

Über die Reinton-Hörschwelle bei Schulkindern

Inauguraldissertation
zur Erlangung des Grades eines Doktors der Humanbiologie
des Fachbereichs Medizin
der Justus-Liebig-Universität Gießen

vorgelegt von Reinhard Müller
aus Schwäbisch Hall

Gießen 2011

Aus dem Medizinischen Zentrum für Ökologie
Institut und Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin des Fachbereichs
Medizin der Justus-Liebig-Universität Gießen
Kommissarischer Leiter: Professor Dr. med. Joachim Schneider

Betreuer: Prof. Dr. G. Fleischer und Prof. Dr. J. Schneider

1. Gutachter: Prof. Dr. med. Joachim Schneider
2. Gutachter: Prof. Dr. med. dent. Caroline Ganß

Tag der Disputation: 14. 07. 2011

Meiner lieben Frau Petra
und meinen beiden Kindern
Laura-Marie und Daniel

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	v
Abbildungen	vii
Tabellen	ix
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage	1
1.2 Gefahren für das kindliche Gehör	2
1.3 Fragestellung	4
2 Material und Methoden	7
2.1 Untersuchungskollektive	7
2.1.1 Kinder in China	7
2.1.2 Kinder in Deutschland	10
2.2 Fragebogen für deutsche Grundschüler	12
2.3 Ohrinspektion (Gehörgang und Trommelfell)	14
2.4 Tympanometrie (Mittelohr-Funktionsprüfung)	15
2.5 Audiometrie (Hörschwellenbestimmung)	19
2.6 Auswertung	22
2.7 Alterskorrektur	24
3 Ergebnisse	27
3.1 Ergebnisse der Tympanometrie	27
3.1.1 Compliance, Gradient und Druck	27
3.1.2 Vergleich der Ohrkanalvolumina	30
3.1.3 Ohrkanalvolumina mit unterschiedlichen Stöpseln	36
3.2 Ergebnisse der Voraudiometrie	39
3.2.1 Voraudiometrie bei chinesischen Kindern	39

3.2.2	Vorausdiometrie bei deutschen Kindern	40
3.2.3	Zusammenfassung der Vorausdiometrie	41
3.3	Ergebnisse der Audiometrie	43
3.3.1	Feldstudie in China	43
3.3.2	Querschnitt-Studie in Deutschland	46
3.3.3	Geschlechtsunterschiede	50
3.3.4	Längsschnitt-Studie in Deutschland	55
3.3.5	Alterskorrektur	58
4	Diskussion	65
4.1	Tympanometrie bei Erwachsenen und Kindern	65
4.1.1	Ohrkanalvolumina von Erwachsenen	65
4.1.2	Tympanometrie-Vergleich von Kindern	69
4.2	Hörschwellenbestimmungen durch Audiometrie	73
4.2.1	Audiometrie bei Frequenzen von 125 Hz bis 8 kHz	73
4.2.2	Audiometrie im erweiterten Hochtonbereich	81
4.3	Hörentwicklung	85
4.3.1	Verschiebung der Hörschwelle im Frequenzbereich	87
4.3.2	Der Einfluss des Mastoidsystems auf die Hörschwelle	93
4.3.3	Ausreifung von Hörbahn und Cortex	96
5	Zusammenfassung	103
6	Summary	105
	Literatur	107
A	Danksagung	121
B	Eidesstattliche Erklärung	123

Abbildungsverzeichnis

2.1	Audiometrie in China und Otoskopie in Deutschland	7
2.2	Übersicht der deutschen Schüler	10
2.3	Video-Otoskop und Trommelfellaufnahme	14
2.4	Tympanometer: GSI 38 und MI 26	16
2.5	Tympanometrie-Stöpsel	17
2.6	Normale Tympanogramme vom GSI 38 und MI 26	18
2.7	Audiometer CA 540 und MA 53	19
2.8	Audiometrie-Protokoll	22
2.9	Alterskorrektur der Audiogramme	24
2.10	Alterskorrigierte Gruppenkurven	25
3.1	Ergebnisse der Peak Compliance bei Kindern	28
3.2	Ergebnisse des Gradienten bei Kindern	29
3.3	Ohrkanalvolumen im Alters-Vergleich	32
3.4	Ohrkanalvolumen im Geschlechts-Vergleich	34
3.5	Ohrkanalvolumen im Vergleich rechts/links	35
3.6	Stöpselvergleich der Ohrkanalvolumina	37
3.7	Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie in China	39
3.8	Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie in Deutschland	40
3.9	Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie in CN und D	42
3.10	Gemittelte Audiogramme in China, linkes Ohr	44
3.11	Gemittelte Audiogramme in China, rechtes Ohr	45
3.12	Gemittelte Audiogramme in Deutschland, linkes Ohr	48
3.13	Gemittelte Audiogramme in Deutschland, rechtes Ohr	49
3.14	Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Gruppe D1	52
3.15	Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Gruppe D2	53
3.16	Audiogramm-Vergleich im Längsschnitt, linkes Ohr	56

3.17	Audiogramm-Vergleich im Längsschnitt, rechtes Ohr	57
3.18	Alterslinien zur Korrektur der Audiogramme	59
3.19	Alterskorrektur eines Audiogramms (falsch positiv)	60
3.20	Alterskorrektur eines Audiogramms (richtig positiv)	60
4.1	Terzverschiebung der ISO 389-7 Diffusfeld-Hörschwelle	90
4.2	Terzdifferenzen der ISO 389-7 und Hörschwelle von Kindern	91

Tabellenverzeichnis

2.1	Chinesische Kinder, getestet	8
2.2	Chinesische Kinder, ausgewertet	8
2.3	Ausschluss von deutschen Kindern	11
2.4	Fragebogen – Personendaten	12
2.5	Fragebogen – Gesundheit	12
2.6	Fragebogen – Knalltrauma	13
2.7	Fragebogen – Musik	13
2.8	Fragebogen – Hobbies etc.	13
2.9	Zustand: Gehörgang und Trommelfell	15
2.10	Spezifikation der Tympanometer	17
2.11	ISO 389 und HDA 200	20
3.1	Ergebnisse: Compliance, Gradient und Druck	28
3.2	Ergebnisse der Ohrkanalvolumina bei Kindern und Erwachsenen	31
3.3	Stöpselvergleich der Ohrkanalvolumina	36
3.4	Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie in Deutschland	41
3.5	Audiometrie-Ergebnisse in China, linkes Ohr	44
3.6	Audiometrie-Ergebnisse in China, rechtes Ohr	45
3.7	Audiometrie-Ergebnisse in Deutschland, linkes Ohr	48
3.8	Audiometrie-Ergebnisse in Deutschland, rechtes Ohr	49
3.9	Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Altersgruppe D1	50
3.10	Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Altersgruppe D2	51
3.11	Ergebnisse der Längsschnitt-Studie, linkes Ohr	56
3.12	Ergebnisse der Längsschnitt-Studie, rechtes Ohr	57
3.13	Alterskorrekturwerte, linear ermittelt	58
3.14	Matrix zu Sensitivität und Spezifität	62
3.15	Anwendung des 20-dB-Schadenskriteriums auf Testdaten	62

3.16	Anwendung des 20-dB-Kriteriums auf alterskorrigierte Daten	63
4.1	Ohrkanalvolumina von Erwachsenen in der Literatur	67
4.2	Tympanometrie von Kindern in der Literatur	70
4.3	Hörschwellen bei Frequenzen von 125 Hz bis 8 kHz	74
4.4	Differenz der Hörschwellen von Kindern von 125 Hz bis 8 kHz	75
4.5	Hörschwellen von Kindern im erweiterten Hochtonbereich	82
4.6	Differenz der Hörschwellen von Kindern im erweiterten Hochtonbereich	83

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage

In deutschen Medien wird häufig eine düstere Zukunft vorhergesagt, was die spätere Hörfähigkeit der heutigen Kinder und Jugendlichen angeht. Die Aussagen basieren meist auf herausstechenden Einzelfällen und teils auch auf persönlichen Vorurteilen der Schreiber. Aber ist es zulässig, eine zukünftige Hörfähigkeit für Erwachsene aufgrund einer beobachteten schlechten Hörfähigkeit von Kindern vorauszusagen? Die normale Hörfähigkeit, wie sie in der ISO 7029 definiert ist, bezieht sich auf Personen im Alter von 18 Jahren. Während Alterungsprozesse des Gehörs mit Hilfe von Formeln berechnet und vorhergesagt werden können, werden über die Hörfähigkeit von Kindern keine Aussagen getroffen.

In der wissenschaftlichen Literatur finden sich Studien zur Hörfähigkeit von Kindern und Jugendlichen, z. B. von Axelsson et al. (1987) und Niskar et al. (2001), mit dem Ergebnis, dass wachsende Teile der Bevölkerung von schallverursachten Hörschäden betroffen sind. Eigene Höruntersuchungen auf internationalen Musikmessen in Frankfurt a. Main und in Ried (Österreich), auf welchen auch Kinder getestet wurden, schienen diese pessimistischen Prognosen zu bestätigen. In vielen Einzelfällen fanden wir bei Kindern deutlich schlechteres Hörvermögen als für Erwachsene üblich ist. Waren das Vorzeichen für eine zukünftige Gesellschaft von Schwerhörigen?

2001 führten wir Höruntersuchungen in China durch, um die Hörfähigkeit von Menschen in ländlichen Gegenden festzustellen, die fernab des industriellen Zivilisationslärms leben. Die Untersuchungen betrafen alle Altersgruppen in drei un-

terschiedlichen Regionen Chinas, davon eine Millionenstadt zum Vergleich. Dabei wurden bereits an Kindern teilweise schwerste Hörschäden durch die unsachgemäße Handhabung von Explosionskörpern in Ohrnähe gefunden, sowohl in der Großstadt als auch auf dem Lande. In den ländlichen Gebieten spielte der Gebrauch von Wiedergabegeräten für laute Musik so gut wie gar keine Rolle. Ganz im Gegensatz zur Großstadt, wo die Räder nie still stehen und an jeder Straßenecke kreischende Musikdarbietungen für eine bizarre Lärmkulisse sorgen. Überraschenderweise kann der lärmbelasteten Stadtbevölkerung eine bessere Hörfähigkeit bescheinigt werden als den Menschen vom Lande, die in weitgehender Stille leben.

