH_{mWHO}) sowie beim schwerhörigen Ü60-Subkollektiv (Ü60 SH). Als Schwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Einzelergebnisse von rechtem und linkem Ohr verwendet. n: Anzahl der validen Schwellen.

<u>Test-modus</u>	<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
DD (ms)	<i>Kontrollen</i>	30	43,0 ± 17,3	43,4	15,0	30,3	57,3	68,8
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	28	66,1 ± 24,1	66,5	25,0	51,9	77,9	137,5
	<i>Ü60 SH</i>	27	77,8 ± 35,8	73,5	15,5	55,9	89,0	161,0
PD (dB)	<i>Kontrollen</i>	30	2,4 ± 1,0	2,2	1,0	1,8	2,7	5,3
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	29	4,2 ± 2,1	3,6	1,3	2,3	5,6	8,4
	<i>Ü60 SH</i>	30	3,9 ± 2,6	3,3	0,8	2,2	4,6	12,7
FD (Hz)	<i>Kontrollen</i>	30	6,2 ± 3,0	5,0	2,5	4,0	7,0	14,0
	<i>Ü60 NH_{mWHO}</i>	30	15,0 ± 14,0	10,6	2,0	6,1	15,2	59,8
	<i>Ü60 SH</i>	26	13,0 ± 8,0	11,5	4,0	8,0	15,1	38,3

7.4 Tonaudiometrische Hörschwelle des subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektivs

Mittelwert (MW) mit Standardabweichung (SD), Median, Minimum, 0,25- und 0,75-Quantil sowie Maximum des Hörverlustes, nach Frequenz f (in Hertz (Hz)) aufgeteilt, beim subselektierten normalhörenden Ü60-Subkollektiv (Ü60 15dB_{1-4kHz}), das für die DPOAE-Schwellenauswertung ausnahmsweise gebildet wurde (Erläuterung siehe dort). Die Subkollektivgröße n betrug aufgrund der strengen Selektionskriterien nur 8 Personen. Als Hörschwelle eines individuellen Studienteilnehmers wurde jeweils der Mittelwert der Schwellen von rechtem und linkem Ohr verwendet. Alle Werte in dB HL.

<u>f (Hz)</u>	<u>Subkollektiv</u>	<u>n</u>	<u>MW ± SD</u>	<u>Median</u>	<u>Minimum</u>	<u>0,25-Quantil</u>	<u>0,75-Quantil</u>	<u>Maximum</u>
250	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	2,4 ± 4,8	4,3	-7,5	0,3	5,4	7,0
500	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	3,4 ± 4,7	4,3	-2,0	-1,6	7,0	9,5
1000	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	3,3 ± 3,3	2,8	-1,0	0,8	6,1	8,0
2000	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	5,8 ± 3,6	5,8	0,5	4,4	8,3	10,5
4000	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	4,9 ± 3,8	3,8	0,5	2,5	7,8	10,5
6000	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	17,6 ± 8,1	15,5	8,5	11,8	23,8	31,5
8000	<i>Ü60 15dB_{1-4kHz}</i>	8	27,6 ± 17,2	23,8	11,0	13,3	35,6	54,0

7.5 Standardisierte Testanweisungen

Folgende standardisierte Testanweisungen wurden bei allen Studienteilnehmern angewandt, um eine einheitliche Instruktion zu gewährleisten:

Tympanogramm

„Bei dieser Messung wird die Funktion des Mittelohres getestet. Ein Stöpsel, aus dem ein Summen ertönt, wird außen an Ihr Ohr gesteckt. Gleichzeitig wird ein Druck im Gehörgang aufgebaut; dies fühlt sich so ähnlich an, wie beim Starten eines Flugzeuges oder bei einer Passfahrt mit dem Auto. Sie selbst brauchen bei diesem Test nichts zu tun; Sie sollten lediglich nicht schlucken, während das Summen ertönt. Die einzelne Messung dauert wenige Sekunden.“

Reintonaudiometrie

„Bei der Hörschwellenbestimmung wird ermittelt, welche Tonlautstärke Sie bei unterschiedlichen Tonhöhen gerade noch hören können. Aus dem Kopfhörer ertönt jeweils ein Piepton. Sobald Sie diesen Ton hören, drücken Sie den Taster und halten diesen so lange gedrückt, bis der Ton verschwunden ist; Sie drücken den Ton gewissermaßen weg (*evtl. zusätzlich noch*: Dies ist ein wenig anders als beim Messverfahren in vielen Kliniken und Praxen, bei dem Sie die Wahrnehmung eines Tones lediglich durch einen *kurzen* Tastendruck bestätigen müssen). Nach einer kurzen Zeit hören Sie denselben Ton wieder; sobald Sie diesen wahrnehmen, drücken Sie wiederum den Taster und halten diesen bis zum Verschwinden des Tones gedrückt. Auf diese Weise wird hintereinander für die verschiedenen Tonhöhen die Hörschwelle ermittelt. Wichtig ist bei diesem Test folgendes: Es wird kein durchgehendes Summen vorgespielt, sondern jeweils ein gepulster Ton („Piep, piep, piep...“). Sie brauchen nicht im Rhythmus dieses Piepens zu drücken, sondern drücken und halten den Taster, solange Sie das Piepen hören. Dieses erleichtert lediglich die Wahrnehmung, ob Sie tatsächlich noch etwas hören.“