1.2 Gefahren für das kindliche Gehör

Fragt man Studenten, welche Berufsgruppen von Lärmschwerhörigkeit bedroht sind, werden regelmäßig auch „KindergärtnerInnen“ und „LehrerInnen“ als Kandidaten für diese Berufskrankheit benannt. Das rührt natürlich zunächst einmal daher, dass die Studenten sich noch gut an die Situation in den Schulen erinnern können. In den vergangenen Jahren haben sich vermehrt Vertreter dieser Berufsgruppen über die Medien an die Öffentlichkeit gewandt, um auf die Hörgefährdung der Berufstätigen in Bildungseinrichtungen aufmerksam zu machen. Nach der Absenkung der zulässigen Lärmpegel am Arbeitsplatz um 5 dB(A) durch die neue EU Richtlinie 2003/10/EG, die 2007 als „LärmVibrationsArbSchV“ in deutsches Recht umgesetzt wurde, sind deutlich mehr Menschen von gehörgefährdendem Arbeitslärm betroffen als vor Inkrafttreten der Verordnung. Daher rücken weitere Arbeitsfelder wie die Schulen und Kindergärten in den Fokus der Lärmbekämpfer und Hörforscher. Natürlich betrifft das auch die Kinder, die in diesen Einrichtungen weilen, die durch überzogene Lautäußerungen selbst zu den Belastungen beitragen und ebenso darunter zu leiden haben.

Fidorra (2001) hat Untersuchungen zur Lärmbelastung für ErzieherInnen und Kinder in einer Grundschule und in einem Kindergarten mit einem Schalldosimeter durchgeführt. Sie erfasste zwei unterschiedliche Schalldosiswerte, zum einen durch raumbezogene und zum anderen durch personenbezogene Messungen. Die personenbezogenen Pegel waren mehrheitlich über 80 dB(A) bei Messzeiten von 3 Std. im Kindergarten und 3,5 Std. in der Grundschule. Die Umrechnung auf eine 8 stündige Arbeitsschicht ergibt immer noch Werte, die den unteren Auslösewert von

$L_{EX,8h} = 80$ dB(A) erreichen bzw. übersteigen. Nach der „LärmVibrationsArbSchV“ müsste der Arbeitgeber bei derartigen Bedingungen bereits Maßnahmen zur Minderung der Schallbelastung einleiten. Zum Lärmarbeitsplatz werden die Unterrichtsräume der Schulen jedoch nicht werden, da die Schallbelastungen unter dem oberen Auslösewert von $L_{EX,8h} = 85$ dB(A) bleiben. Da die raumbezogenen Messungen um bis zu 20 dB(A) kleinere Schalldosiswerte als die personenbezogenen Messungen ergaben, betreffen die Belastungen im Wesentlichen nur die Lehrpersonen und nicht die Kinder. Die ermittelte hohe Schallbelastung wird von der lauten Stimme der Lehrperson dominiert, die sich gegen den Geräuschpegel der Schüler durchsetzen muss und bei der personenbezogenen Messung dem Messmikrofon am nächsten ist. Im Kindergarten wurden keine vergleichbaren raumbezogenen Messungen durchgeführt, die Situation dürfte aber ähnlich sein. Eine Gefährdung durch den Normalbetrieb der Kinder in Schulen und Kindergärten kann so mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden.

Häufig liegt die Ursache für hohe Geräuschpegel in Unterrichtsräumen an schlechten raumakustischen Bedingungen. Schallharte Wände führen zu verlängerten Nachhallzeiten und haben eine verminderte Sprachverständlichkeit zur Folge, was zu einem Aufschaukeln der Lautstärke führen kann.

Weit größere Gefahren für das kindliche Gehör lauern im Gebrauch von lautem Spielzeug, wie Spielzeugpistolen und Plastiktröten, die in unmittelbarer Ohrnähe zum Einsatz kommen. Die Spielzeugpistolen können in weniger als einer Millisekunde unheilbare Hörschäden auf Haarzellebene erzeugen, die häufig auch noch störenden Tinnitus zur Folge haben, der das ganze weitere Leben beeinträchtigen kann. Fleischer et al. (1998) haben durch akustische Messungen mit einem Kunskopf-Messsystem Spielzeugpistolen als besonders schädlich charakterisiert und dies in Fleischer et al. (1999) anhand von Beispielen betroffener Kinder nachdrücklich belegt. Mit einer Plastiktröte kann man in ein Kinderohr in einer Sekunde die Schalldosis von mehr als einem Jahr Arbeitslärm von 85 dB(A) hineinblasen, was ziemlich sicher zu bleibenden Hörschäden führt.

Völlig weltfremd mutet daher eine Messvorschrift an, die die maximal erlaubten Grenzwerte für Spielzeugpistolen in einem Abstand von 50 cm ermittelt. Die Armlänge der Kinder ist meist deutlich geringer als 50 cm, was selbst bei gestrecktem Arm allein schon zu höheren Belastungen führt, als für Schallimpulse am Arbeitsplatz maximal zulässig ist.

Die Spuren dieser extremen Überlastungen des Gehörs werden oft erst viel später im Audiogramm gefunden und können dann nicht mehr den konkreten Ursachen zugeordnet werden.

Hier können nur Aufklärung und wenn nötig konsequente Verbote für gehörgefährdendes Spielzeug dafür sorgen, dass sich das Gehör im Kindesalter normal entwickeln kann und ohne Schädigung ein ganzes Leben lang ohne Probleme funktioniert.

1.3 Fragestellung

Für die Auswertung und den Vergleich von ganzen Gruppen, die gemeinsame Merkmale aufweisen wie Schallbelastung durch den Beruf oder die Ausübung spezieller Hobbies, wurde von Fleischer und Müller (2007) eine Prozedur entwickelt, die den Alterungseffekt eliminiert, der den Vergleich sonst so erschwert. Da die ISO 7029 über die Hörfähigkeit über 8 kHz hinaus keine Aussagen macht, mussten eigene Alterslinien auch für diesen Bereich ermittelt werden, was auf der Basis einer gesiebten Gruppe von etwa 4400 Testpersonen erfolgte. Unter Verwendung dieser Alterslinien von 125 Hz bis 16 kHz können ganze Personengruppen mittels sogenannter 'auditory group curves' altersunabhängig verglichen werden, um den Einfluss bestimmter Belastungsarten auf die Hörfähigkeit zu bestimmen.

Etwas unbefriedigend ist die Tatsache, dass Kinder und Jugendliche bei diesen Vergleichen nicht richtig einbezogen werden können, weil es keine normativen Daten für sie gibt. Die Hörfähigkeit von Kindern wird gewöhnlich an der Hörschwelle für junge Erwachsene im Alter von 18 Jahren gemessen, ohne Berücksichtigung der Tatsache, dass sich das Hörvermögen noch in der Entwicklung befindet und nicht völlig ausgereift ist. Um diese Lücke zu schließen, insbesondere auch für den erweiterten Hochtongbereich, sollten neben der Auswertung der chinesischen Kinder noch weitere Daten zur Hörfähigkeit von Kindern im Grundschulalter erhoben werden.

Im November 2003 untersuchten wir 260 Schüler einer Grundschule in Giessen bezüglich ihrer Hörfähigkeit. Ein erster Überblick über die Test-Ergebnisse zeigte einen auffälligen Trend zu besserem Hörvermögen der älteren Schülern. Unter der Prämisse, dass Hörschäden unheilbar sind und die älteren Schüler bereits mehr Gelegenheiten für den Erwerb solcher Schäden hatten, war dieses Ergebnis in seiner Deutlichkeit doch etwas überraschend.

Um diesen bemerkenswerten Befund zu überprüfen, wurde beschlossen, die Erst-

klässler der Studie in ihrem letzten Schuljahr an dieser Schule, in der 4. Klasse, noch einmal zu testen. Im Februar 2007 fand dieser 2. Test mit 35 Teilnehmern der damaligen Erstklässler statt. Leider hatten einige der Schüler die Schule gewechselt, manche Eltern die Genehmigung zur Teilnahme ihrer Kinder verweigert und weitere waren schon beim ersten Test ausgesiebt worden. Die vorliegende Arbeit zeigt die Ergebnisse und den Vergleich dieser beiden Feldstudien und von Kindern, die während der Expedition in China untersucht worden waren.

Eine altersangepasste Referenz-Hörschwelle bzw. eine Alterskorrektur für Kinder kann dazu beitragen, die Hörfähigkeit von Kindern realistischer beurteilen zu können. Echte Hörprobleme lassen sich dann leichter erkennen und bei der Ursachenforschung Fortschritte erzielen. Die vorliegende Arbeit soll einen Beitrag dazu leisten.

Kapitel 2

Material und Methoden

2.1 Untersuchungskollektive

2.1.1 Kinder in China

Im Mai/Juni 2001 wurden während einer Expedition in China mehr als 1000 Hörtests an drei unterschiedlichen Orten durchgeführt: Bewohner einer Provinzhauptstadt (Xian) mit etwa 4 Mill. Einwohnern allein im Innenstadtbereich (laut Wikipedia), ländliche Bevölkerung in Bergdörfern Zentral-Chinas (Qinling Mountains) und Nomaden im tibetischen Hochland (Qinghai Province). Dabei wurden auch 270 Kinder und Jugendliche im Schulkindalter erfasst und getestet. In den beiden Bergdörfern wurden soweit möglich alle Bewohner und damit auch alle Kinder ab 6 Jahren, die anwesend waren, untersucht.



Abbildung 2.1: Links – Audiometrie in China, rechts – Otoskopie in Deutschland

Es gab keine Ausschlußkriterien für die Erfassung. In der Qinghai Province wurden Nomaden aus der Umgebung von Dao Tang Ho eingeladen, zu den Messungen

in die Stadt zu kommen. Die Zahl der Untersuchten lässt auf eine gut Akzeptanz der Einladung schließen. An einem Tag wurden die Hörtests in einem Nomadendorf in Zelten durchgeführt. Eine besondere Gruppe stellen die Mönche eines tibetisch-buddhistischen Klosters in „Yuan Zhe Si“ dar, die geschlossen an den Hörtests an zwei Tagen teilnahmen. In der Großstadt Xian wurden die Kinder aus umgebenden Schulen des Civil Aviation Hospitals im Süden von Xian in einem Umkreis von etwa 1 km beworben. Über Rundfunk und eine Pressemitteilung war die Bevölkerung vorab informiert und zur Teilnahme aufgefordert worden. Es ist davon auszugehen, dass mehr Kinder der gebildeten Mittelschicht teilnahmen, als Kinder aus dem Prekariat.

Tabelle 2.1: Getestete chinesische Kinder N (♀/♂)

Ort u./Gruppe ⇒	C1	C2	C3	Summe
CN1	25 (7/18)	42 (26/16)	26 (12/14)	93 (45/48)
CN2	13 (5/8)	32 (6/26)	57 (17/40)	102 (28/74)
CN3	26 (12/14)	22 (9/13)	12 (7/5)	60 (28/32)
Summe	64 (24/40)	96 (41/55)	95 (36/59)	255 (101/154)

Zur audiometrischen Auswertung zogen wir 91 otologisch normale Kinder heran, die in drei Altersstufen C1: 6-8 Jahre (N=29), C2: 9-12 Jahre (N=32) und C3: 13-16 Jahre (N=30) eingeteilt wurden.

Tabelle 2.2: Ausgewertete chinesische Kinder N (♀/♂)

Ort u./Gruppe ⇒	C1	C2	C3	Summe
CN1	7 (3/4)	19 (14/5)	9 (6/3)	35 (23/12)
CN2	7 (3/4)	7 (2/5)	14 (9/5)	28 (14/14)
CN3	15 (8/7)	6 (4/2)	7 (5/2)	28 (17/11)
Summe	29 (14/15)	32 (20/12)	30 (20/10)	91 (54/37)

Die Altersgruppen in China setzten sich sehr heterogen zusammen, was durch eine Übersicht in Tabellenform verdeutlicht werden soll. Die beiden Bergdörfer „Er Tiao Gou“ und „San Dian“ in den Qinling Mountains sollen mit CN1 zusammengefasst, „Dao Tang Ho“ und „Yuan Zhe Si“ in der Qinghai Province mit CN2 und die Provinzhauptstadt von Shaanxi „Xian“ als CN3 bezeichnet werden. In CN1 und CN3 sind ausschließlich Han-Chinesen getestet worden, während in CN2 überwiegend Tibeter mit einem geringen Anteil von Mongolen (7) und Hui-Chinesen (5) vertreten

sind. Darunter waren auch 8 jugendliche Mönche des tibetisch-buddhistischen Klosters, die alle in die Altersgruppe C3 fielen. Die Mönche und Novizen des Klosters verwenden gerne Knallkörper bei ihren Festen und sind von entsprechenden Hörschäden betroffen, so dass nur zwei von ihnen in die Auswertung aufgenommen werden konnten.

Die erschreckend häufig gefundenen Fälle von mittleren bis schweren Knalltraumata führten zu einer erheblichen Reduzierung der zur Auswertung herangezogenen Kinder, die ja den normalen Entwicklungsprozess zeigen sollen und nicht die Folgen eines Risikoverhaltens bezüglich der Lärmbelastung. In den ländlichen Gegenden mit geringem Grad an Technisierung, bestand dieses Risikoverhalten nahezu ausschließlich aus Experimenten mit Knallkörpern bzw. der Benutzung von Waffen zur Verteidigung der Yak- und Schafherden gegen Wölfe im Winter. Im Zentrum von Xian, der ehemaligen Kaiserstadt, ist der Umgang mit Feuerwerkskörpern nur eingeschränkt erlaubt bzw. verboten, da die historische Altstadt ein Touristenmagnet ist, wo viele Gebäude aus Holz gestaltet sind. Hier war historisch gesehen der Beginn der Seidenstraße, auf der natürlich Seide und andere seltene Produkte in den abendländischen Westen transportiert wurden. Xian ist außerdem berühmt für Schmuck aus grüner Jade. Aber die Stadt ist sehr laut durch den Straßenverkehrslärm und lauter Musik an jeder Straßenecke. Dadurch unterscheidet sich die Subgruppe CN3 in allen Altersgruppen C1, C2 und C3 von den anderen.

Zu den 255 Kindern, die getestet wurden, kommen noch 15 Kinder dazu, die sich als nicht audiometrierbar (kognitiv zu schwach entwickelt) erwiesen haben und zwar 11 Mädchen und 4 Jungen aus den ländlichen Gebieten CN1 und CN2. Von insgesamt 270 Probanden wurde mit 91 Ausgewählten nur der dritte Teil zur altersbezogenen Auswertung verwendet.

Ein Vergleich der beiden Tabellen zeigt, dass die Zusammensetzung der Altersgruppen nicht sehr homogen ist, auch was die Verteilung der Geschlechter angeht. Z. B. wird die Altersgruppe C1 von Stadtkindern dominiert, während in den beiden anderen Altersgruppen die Landkinder überwiegen. In der Gruppe C2 haben die Landkinder aus Zentralchina (CN1) ein Übergewicht und schließlich in C3 die Tibeter, was unter Umständen Alterseffekte mit ethnisch bedingten Besonderheiten vermischt. Unterteilt man aber die ohnehin schon kleinen Gruppen noch weiter, dann landet man bei der Beschreibung von Einzelfällen (case report).

2.1.2 Kinder in Deutschland

Im November 2003 wurden an einer Grundschule in Giessen 260 Schüler bezüglich ihrer Hörfähigkeit im Laufe einer Woche untersucht. Vorher war eine Einverständnis-Erklärung bei den Eltern eingeholt worden. Es wurden alle Schüler mit Erlaubnis der Eltern getestet, die zum Zeitpunkt der Untersuchung in der Schule waren und nicht durch Krankheit fehlten.

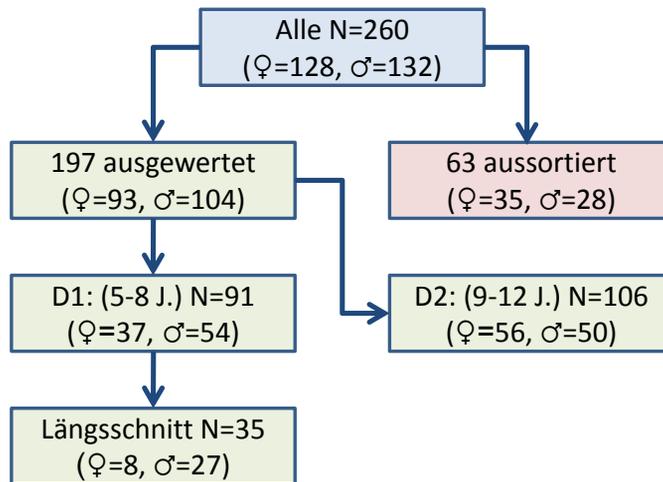


Abbildung 2.2: Übersicht der deutschen Schüler

Nach Auswertung der Otoskopie (Ohrinspektion), der Tympanometrie und der Befragung in Bezug auf die Schallbelastungen und Erkrankungen ergaben sich Kriterien, die zum Ausschluss von 63 Schülern aus der Auswertung führten. Es wurden nur Kinder mit normalen Ergebnissen bei der Tympanometrie ausgewertet. Alle Kinder mit Röhrcchen im Trommelfell zur Paukendrainage als Therapie von chronischer Mittelohr-Entzündung wurden ausgeschlossen. Einige Kinder, die als Folge von Unfällen oder Angriffen mit Spielzeugpistolen und/oder Feuerwerkskörpern (Befragung) ganz offensichtliche Schalltraumata aufwiesen, kamen ebenfalls nicht in die Auswertung. Für die Diagnose Schalltrauma wurde die Form des Audiogramms (Hochtonsenke bzw. Hochtonabfall) mit den Angaben im Fragebogen abgeglichen. In Tab. 2.3 sind die ausgeschlossenen Kinder im Detail nach Geschlecht und Altersgruppe aufgeschlüsselt. Die Gesamtzahl der gesiebten Population reduzierte sich auf insgesamt 197 otologisch normale Schüler. Diese Kinder wurden in zwei Altersgruppen eingeteilt; D1: 6–8 Jahre (N=91) und D2: 9–12 Jahre (N=106).

Tabelle 2.3: Von der Auswertung ausgeschlossene deutsche Kinder

Grund	Anzahl	Mädchen	Jungen	D1: 5-8 J.	D2: 9-12 J.
nur Tymp	20	13	7	9	11
nur Knalltrauma	15	9	6	8	7
Tymp + Knalltr.	18	8	10	11	7
Röhrchen	3	2	1	3	0
nicht audio...bar	3	1	2	2	1
zu alt	3	1	2	-	3
Erkältet	1	1	0	-	1
Summe:	63	35	28	33	30

Tymp: Tympanometrie nicht ok., Röhrchen im Trommelfell, nicht audiometrierbar, zu alt: Alter über 12 Jahre

43 Kinder der 4. Schulklasse derselben Schule wurden im Februar 2007 mit Einverständnis der Eltern ein weiteres Mal untersucht. 35 von ihnen waren 2003 in der gesiebten Gruppe D1 als Untergruppe enthalten. Diese Untersuchung, als Längsschnitt-Studie geplant, sollte die Testergebnisse der Gruppe D2 aus der Querschnitts-Untersuchung überprüfen.

Zum Vergleich der Tympanometrie-Ergebnisse (Ohrkanalvolumina) der Kinder mit Tympanogrammen von Erwachsenen, wurden Test-Ergebnisse von 440 erwachsenen Personen herangezogen (113 Frauen und 327 Männer), die alle mit dem gleichen Tympanometer GSI 38 vom Autor in einem Zeitraum von etwa 4 Jahren bei unterschiedlichen Hörtest-Aktionen durchgeführt wurden.

Bei der Auswahl der 91 chinesischen Kinder fanden die gleichen Kriterien Anwendung wie bei den deutschen Kindern.

Zum Vergleich der Ohrkanalvolumina der chinesischen Kinder mit den von chinesischen Erwachsenen wurden aus der China-Studie 668 erwachsene Personen ausgewertet, die alle von einem angehenden chinesischen HNO-Arzt mit dem MI 26 getestet wurden.

Der Ablauf der gesamten Untersuchungen hatte eine feste Reihenfolge: 1. Befragung (mit angepassten Fragebögen), 2. Ohrinspektion (Beurteilung von Gehörgang und Trommelfell), 3. Tympanometrie (Mittelohr Funktionstest), 4. Audiometrietraing bzw. Voraudiometrie 5. Audiometrie (der eigentliche Hörtest) und 6. Erläuterung der Ergebnisse bzw. Beratung.

2.2 Fragebogen für deutsche Grundschüler

Die Kontaktaufnahme mit den Probanden begann mit einer Befragung der Kinder mittels eines dem Schulkindalter angepassten Fragebogens. Zur Identifikation diente eine vorgedruckte Kenn-Nummer KN. Aus Datenschutzgründen wurden persönliche Angaben anonymisiert (Tab. 2.4).

Tabelle 2.4: Fragebogen – Fragen zur Person

Fragebogen der Arbeitsgruppe Hörforschung		KN: 12345
Familiename: _____	Vorname: _____	
Geburtsdatum: _____	Datum: _____	
Junge ()	Mädchen ()	

In einem 2. Block wurde die medizinische Vorgeschichte bzw. die aktuelle Befindlichkeit in einfachen Fragen erfasst (Tab. 2.5). Dazu gehörte auch eine Frage zu Ohrgeräuschen oder Tinnitus.

Tabelle 2.5: Fragebogen – Fragen zur allgemeinen Gesundheit

Heute erkältet, oder mit Schnupfen ?	nein ()
ja () schwer ?	
Schon mal beim Ohrenarzt gewesen ?	nein ()
ja () weshalb ?	
Trägst Du Hörgerät(e) ?	nein ()
ja () links () ; rechts ()	
Hast Du Ohrgeräusche ?	nein ()
ja () wie lange pro Tag ?	

5 weitere Fragen bezogen sich auf Ereignisse, die auf ein mögliches Knalltrauma durch Impulslärm hinweisen konnten (Tab. 2.6). Ebenso wurde abgefragt, ob es zu Ohrfeigen gekommen ist, soweit erinnerlich.