HHIE-S

„Hierbei handelt es sich um einen kurzen Fragebogen, der Ihr Hörerleben einschätzt. Oben auf dem Bildschirm erscheint jeweils eine Frage, unten eine Auswahl von drei Antworten: „Oft“, „Manchmal“ oder „Nie“. Bitte wählen Sie spontan die Antwortmöglichkeit, die Ihnen für Sie persönlich am zutreffendsten erscheint. Es geht immer um Ihr eigenes Hörerleben, nicht um das Ihres Ehemannes oder Ihrer Kinder.“

OLSA

„Bei diesem Test wird Ihr Sprachverständnis überprüft. Aus den beiden Lautsprechern an der Kabinenwand ertönt jeweils ein Rauschen, ähnlich einem schlecht eingestellten Radio. Gleichzeitig werden Sätze vorgelesen. Diese Sätze bestehen immer aus fünf Wörtern: Name, Tunwort, Zahlwort, Eigenschaftswort und Objekt, z. B.: Thomas kauft sieben schöne Schuhe. Jeder Satz ist nach diesem Schema aufgebaut, kein einziger weicht davon ab. Es ist hilfreich, diese Information im Hinterkopf zu behalten, wenn ein Satz schwer zu verstehen ist.“

Ich spiele jeweils einen Satz ab. Ihre Aufgabe besteht darin, genau hinzuhören und so viele von den fünf Wörtern zu verstehen, wie es Ihnen möglich ist. Sie wiederholen dann die verstandenen Wörter und ich gebe das Ergebnis in den Computer ein.

Wenn Sie ein Wort nicht genau verstanden haben (z. B. ob „Dose“, „Rose“ oder „Hose“ genannt wurde), dürfen Sie auch raten und ein Wort nennen, das am ehesten Ihrem Höreindruck entspricht.

Anzumerken ist bei diesem Test folgendes:

Erstens: Die Sätze werden vom Computer erzeugt, d. h. sie sind vom Satzbau her richtig, ergeben aber nicht unbedingt viel Sinn.

Zweitens: Es ist ganz normal, dass Sie bei einigen Sätzen gar nichts oder öfters auch nur ein oder zwei Wörter verstehen. Lassen Sie sich davon nicht verunsichern, dies verhält sich auch bei einem völlig gesunden Probanden so.“

SUN-Test

„Dieser Test überprüft wiederum Ihr Sprachverständnis. Wie beim vorherigen Oldenburger Satztest ertönt jeweils ein Rauschen, in dem eine Silbe vorgelesen wird, z. B. aNa, aTa oder aFa. Die Silben unterscheiden sich also im mittleren Buchstaben. Auf dem Bildschirm erscheint gleichzeitig eine Dreifachauswahl an möglichen Silben, von denen eine tatsächlich vorgelesen wird. Bitte wählen Sie diese durch Antippen aus. Sollten Sie die vorgelesene Silbe nicht oder nicht genau verstanden haben, so lesen Sie sich die drei angezeigten Silben durch und wählen diejenige aus, die am ehesten Ihrem Höreindruck entspricht.“

LIPP-Testbatterie

„Bei diesem Test wird ermittelt, welche Tonunterschiede Sie gerade noch wahrnehmen können. Sie hören jeweils drei Töne: zwei gleiche und einen von den anderen abweichenden. Der sich unterscheidende Ton weicht entweder in der Frequenz, also der Tonhöhe, oder in der Tondauer oder in der Lautstärke von den beiden anderen ab (*gleichzeitig Zeigen der variablen Parameter am Bildschirm bzw. Ausdruck*). Sie wählen jeweils vorher, in welcher Hinsicht sich der Ton unterscheidet, damit Sie wissen, worauf Sie hören sollen. Dazu gibt es den Bedienbildschirm (*Einweisung in die Testauswahl je nach Bedarf des Probanden*).