Tabelle 2.6: Fragebogen – Fragen zu möglichen Knalltraumata

Mit Kinder-Pistole angeschossen ?	nein ()
ja () welches Ohr ?	
Luftballon oder Tüte am Ohr zerknallt ?	nein ()
ja () welches Ohr ?	
Silvesterböller in der Nähe explodiert ?	nein ()
ja () welches Ohr ?	
Ohrfeige von Kind erhalten ?	nein ()
ja () welches Ohr ?	
Ohrfeige von Erwachsenem erhalten	nein ()
ja () welches Ohr ?	

Daran schlossen sich 3 Fragen zu den Hörgewohnheiten bezüglich des Musikkonsums an (Tab. 2.7), um Informationen zu eher kontinuierlichen Schallbelastungen zu erfassen und etwas über die musikalische Schulung des Gehörs zu erfahren.

Tabelle 2.7: Fragebogen – Fragen zu Musikausübung und -Konsum

Machst Du selbst Musik ?	nein ()
ja () Instrument ?	
Benutzt Du einen „Walkman“ ?	nein ()
ja () wie lange pro Tag ?	
Hörst Du zu Hause viel laute Musik ?	nein ()
ja () im Kinderzimmer ?	

Zum Schluss gab es noch eine Frage zu den Hobbies (2.8), die auch noch Hinweise auf Schallbelastungen geben konnten und genügend Platz für die Rubrik Sonstiges, in der z. B. auch Airbag-Unfälle oder das Tragen von Drainage-Röhrchen im Trommelfell abgefragt wurden.

Tabelle 2.8: Fragebogen – Fragen zu Hobbies, Sonstiges und Ergebnisse von Ohrinspektion und Tympanometrie

Hast Du Hobbies ?	nein ()
ja () welche ?	
Sonstige relevante Angaben:	

 Ohr-Insp. (links)

Ohr-Insp. (rechts)

Tympanometrie (links)

Tympanometrie (rechts)

Die Ergebnisse der Ohrinspektion mit Video-Otoskop und der Tympanometrie wurden als Zahlen codiert am unteren Rand des Fragebogens entsprechend eingetragen.

Für die einfache und schnelle Eingabe der Daten wurden die Ja/Nein-Ergebnisse in Zahlenwerte codiert und zwar Ja = 1 und Nein = 3. Das liegt auf dem Ziffernblock der Tastatur günstig und konnte nicht so leicht vertippt werden, da die 2 dazwischen plaziert ist und als Separator dient.

Der Fragebogen für die chinesischen Probanden war zweiseitig und zweisprachig in Chinesisch und Englisch ausgeführt. Für die Kinder wurde derselbe Fragebogen verwendet wie für die Erwachsenen, wobei einige Fragen unbeantwortet blieben. Die Fragen zu Gesundheitszustand, Lärmbelastungen und Musik-Konsum waren adäquat zum deutschen Fragebogen. Die Untersuchungsergebnisse wurden in der gleichen Weise als codierte Zahlenwerte festgehalten.

2.3 Ohrinspektion (Gehörgang und Trommelfell)

Die Ohrinspektion zur Überprüfung des äußeren Gehörganges und des Trommelfellzustandes erfolgte mit einem tragbaren Video-Otoskop Typ Videolab der Firma Neomed, wobei die Bilder zur späteren Beurteilung auf die Festplatte gespeichert wurden (siehe Abb. 2.3). Der Zustand von Gehörgang und Trommelfell wurde mit Zahlen codiert (siehe Tab. 2.9) und ebenfalls abgespeichert.



Abbildung 2.3: Video-Otoskop und Trommelfellaufnahme

Die Ohrinspektion der chinesischen Kinder wurde von einem chinesischen HNO-Oberarzt durchgeführt und nicht im Bild festgehalten.

Tabelle 2.9: Zustand: Gehörgang und Trommelfell

Gehörgang		Trommelfell	
1	unauffällig	1	unauffällig
2	sehr eng	2	zentral defekt
3	feucht	3	randständig defekt
4	viel Cerumen	4	Zust. nach Operation
		5	nicht zu beurteilen

Für die Auswertung war das Ergebnis der Otoskopie der Tympanometrie nachgeordnet. Z. B. führte ein Gehörgang mit viel Cerumen aber einem normalen Ergebnis bei der Tympanometrie nicht zum Ausschluss, obwohl in solchen Fällen auch keine Beurteilung des Trommelfells möglich war.

2.4 Tympanometrie (Mittelohr-Funktionsprüfung)

Mittelohrfunktionen wurden sodann mit einer Impedanzmessung überprüft. Bei der tympanometrischen Messung wurden 4 Messwerte pro Ohr mit Tympanometern erfasst:

1. Peak Compliance (in ml, als Imaginärteil der Admittanz)
2. Gradient (in daPa, Druckdifferenz bei 50 % der Peak Compliance)
3. statischer Druck bei der maximalen Nachgiebigkeit (in daPa)
4. Ohrkanalvolumen (in ml).

Die Peak Compliance ist ein Maß für die Nachgiebigkeit oder Beweglichkeit des Trommelfells und zeigt bei gesundem Trommelfell an, wie gut Schall durch das Mittelohr übertragen wird. Die hier in ml angegebenen Messwerte werden in der Literatur häufig in der Einheit milli-mho für die Admittanz (Kehrwert der Impedanz in akustischen Ohm) angegeben. Tympanometer werden laut Gerhardt et al. (1987) so kalibriert, dass die Ergebnisse in mmho denen in ml entsprechen.

Der Gradient ist ein Formparameter für die Messkurve und ist umso größer, je flacher die Kurve verläuft und hängt stark von der Peak Compliance ab. Diese beiden Parameter korrelieren bei allen untersuchten Gruppen negativ mit Korrelationskoeffizienten zwischen $-0,5$ und $-0,65$ signifikant miteinander. International wird der

Gradient zutreffender als "Tympanic Width" bezeichnet. In älteren Publikationen wurden andere Definitionen verwendet, die dem Namen (Steigung) besser gerecht wurden. Brooks (1969) berechnet den Abfall des Compliance Wertes bei 50 daPa oberhalb und unterhalb des Drucks beim Peak Compliance Wert. Entsprechend war die angegebene Einheit mmho oder ml und je größer der Gradient ist, desto steiler verläuft die Kurve. Mit dieser Definition arbeiteten auch noch Paradise et al. (1976) mit leichten Veränderungen und einem dimensionslosen Verhältnis zwischen dem Compliance Wert bei einer Breite der Kurve von 100 daPa und dem Peak Wert. Die heutige Definition geht auf de Jonge (1986) zurück, die auch von Margolis und Heller (1987) als die praktikabelste empfohlen wurde. In der klinischen Praxis wurde mit dem Gradienten ein Verfahren erprobt, um eine sekretorische Otitis media zu diagnostizieren.

Der statische Druck bei der Peak Compliance gibt an, ob das Trommelfell vorgespannt oder druckfrei ist. Letzteres gibt den Hinweis auf eine normale Tubenfunktion des untersuchten Ohres. Je größer der Betrag dieses Druckes ist, desto stärker ist der negative Einfluss auf die Hörschwelle. Deshalb gehört dieser Wert zu den Ausschlusskriterien für die Auswertung der Audiogramme. Der negative Einfluss dürfte bevorzugt bei tiefen Frequenzen auftreten und die Übertragung hoher Frequenzen sogar eher begünstigen.

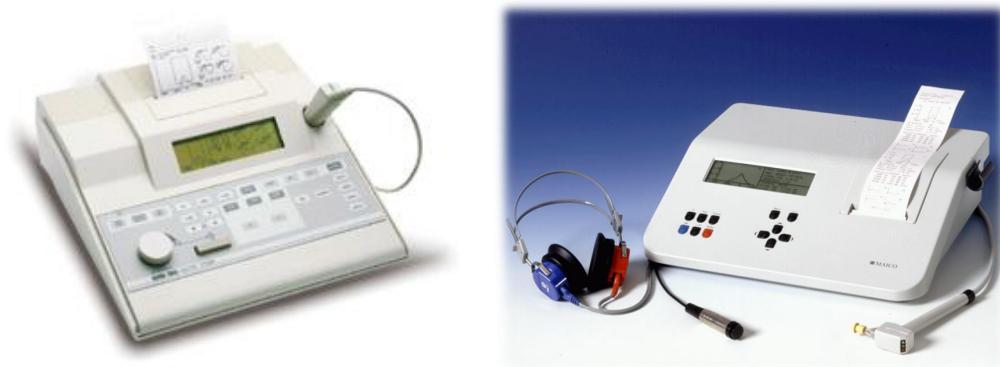


Abbildung 2.4: Tympanometer: links – GSI 38, rechts – MI 26

Bei den deutschen Kindern kam als Tympanometer das GSI 38 der Firma Grason Stadler zum Einsatz. Die Ergebnisse konnten über eine RS 232 in die Audiometer-Software eingelesen, gespeichert und ausgedruckt werden. In China wurden die Impedanzmessungen mit einem MI 26 der Firma Maico durchgeführt. Die Ergebnisse konnten aber nicht gespeichert werden, sondern wurden als Papierstreifen ausge-

druckt, auf die Fragebögen aufgeklebt, zur Datensicherung eingescannt und später per Hand eingegeben. Es wurde die Admittance (akustische Leitfähigkeit in mmho) gemessen, also der Kehrwert der Impedanz, die bei beiden Geräten als Nachgiebigkeit des Trommelfells bzw. Compliance in ml oder cm^3 angegeben wurde.

Tabelle 2.10: Spezifikation der Tympanometer

Spezifikation der Tympanometer GSI 28 und MI 26

	GSI 38	MI 26
Druckbereich:	+200 ... -400 daPa	
Volumenbereich:	0 – 5,0 ml	
Compliance Bereich	0 – 1,5 ml oder 0 – 3 ml (automatisch)	
Gradient	Druckdifferenz bei 50% der maximalen Compliance	
Testpegel:	85 dB(SPL) in 2 ml	
Testfrequenz:	226 Hz \pm 3%	226 Hz \pm 2%
Genauigkeit:	\pm 15% oder \pm 10 daPa	\pm 10% oder \pm 10 daPa
Pumpgeschwindigkeit:	600 bzw. 200 daPa/s	550 daPa/s



Abbildung 2.5: Tympanometrie-Stöpsel: links – flach, rechts – halbrund

Die Spezifikationen (siehe Tab. 2.10) waren bei beiden Tympanometern vergleichbar bzw. identisch. Die verwendeten Stöpseltypen zur Anpassung und Abdichtung der Sonde am Gehörgang waren allerdings unterschiedlich jeweils nach der Herstellerempfehlung (siehe dazu Abb. 2.5 mit den beiden Stöpseltypen).

Beim GSI 38 wurde die Pumpgeschwindigkeit im Bereich der maximalen Compliance (Admittanz) automatisch auf die niedrige Stufe umgeschaltet um eine größere Genauigkeit zu erreichen. Die abgespeicherten Werte waren beim GSI 38 um eine Nachkommastelle detaillierter als beim MI 26. Letzteres hat Konsequenzen bei der

Ermittlung von Quantilen der Werte-Verteilung. Bei den chinesischen Ohrvolumina gibt es um Faktor 10 weniger mögliche Messwerte.

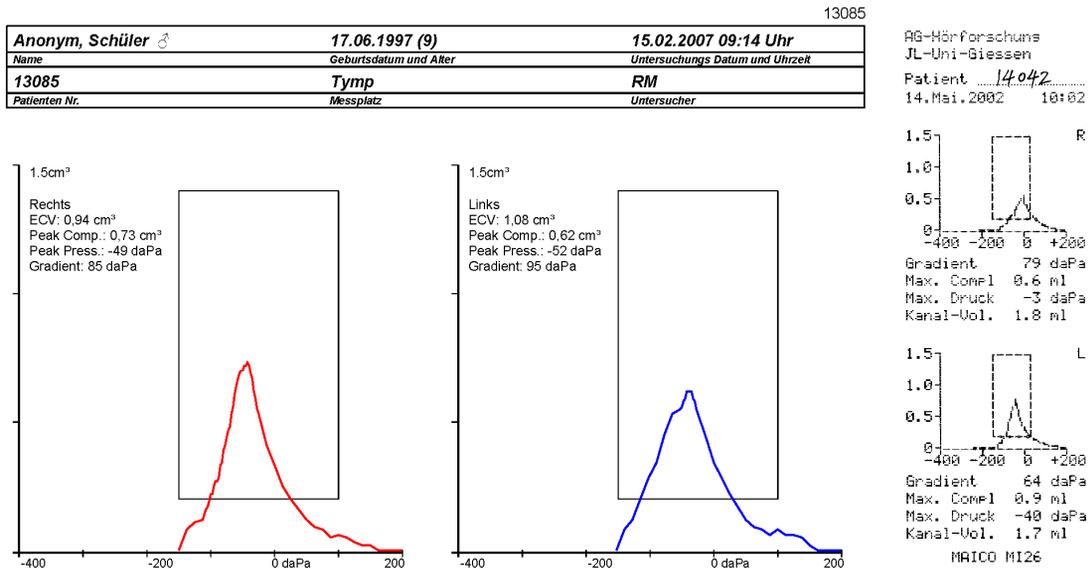


Abbildung 2.6: Normale Tympanogramme: li. – GSI 38, re. – MI 26

Als normal wurden Tympanogramme gewertet, wenn das Maximum der Compliance einen Betrag zwischen 0,2 ml und 1,4 ml hatte und im Druckbereich zwischen -150 daPa und +100 daPa lag. Dieser Normalbereich wird in Abb. 2.6 mit einem Rechteck eingegrenzt. Die Firma Maico verwendet für den Normbereich einen etwas kleineren positiven Grenzdruck von +50 daPa. Der Unterschied ist aber unbedeutend, da positive Mittelohrdrücke bei gestörter Tubenventilation relativ selten sind (ergibt sich z. B. bei starkem Schnupfen nach kräftigem Naseputzen). Bei gestörtem Druckausgleich kommt es durch Resorption der Luft durch die Schleimhaut zu einem Unterdruck im Mittelohrraum, der dann wieder zu Flüssigkeitsaustritt aus dem Gewebe, also zu einem Paukenerguss führen kann. Hier sind bei beiden Tympanometern die Grenzwerte für „normal“ identisch. Lehnhardt (1996) setzt die Grenze zu pathologischen Unterdruckwerten bei -100 daPa an, Djupesland et al. (1982) verwendet bei der Untersuchung von sprachbehinderten Kindern sogar -50 daPa als Kriterium. In der Literatur herrscht hierin also keine Übereinstimmung; Margolis und Heller (1987) empfehlen sogar, auf Druckabweichungen als Indikation für eine Hörstörung ganz zu verzichten. In dieser Untersuchung werden die Herstellerangaben verwendet. Es gab keinen Fall, der wegen Überdruck im Mittelohr hätte ausgeschlossen werden

müssen, deshalb sind die Unterschiede zwischen Grason Stadler und Maico nicht relevant.

2.5 Audiometrie (Hörschwellenbestimmung)

Bei der Voraudiometrie und allen Hörtests in China fanden nur Audiometer vom Typ MA 53 der Firma Maico Verwendung, während in Deutschland für die eigentliche Audiometrie Audiometer vom Typ CA 540 der Firma Hortmann (heute GN-Otometrics) eingesetzt wurden. Diese Aufteilung war notwendig, da die Forschungs-Audiometer von Maico leider nicht kompatibel zur netzwerkfähigen Software Avantgarde 2.0 waren, mit der die Hortmann Audiometer und das Tympanometer vernetzt waren. Die beiden MA 53 wurden deshalb mit einer Audiometriesoftware von Maico unvernetzt bei der Voraudiometrie eingesetzt.



Abbildung 2.7: Audiometer: links – CA 540, rechts – MA 53

Alle Audiometer waren mit dem Sennheisser Wandler HDA 200 konfiguriert, der Testfrequenzen von 125 Hz bis 16 kHz übertragen kann. Kalibriert wurden die Hörer nach den Normen ISO 389-8 für den Standard Hörbereich und nach der ISO 389-5 für die Töne im erweiterten Hochtonbereich oberhalb von 8 kHz. Die Norm ISO 389-8 für geschlossene (circumaurale) Kopfhörer wie den HDA 200 wurde erst 2004 in seiner entgeltigen Fassung veröffentlicht, die Hersteller hatten aber vorab Korrekturwerte von der PTB in Braunschweig zur Verfügung.

Die Kalibrierwerte für den HDA 200 sind etwas unterschiedlich bei den Firmen Maico und Hortmann und weichen auch etwas von der später gültigen Norm

ISO 389-8 ab. In Tab. 2.11 sind die Referenzwerte nach ISO 389-8 und ISO 389-5 für alle Audiometrie-Frequenzen gelistet, dazu die Abweichungen von der Norm und die Schalldämmwerte des HDA 200, die ebenfalls der ISO 389-8 im Oktavabstand von 125 Hz bis 8 kHz entnommen sind. Für die Audiometer-Typen sind noch die Kalibrier-Differenzen (Diff) zwischen beiden Herstellern angegeben. Alle Abweichungen sind geringer als die erlaubte Kalibrier-Toleranz von ± 3 dB bis 4 kHz und ± 5 dB ab 6 kHz. Die Messungen mit den MA 53 Audiometern wurden für die Auswertung bei 6 kHz um -5 dB (eine Mess-Stufe) korrigiert, da die Abweichungen zu groß waren. Diese Korrektur ist in Tab. 2.11 in der Spalte MA 53 bereits berücksichtigt und hätte sogar $-7,5$ dB betragen müssen, da der Wert immer noch gegenüber der ISO-Norm um 2,5 dB zu groß ist.

Tabelle 2.11: ISO 389, HDA 200: Abweichungen von ISO 389 und Dämmwerte

HDA 200						
	Frequenz Hz	ISO 389 dB	CA 540 dB	MA 53 dB	Diff dB	Dämmung dB
ISO 389-8	125	30,5	1,0	1,0	0,0	14,5
	250	18,0	1,5	0,0	-1,5	16,0
	500	11,0	0,0	1,5	1,5	22,5
	750	6,0	1,0	-0,5	-1,5	
	1000	5,5	0,5	-1,0	-1,5	28,5
	1500	5,5	0,5	0,0	-0,5	
	2000	4,5	0,5	1,5	1,0	32,0
	3000	2,5	1,0	-0,5	-1,5	
	4000	9,5	-0,5	1,0	1,5	45,5
	6000	17,0	0,5	2,5	2,0	
	8000	17,5	0,0	2,5	2,5	44,0
ISO 389-5	9000	18,5	0,0	1,5	1,5	
	10000	22,0	0,0	0,5	0,5	
	11200	23,0	0,0	2,0	2,0	
	12500	28,0	-0,5	0,5	1,0	
	14000	36,0	-0,5	-1,5	-1,0	
	16000	56,0	-1,0	-2,0	-1,0	
	Mittel		0,2	0,5	0,3	

Diff ist die Differenz zwischen CA 540 und MA 53

Dämmwerte über 8 kHz unbekannt

Der HDA 200 ist ein geschlossener (circumauraler) Kopfhörer mit einer exzellenten Fremdgeräusch-Dämmung. Das Gehäuse stammt von industriellen Kapsel-Gehörschützern der Firma Peltor. Die Umgebungsbedingungen sind dabei nicht so kritisch in Bezug auf Störgeräusche.

Zurückliegende Untersuchungen (nicht publiziert) ergaben keine feststellbaren Unterschiede zwischen Messungen in einer Audiometrikabine und einem ruhigen Raum, in dem keine Unterhaltungen stattfinden und auch keine technischen Geräte betrieben werden. Schmuziger et al. (2004) führten Untersuchungen zur Wiederholgenauigkeit von Schwellwert-Messungen mit dem HDA 200 durch und empfehlen die Verwendung dieses Wandlers bis 14 kHz ohne Einschränkung. Bei der Interpretation der Messwerte bei 16 kHz empfehlen sie Zurückhaltung wegen der deutlich größeren Streuung der Ergebnisse bei dieser Frequenz.

Als Testsignale wurden gepulste Sinustöne verwendet, die etwas besser erkannt werden als reine Sinus-Dauertöne. Zur Vermeidung von Störgeräuschen durch Signalsprünge werden diese Pulstöne weich ein- und ausgeblendet. Die Testtöne wurden kurz überschwellig angeboten, damit die Probanden sich auf die Erkennung der Töne einstellen konnten. Pulstöne haben außerdem den Vorteil, dass sie bei gleich guter Wahrnehmung gegenüber den Dauertönen eine etwa halbierte Schallintensität besitzen. Das verringert die Gefahr der Adaptation bei überschwelligem Stimulus.

Inzwischen werden auch für die Hörprüfung G20 in der Arbeitsmedizin gepulste Sinustöne empfohlen bzw. vorgeschrieben, da die Vorteile auf der Hand liegen.

Die Abb. 2.8 zeigt den Anfang eines Audiometrie-Protokolls, in dem die prinzipielle Vorgehensweise bei einem Hörtest veranschaulicht wird. Wie in Lehnhardt (1996) beschrieben wurde die Schwelle ermittelt, die bei aufsteigenden Pegeln auftritt im Gegensatz zur sogen. Eingabelungs-Methode, wo zwischen aufsteigend und absteigend festgestellten Schwellwerten gemittelt wird (Böhme und Welzl-Müller 1998). Die Protokollierung der Audiometrien wurde von Raiber (2005) programmiert und bei der Nachuntersuchung in der Längsschnitt-Studie eingesetzt. Einzelne Hörtests mussten nach Begutachtung des Protokolls verworfen und nochmals nachgemessen werden.