Um den eigentlichen Test durchzuführen, gibt es den Testbildschirm (*Einweisung in die Teststeuerung je nach Bedarf des Probanden, immer jedoch mit den folgenden Elementen*). Oben sehen Sie einen Pfeil. Durch Tippen auf diesen können Sie die drei Töne vorspielen (*Demonstration des Abspielens*). Unten auf dem Bildschirm sehen Sie drei Spielkarten. Die erste Karte entspricht dem ersten Ton, die zweite dem zweiten, die dritte dem dritten; die jeweils entsprechende Karte wird während des Vorspielens gelb hinterlegt. Ihre Aufgabe besteht darin, Memory zu spielen, also das Spiel, bei dem immer ein Kartenpaar mit demselben Motiv aufgedeckt werden soll. Wenn Sie dementsprechend hören, dass sich der zweite Ton anders als die beiden anderen angehört hat, so wählen Sie die erste und die dritte Karte (*Erweiterung dieser Erklärung je nach Verständnis des Probanden*). Sie wählen also nicht die dem abweichenden Ton entsprechende Karte! Es ist aber tendenziell leichter, darauf zu hören, welcher Ton sich unterschieden hat, und im Umkehrschluss die zwei gleichen Töne bzw. Karten herauszufinden.

Sollten Sie beim ersten Vorspielen noch nicht gehört haben, welche beiden Töne gleich klingen bzw. welcher Ton sich unterschieden hat, so können Sie sich dieselbe Tonfolge nochmals mit dem Pfeil vorspielen lassen. Bitte spielen Sie sich dieselbe Tonfolge maximal drei- bis viermal vor; wenn Sie bis dahin noch keinen Tonunterschied wahrnehmen konnten, so müssen Sie raten und nach Gefühl Karten wählen.“

DPOAE

„Hierbei handelt es sich um ein vollautomatisches Verfahren zur Ermittlung der Hörschwelle. Sie hören verschiedene Tonkombinationen aus der Ohrsonde, ein hochempfindliches Mikrophon zeichnet gewissermaßen die Antwort Ihres Gehöres darauf auf. Sie selbst brauchen nichts zu tun; Sie müssen nicht zuhören und können gerne ein bisschen dösen. Wichtig ist lediglich, dass Sie den Kopf ruhig halten, damit die Messung nicht durch Störgeräusche behindert wird. Die Messung dauert etwa acht bis zehn Minuten und wird für beide Ohren gleichzeitig durchgeführt.“

BERA

„Dieses Messverfahren testet vollautomatisch die Funktion des Hörnervs. Während ein Rattergeräusch über den Lautsprecher ausgegeben wird, werden die Hirnströme über die Elektroden abgeleitet. Sie selbst brauchen während der Messung wiederum nichts zu tun; Sie müssen nicht zuhören. Die Messung gelingt im Gegenteil sogar tendenziell besser, wenn Sie es schaffen, ein wenig zu dösen. Sehr wichtig ist allerdings, dass Sie den Kopf- und insbesondere den Nackenbereich völlig entspannt halten. Dazu ist es zweckmäßig, den Kopf am Stuhl anzulehnen. Die Messung wird für jedes Ohr einzeln durchgeführt und dauert etwa zehn Minuten pro Ohr. Beim Wechseln der Messseite haben Sie Gelegenheit, sich nochmals bequem hinzusetzen.“

7.6 Fragebogen für Hörtests nach DIN EN ISO 389-9:2009-12

DIN EN ISO 389-9:2009-12
EN ISO 389-9:2009

Anhang A (normativ)

Fragebogen für Hörtests

1.	Name	Geburtsdatum	Geschlecht
2.	Hatten Sie schon einmal Probleme mit Ihrem Gehör (z. B. Infektionen, Ohrgeräusche, laufende Ohren usw.)?		
	ja	nein	Wenn ja, bitte im Einzelnen angeben:
3.	Hatten Sie schon einmal eine Ohr-Operation?		
	ja	nein	Wenn ja, bitte im Einzelnen angeben:
4.	Haben Sie schon einmal Medikamente, Tabletten eingenommen oder eine Injektion erhalten, die Ihr Hören beeinflusst hat?		
	ja	nein	
5.	Haben Sie schon einmal für längere Zeit in geräuschvoller Umgebung (d. h. wo man sich schwer verständigen konnte) gearbeitet?		
	ja	nein	Wenn ja, bitte im Einzelnen angeben:
6.	Haben Sie zu dieser Zeit irgendeinen Gehörschutz getragen?		
	ja	nein	
7.	Haben Sie Pop-/Rock-Konzerte oder Diskotheken besucht?		
	nie	ein Mal pro Jahr	häufiger als ein Mal pro Jahr
8.	Spielen Sie ein Musikinstrument?		
	ja	nein	Wenn ja, bitte angeben:
9.	Hören Sie mit tragbaren Wiedergabegeräten?		
	nie	weniger als 2 h pro Woche	mehr als 2 h pro Woche
10.	Waren Sie lautem Schall, z. B. von Motorrädern, Kettensägen, Gewehren, Feuerwerkskörpern oder Explosionen, ausgesetzt?		
	ja	nein	Wenn ja, bitten angeben welcher Art und wie oft:
11.	Hat/Hatte jemand in Ihrer unmittelbaren Verwandtschaft eine Hörstörung?		
	ja	nein	Wenn ja, bitte angeben:
12.	Haben Sie schon einmal an einem Hörtest teilgenommen?		
	ja	nein	Wenn ja, wann und wo:
Ich bin mit der Speicherung meiner Daten und ihrer Verwendung in Verbindung mit den Hörschwellenmessungen einverstanden.			
Datum:		Unterschrift:	