Bei der Nachuntersuchung wurden nur drei Maico MA 53 Audiometer eingesetzt, die mit der neu entwickelten Software Otoprogramm (Bell (2004), Raiber (2005)) im WLAN-Betrieb mit einem Datenserver vernetzt waren. Bei diesen Hörtests wurden die erwähnten Protokolle aufgezeichnet, indem alle Aktionen und Reaktionen in Form von xml-Streams gespeichert wurden.

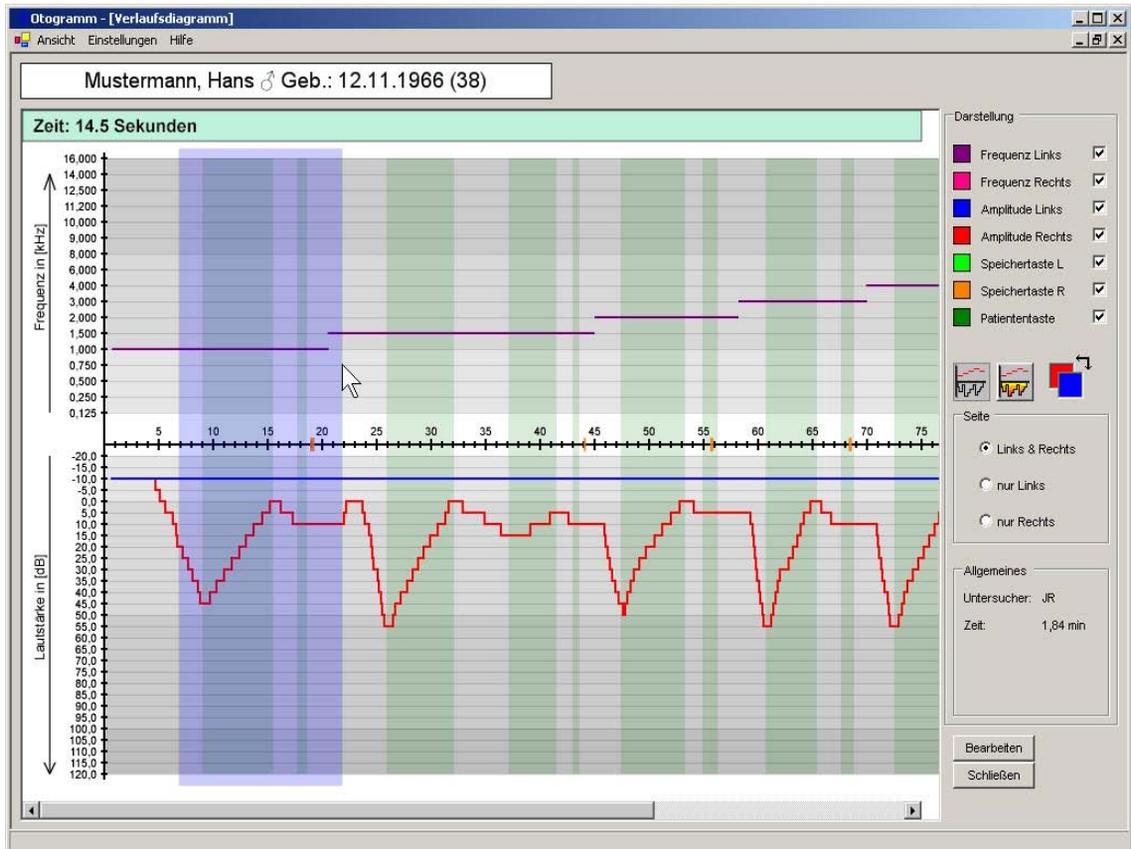


Abbildung 2.8: Audiometrie-Protokoll nach Raiber (2005): Zeit-Verlauf der Audiometrie im Detail mit Patiententaste (senkrechte dunkle Streifen)

Ein Audiometrie-Training als sogenannte Voraudiometrie wurde durchgeführt, damit beim eigentlichen Hörtest keine Erklärungen mehr notwendig waren und die Probanden Erfahrung mit der Erkennung von reinen Sinustönen an der Hörschwelle hatten.

2.6 Auswertung

Bei der Längsschnitt-Studie wurden ausschließlich die Erstklässler von der Querschnitt-Studie ausgewertet und 35 von ihnen waren Mitglieder der gesiebten Gruppe D1 (6–8 J.), die auch die Zweitklässler enthielt.

Das Alter der Kinder errechnete sich als gerundete Differenz zwischen Testdatum und Geburtsdatum. Kinder von 8,5 Jahren bis 12,4 Jahren fielen demnach in die Altersgruppe der 9–12 Jährigen.

Als Software für die Aufbereitung und Analyse der Daten diente Microsoft Excel 2007. Die Abbildungen sind aus Tabellen von Excel erzeugt und teilweise in Powerpoint 2007 und CorelDRAW 14 modifiziert worden.

Die statistischen Tests wurden mit SPSS 17 kalkuliert. Sowohl parametrische Tests wie T-Test, ANOVA und nichtparametrische U-Tests nach Mann-Whitney dienten der Überprüfung der Daten; nichtparametrische Tests deshalb, weil die Verteilungen links-schief und nicht normal sind. Dies wird bedingt durch die Messgrenze bei -10 dB im Bereich von 125 Hz bis 8 kHz und -20 dB zwischen 9 und 16 kHz. Die Verteilungs-Maxima liegen näher an dieser Grenze im Vergleich zu den Abweichungen in positiver Richtung. Beide Tests zeigten allerdings mit nur ganz geringen Abweichungen nahezu die gleichen Wahrscheinlichkeiten, deshalb werden im Ergebnisteil die Signifikanz-Wahrscheinlichkeiten der T-Tests aufgeführt.

Für die Auswertung der Querschnitts-Studie wurden die unabhängigen Test-Versionen angewandt und in der Längsschnitt-Studie die verbundenen Versionen. Signifikanz-Wahrscheinlichkeiten, die kleiner als 0,0005 sind, wurden vom Programm automatisch als 0,000 ausgegeben und werden als $< 0,001$ in den Tabellen aufgeführt. Zur besseren Lesbarkeit der Ergebnisse sind diese bei $p < 0,05$ fett gedruckt.

Die statistische Auswertung der Ohrkanalvolumina wurde mit der Statistik-Software R kalkuliert und als Boxplots mit Konfidenz-Intervallen (notched boxplots) dargestellt. In der Boxplot-Darstellung der Ergebnisse sind die statistischen Kenngrößen 25-%-Quantil als untere Boxbegrenzung, der Median als eine Art Gürtel in der Box und das 75-%-Quantil als obere Boxbegrenzung angegeben. Die Einkerbungen (notches) beim Median geben das 95 % Konfidenz-Intervall des Medians an. Beim Vergleich zweier Mediane kann man aus der Größe und Lage der Einkerbungen erkennen, ob diese signifikant unterschiedlich sind oder nicht. Signifikant sind die Unterschiede dann, wenn sich die Kerben durch das Ziehen einer horizontalen Linie (bei vertikalen Boxen) vollständig trennen lassen, bei Überschneidungen nicht. Maxima und Minima werden durch eine Linie (whisker) ober- und unterhalb der Boxbegrenzungen angezeigt. Sogenannte Ausreißer werden mit einzelnen Kreisen oberhalb der Maxima symbolisiert.

Aus den gemittelten Hörschwellen der beiden deutschen Altersgruppen D1 und D2 wird für alle Messfrequenzen eine Alterskorrektur im Jahresabstand errechnet um die Vergleichbarkeit der kindlichen Hörschwellen zur Normhörschwelle herzustellen. Diese alterskorrigierten Hörtests werden mit den unkorrigierten Tests hin-

sichtlich des 20 dB Kriteriums für Hörschäden verglichen. Dazu werden auch die ausgesonderten Fälle wieder mit berücksichtigt und die Sensitivität bzw. Spezifität des Schadenskriteriums auf Veränderung untersucht, um die klinische Relevanz der weiter unten beschriebenen Alterskorrektur festzustellen.

2.7 Alterskorrektur

Für erwachsene Personen mit einem normalen Gehör gibt die internationale Norm ISO 7029 Auskunft über die Veränderung des Hörvermögens im Laufe des Lebens. Die fortschreitende Verschlechterung der Hörfähigkeit mit zunehmendem Alter wird Presbyakusis genannt und muss von anderen Ursachen für die Verschlechterung der Hörfähigkeit wie dem Lärm unterschieden werden. Mittels Formeln lässt sich die mittlere Hörfähigkeit für Männer und Frauen über 18 Jahren abhängig vom Alter errechnen.

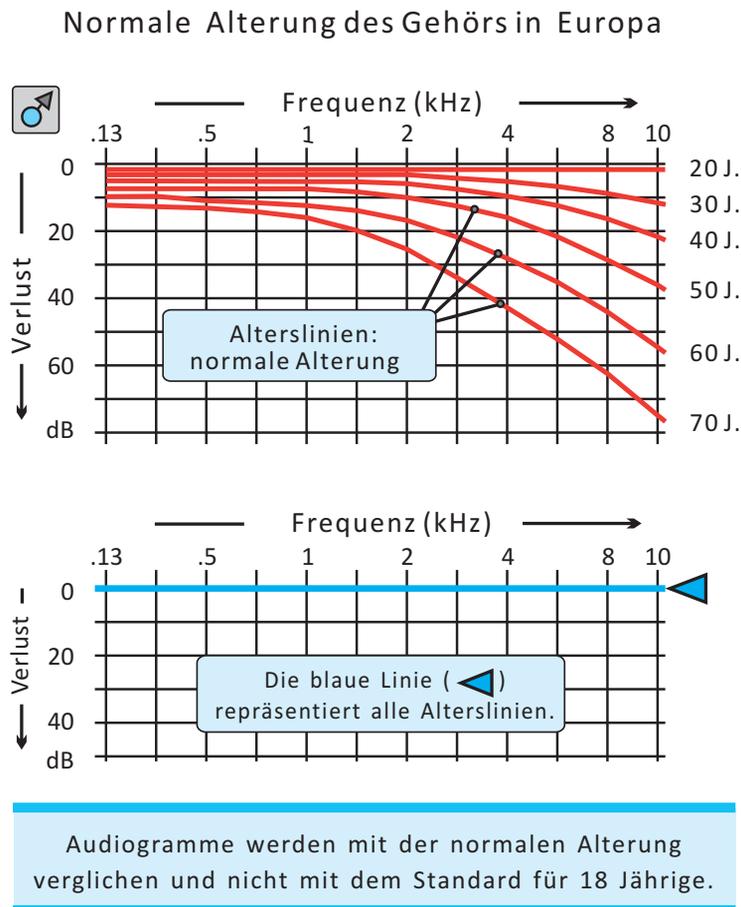


Abbildung 2.9: Alterskorrektur der Audiogramme (aus Fleischer und Müller (2007))

Einer der bedeutendsten Einflüsse ist die Belastung durch lauten Schall, der zu Hörschäden führen kann. Dieser Faktor wird in der ISO 1999 behandelt und kann ebenfalls durch Abschätzung bzw. Berechnung der erhaltenen Schalldosis kalkuliert werden.

Um lärmbedingte Hörschäden vom Alterungseffekt getrennt betrachten zu können, werden alle gemessenen Schwellwerte um den Betrag einer mittleren Alterung korrigiert. Alle Audiogramme werden so auf ein Alter von 18 Jahren normiert (siehe Abb. 2.9). Die Alterslinien in der Abbildung basieren auf eigenen, experimentellen Daten von mehr als 4000 Audiogrammen und erweitern insbesondere die Alterskorrektur in den erweiterten Hochtonbereich über 8 kHz hinaus, zu dem die ISO 7029 keine Angaben macht. In Abb. 2.9 sind die Alterslinien von 125 Hz bis 10 kHz dargestellt.

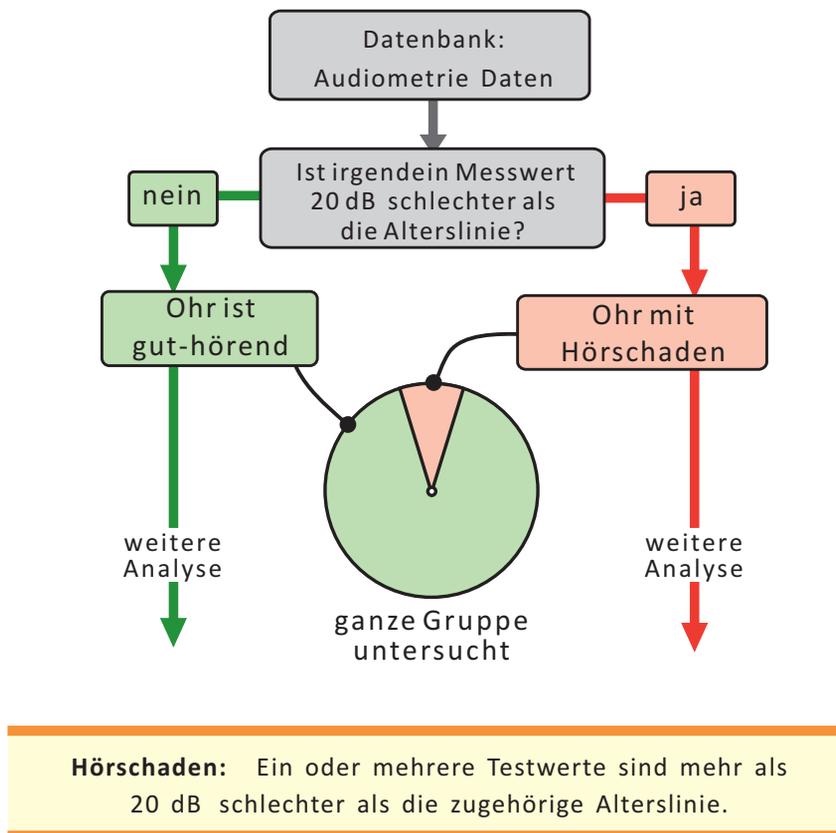


Abbildung 2.10: Alterskorrigierte Gruppenkurven (aus Fleischer und Müller (2007))

Abweichungen von der Alterslinie, die größer als 20 dB sind, führen zur Diagnose

„hörgeschädigt“. Eine Abweichung von mehr als +20 dB von der ISO Hörschwelle wird in vielen Publikationen als Kriterium für Hörschäden verwendet und soll auch hier in diesem Sinne als Grenze zum Normalhören dienen. Der Unterschied besteht darin, dass die Audiometriewerte nicht mit der Null-Linie verglichen werden sondern mit der zugehörigen Alterslinie (siehe Abb. 2.10).

Für Kinder existieren bislang keine Angaben zu altersgemäß normalen Hörschwellen-Werten, weshalb in der Regel die Normalwerte für erwachsene Personen zugrunde gelegt werden. Bei kindlichen Audiogrammen kann aber die strikte Anwendung des 20 dB-Kriteriums dazu führen, dass bei stärker abgesenkten Hörschwellen, negative Schlüsse für die weitere Entwicklung des Hörvermögens gezogen werden. Aus den, hier durch Tonaudiometrie ermittelten, durchschnittlichen Hörschwellwerten sollen Alterslinien auch für das kindliche Alter ermittelt werden, damit die Kinder nach Durchführung einer Alterskorrektur realistischer beurteilt werden können.

Kapitel 3

Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Tympanometrie

3.1.1 Compliance, Gradient und Druck

Mit der tympanometrischen Untersuchung des Ohres wird die Schalleitung durch den Gehörgang und das Mittelohr getestet. Die ermittelte Peak Compliance und der Druck im Mittelohrraum wurden als Kriterien für den Einschluss oder Ausschluss der Kinder für diese Studie verwendet. Der Gradient und das Ohrkanalvolumen wurden dabei nicht als Ausschlusskriterium verwendet. Die erhobenen Messdaten sollen im Folgenden dargestellt werden.

Die 3 Parameter: Peak Compliance, Gradient und Druck im Mittelohr werden in Tab. 3.1 als arithmetisch gemittelte Messergebnisse für alle Gruppen nach Geschlecht getrennt und separat für beide Ohren mit Standardabweichung angegeben. Aus der Anzahl (N) geht hervor, aus wieviel Einzelwerten sich die gemittelten Ergebnisse zusammensetzen. Hier ist die Anzahl der Kinder und Ohren identisch, weil die Werte für beide Ohren getrennt aufgeführt sind.

Die Unterschiede zwischen den Altersgruppen, den Geschlechtern und der linken/rechten Ohren können direkt aus der Tab. 3.1 abgelesen werden. Ein Vergleich der Altersgruppen und Geschlechter geschieht jeweils innerhalb der Spalten, während der Seitenvergleich innerhalb der Zeilen möglich ist. Der Geschlechtsvergleich wird durch die unterschiedlich gefärbten Zeilen erleichtert.

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Tympanometrie bei Kindern aus China und Deutschland: Peak Compliance, Gradient und Mittelohrdruck

Gruppe (N)	linkes Ohr						rechtes Ohr					
	PCompl ml	S.D.	Grad daPa	S.D.	Pmax daPa	S.D.	PCompl ml	S.D.	Grad daPa	S.D.	Pmax daPa	S.D.
C1 ♀ (14)	0,42	0,28	97	25	-48	25	0,36	0,09	105	20	-36	23
C1 ♂ (15)	0,43	0,18	95	19	-44	44	0,45	0,24	89	21	-29	30
C2 ♀ (20)	0,50	0,25	80	22	-40	24	0,42	0,15	82	16	-35	24
C2 ♂ (12)	0,55	0,26	91	21	-50	36	0,57	0,24	78	18	-40	24
C3 ♀ (20)	0,46	0,16	79	15	-39	30	0,49	0,23	80	25	-35	17
C3 ♂ (10)	0,43	0,15	84	18	-39	12	0,37	0,09	89	16	-39	15
D1 ♀ (37)	0,56	0,29	85	22	-46	41	0,55	0,28	91	21	-51	43
D1 ♂ (54)	0,67	0,49	85	23	-33	40	0,61	0,25	93	28	-33	41
D2 ♀ (56)	0,62	0,40	78	23	-27	33	0,55	0,23	86	20	-24	24
D2 ♂ (50)	0,76	0,51	75	22	-39	39	0,65	0,24	84	21	-33	30

(N): Anzahl, PCompl: Peak Compliance, Grad: Gradient, Pmax: Druck im Mittelohr, S.D.: Standardabw.

daPa: 10 Pascal

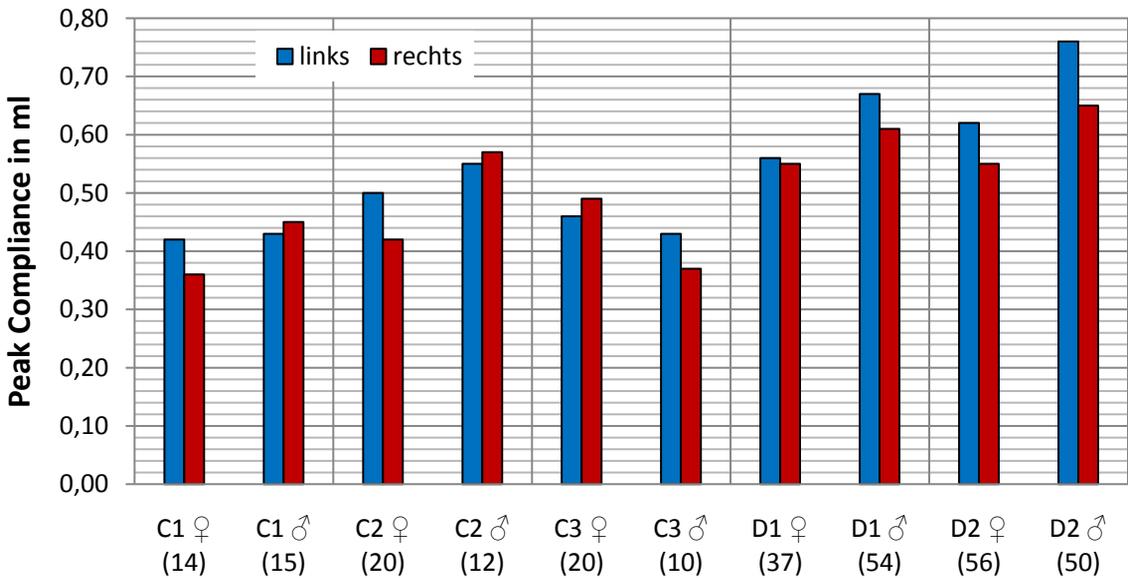


Abbildung 3.1: Peak Compliance (Kinder), nach Altersgruppen, Geschlecht und Ohr

Die durchschnittlichen Messwerte für die Peak Compliance aus Tab. 3.1 sind in Abb. 3.1 der Anschaulichkeit halber gruppiert aufgeführt. Innerhalb der Trennlinien sind die Altersgruppen dargestellt und zwar unterteilt nach Geschlecht und Ohrseite. Es zeigt sich ein Trend zu größeren Werten mit steigendem Alter und auch innerhalb der Gruppen größere Werte für die Jungen gegenüber den Mädchen. Allerdings folgt die Altersgruppe C3 nicht diesem Trend bezüglich Alter und Geschlecht. Die

Peak Compliance Werte von Gruppe C3 liegt etwa auf dem Niveau der Gruppe C1 und die Jungen haben kleinere Werte als die Mädchen. Dagegen scheinen die beiden deutschen Altersgruppen D1 und D2 den Trend von C1 und C2 fortzusetzen, sowohl bei den Mädchen als auch bei den Jungen. Die deutschen Kinder zeigen also größere Werte für die Peak Compliance als die gleichaltrigen chinesischen Kinder. Den kleinsten Peak Compliance Wert mit 0,36 ml haben die chinesischen Mädchen der Gruppe C1 auf dem rechten Ohr und den größten Wert mit 0,76 ml die deutschen Jungen der Gruppe D2 auf dem linken Ohr.