11

NormCD - Stand 2012-08

Quelle: DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2009, Anhang A; mit freundlicher Genehmigung des Beuth-Verlags (s.u. 7.8)

7.7 Einzelfragen des HHIE-S

Frage	Antwortmöglichkeiten		
Sind Ihnen Hörprobleme peinlich, wenn Sie fremde Menschen treffen?	Oft	Manchmal	Nie
Sind Sie frustriert, wenn Sie sich mit Ihren Angehörigen unterhalten und diese wegen Hörproblemen nicht richtig verstehen?			
Haben Sie Schwierigkeiten, etwas zu verstehen, wenn geflüstert wird?			
Fühlen Sie sich durch Hörprobleme behindert?			
Haben Sie Hörprobleme, wenn Sie mit Freunden, Verwandten oder Nachbarn zusammen sind?			
Gehen Sie wegen Hörproblemen seltener zur Kirche oder zu anderen Veranstaltungen, als Sie möchten?			
Haben Sie wegen Hörproblemen Streit mit Familienangehörigen?			
Haben Sie wegen Hörproblemen Schwierigkeiten, Sendungen im Fernsehen oder Radio zu verstehen?			
Haben Sie das Gefühl, dass Hörprobleme Ihr soziales Leben einschränken oder behindern?			
Haben Sie wegen Hörproblemen manchmal Schwierigkeiten, wenn Sie mit Freunden oder Verwandten im Restaurant essen?			

7.8 Anmerkung zur Wiedergabe der DIN-Normen

Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V.

Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

8 Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die zum Gelingen dieser Dissertation beigetragen haben.

Ich bedanke mich sehr herzlich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. Dr. Thomas Janssen für die Bereitstellung des interessanten Themas, die Heranführung an das wissenschaftliche Arbeiten, die stetige Unterstützung über die lange Entstehungsphase dieser Dissertation und die stets ermutigenden und wertvollen Gespräche sowie fachlichen Ratschläge.

Besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Dipl.-Ing. Volker Schirkonyer, der mich nicht nur bei der Erarbeitung der Grafiken und statistischen Auswertung, sondern auch bei der Erstellung des Studienkonzeptes, bei praktischen Fragen und Problemen und bei technischen Aspekten hervorragend unterstützt hat. Für die vielen Stunden, die er für das Gelingen dieser Arbeit investiert hat, und die immer sehr angenehme Zusammenarbeit möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Bedanken möchte ich mich zudem bei all den Mitarbeitern der Hals-Nasen-Ohrenklinik, die mich bei der praktischen Durchführung der Hörstudie unterstützt haben: Bei Herrn Prof. Dr. Hans-Peter Niedermeyer für die Hilfe bei der Rekrutierung der Patienten und bei medizinischen Problemstellungen, bei Frau Dr. Claudia Teschke und Herrn Dr. Adam Chaker für die Unterstützung bei der Patientenrekrutierung, bei Herrn PD Dr.-Ing. Frank Böhnke für die Hilfe bei technischen Recherchen und beim Team des Hörzentrums.

Herrn Dr. Bernhard Haller vom Institut für Medizinische Informatik, Statistik und Epidemiologie gilt mein Dank für die mehrfachen statistischen Beratungen.

Meiner ganzen Familie, der ich diese Arbeit widme, gebührt mein außerordentlicher Dank für die stete Unterstützung und Ermutigung gerade in schwierigen Phasen der Dissertation und in allen weiteren Lebenslagen, in denen ich mich immer auf sie verlassen kann. Dies gilt explizit auch für meinen Hund Jester, der mir über fast 13 Jahre ein treuer und unersetzlicher Begleiter war.

Auch bei meinem Freundeskreis, der mir immer mit Rat und Tat zur Seite steht und in großen Teilen auch selbst an der Studie teilgenommen hat, möchte ich mich sehr herzlich bedanken.

Bedanken möchte ich mich zudem bei der Firma Path Medical in Germering, die das Sentiero Advanced-Handgerät freundlicherweise zur Verfügung gestellt hat.

Nicht zuletzt danke ich allen Studienteilnehmern für die tatkräftige Mitarbeit bei den Messungen.