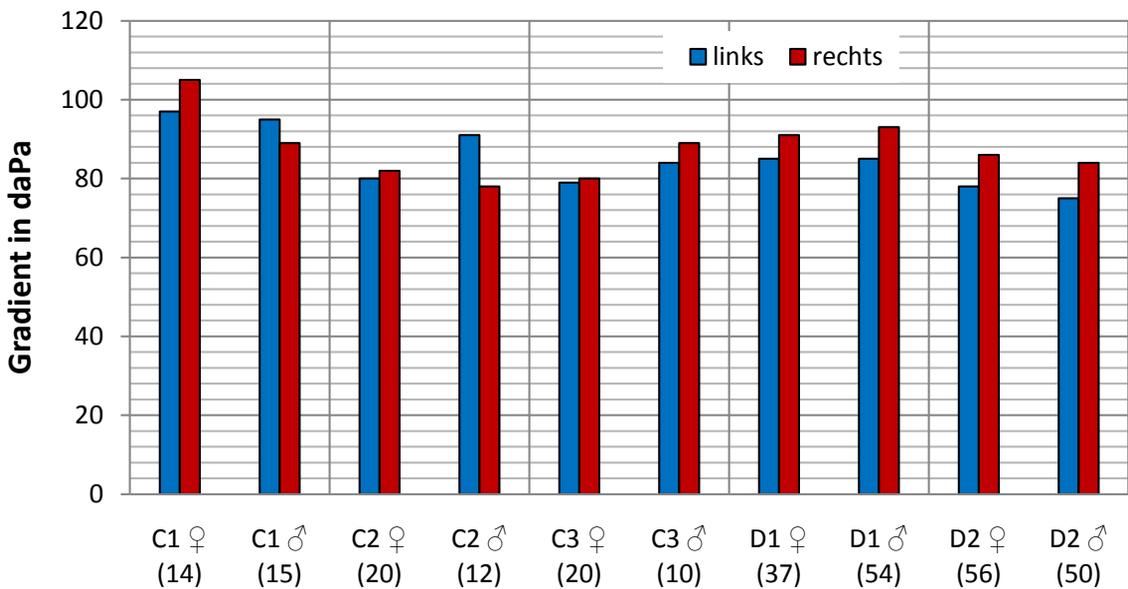


Abbildung 3.2: Gradienten (Kinder), nach Altersgruppen, Geschlecht und Ohr

Bei einer vergleichenden Betrachtung der Peak Compliance zwischen Altersgruppen gibt es 3 Möglichkeiten bei chinesischen Kindern und eine bei deutschen Kindern, jeweils für Mädchen und Jungen getrennt und für beide Ohren, also insgesamt $(3 + 1) \times 2 \times 2 = 16$ Vergleiche. Davon sind nur 2 Unterschiede signifikant ($p < 0,05$) und zwar bei Mädchen aus Gruppe C1 (0,36 ml) und C3 (0,49 ml) und bei aus Gruppe C2 (0,57 ml) und C3 (0,36 ml) jeweils beim rechten Ohr. Alle anderen Vergleiche ergeben keine signifikanten Unterschiede. Bei 10 Geschlechtsvergleichen innerhalb der Altersgruppen zeigen sich ebenfalls nur 2 signifikante Unterschiede. In den Gruppen C2 (♀: 0,42 ml/♂: 0,57 ml) und D2 (♀: 0,55 ml/♂: 0,65 ml) haben jeweils die Jungen beim rechten Ohr signifikant größere Werte als die Mädchen. Trotz einer Tendenz zu größeren Werten beim linken Ohr der deutschen Kinder sind

die Unterschiede im Seitenvergleich (10 Vergleiche) innerhalb der Gruppen allesamt nicht signifikant ($p > 0,05$). Von insgesamt 36 beschriebenen Gruppenvergleichen finden sich nur 4 signifikante Unterschiede (entspricht einem Anteil von 11,1 %).

Beim Gradienten ergibt sich das folgende Bild, siehe Abb. 3.2. Der Gradient wird als Druckspanne in daPa im Tympanogramm angegeben, die bei 50 % des Peak Compliance Wertes abgelesen wird. Daher besteht eine gewisse Abhängigkeit zwischen diesen beiden Messgrößen, die in den grafischen Darstellungen Abb. 3.1 und Abb. 3.2 sichtbar wird. Dieser Zusammenhang ist näherungsweise umgekehrt proportional. D. h. je größer die Peak Compliance ist, desto schmaler wird die Kurve bei 50 % des Maximalwertes. Das zeigt sich auch bei der Angabe des kleinsten bzw. größten Wertes. Die chinesischen Mädchen der Gruppe C1 haben mit 105 daPa den größten Gradienten beim rechten Ohr und die deutschen Jungen der Gruppe D2 mit 75 daPa den kleinsten Wert am linken Ohr. Von 36 Gruppenvergleichen sind 9 Unterschiede signifikant (das entspricht einem Anteil von 25,0 %).

Bei den chinesischen Kindern finden sich signifikante Unterschiede zwischen den Altersgruppen C1 mit C2 und C1 mit C3 und zwar bei Jungen und Mädchen (4 Vergleiche), während bei den deutschen Kindern alle Seitenvergleiche (linkes/rechtes Ohr) signifikant unterschiedlich ausfallen (auch 4 Vergleiche). Hier sind jeweils die Werte des rechten Ohres signifikant größer als die des linken Ohres ($p < 0,05$). Der Gradient der deutschen Jungen aus Gruppe D1 ist mit 85 daPa beim linken Ohr ebenfalls signifikant größer als bei den Jungen der Gruppe D2 mit 75 daPa.

Der tympanometrisch gemessene Druck im Mittelohr ist weitgehend unabhängig von Alter, Geschlecht und auch der Ohr-Seite. Es finden sich nur 2 signifikante Unterschiede und zwar beim Altersvergleich der deutschen Mädchen, wo auf beiden Ohren der Unterdruck bei den jüngeren Mädchen (D1: links -46 daPa, rechts -51 daPa) sich signifikant von den älteren Mädchen (D2: links -27 daPa, rechts -24 daPa) unterscheidet.

3.1.2 Vergleich der Ohrkanalvolumina

Das bei der Tympanometrie ermittelte Ohrkanalvolumen ist eine Strukturgröße und wächst mit der Körper- bzw. Schädelgröße, die wiederum altersabhängig während des Heranwachsens der Kinder ist. Diese Messgröße zeigt die deutlichste Abhängigkeit vom Alter und wird im folgenden mit den Ohrkanalvolumina von Erwachsenen verglichen. Bedeutsam für die Übertragungsfunktion des Mittelohres ist die Länge

des Gehörgangs wegen der davon abhängigen Resonanz bei $\lambda/4$ der Wellenlänge.

Tabelle 3.2: Ergebnisse der Ohrkanalvolumina in ml bei Kindern und Erwachsenen aus China und Deutschland

Gruppe	Ohren	25%-Q.	Median	75%-Q.	Mittel	S.D.	Sig. p
Erwachsene CN	1336	0,90	1,10	1,40	1,18	0,39	
Erw. ♀	638	0,80	1,10	1,40	1,14	0,38	
Erw. ♂	698	0,90	1,10	1,50	1,21	0,38	
Diff ♂-♀		0,10	0,00	0,10	0,07		<0,001
links	668	0,90	1,00	1,40	1,14	0,38	
rechts	668	0,90	1,10	1,50	1,22	0,39	
Diff L-R	668	0,00	-0,10	-0,10	-0,08	0,24	<0,001
Chin. Kinder	182	0,70	0,80	1,18	0,89	0,32	
C1 (6-8J.)	58	0,60	0,70	0,90	0,78	0,22	
C2-C1		0,10	0,10	0,40	0,16		0,005
C2 (9-12J.)	64	0,70	0,80	1,30	0,93	0,32	
C3-C2		0,00	0,00	0,00	0,05		0,417
C3 (13-14J.)	60	0,70	0,80	1,30	0,97	0,36	
C3-C1		0,10	0,10	0,40	0,21		0,001
C123 ♀	108	0,60	0,80	1,13	0,89	0,33	
C123 ♂	72	0,70	0,80	1,18	0,89	0,29	
Diff ♂-♀		0,10	0,00	0,05	0,00		0,957
linke	91	0,60	0,80	1,10	0,87	0,30	
rechte	91	0,70	0,80	1,20	0,92	0,33	
Diff L-R	91	-0,10	0,00	-0,10	-0,05	0,11	<0,001
Schüler	394	0,98	1,09	1,25	1,12	0,21	
D1 (6-8J.)	182	0,92	1,03	1,17	1,05	0,18	
D2 (9-12J.)	212	1,03	1,16	1,28	1,18	0,22	
Diff G2-G1		0,11	0,13	0,11	0,13		<0,001
D12 ♀	186	0,93	1,06	1,20	1,07	0,19	
D12 ♂	208	1,02	1,14	1,28	1,16	0,22	
Diff ♂-♀		0,09	0,08	0,08	0,09		<0,001
linke	197	0,98	1,13	1,27	1,14	0,20	
rechte	197	0,95	1,09	1,22	1,10	0,21	
Diff L-R	197	-0,06	0,05	0,14	0,04	0,15	<0,001
Erwachsene D	880	1,39	1,64	1,89	1,65	0,38	
Erw. ♀	226	1,14	1,36	1,53	1,36	0,28	
Erw. ♂	654	1,55	1,72	1,97	1,76	0,35	
Diff ♂-♀		0,41	0,36	0,44	0,40		<0,001
links	440	1,47	1,70	1,97	1,73	0,36	
rechts	440	1,34	1,59	1,80	1,58	0,36	
Diff L-R	440	0,00	0,14	0,28	0,15	0,24	<0,001

CN: China, D: Deutschland, Q.: Quantil, S.D.: Standardabw., Sig.: Signifikanz, Erw.: Erwachsene, Diff: Differenz

Aus dem Ohrkanalvolumen (ECV), das bei der tympanometrischen Messung in

cm³ oder auch in ml ermittelt wird, kann die Länge bzw. ein Längenunterschied näherungsweise abgeschätzt werden.

In Tab. 3.2 sind die Messergebnisse für die Ohrkanalvolumina (ECV: ear canal volume) aufgelistet. Die statistischen Parameter: Anzahl Ohren, 25 %-Quantil, Median und 75 %-Quantil sowie Mittelwert und Standardabweichung sind in Spalten angeordnet, während die untersuchten Gruppen zeilenweise aufgeführt sind. Diese Tab. 3.2 bildet die Grundlage für die grafischen Darstellungen der Ohrkanalvolumina im Gruppenvergleich.

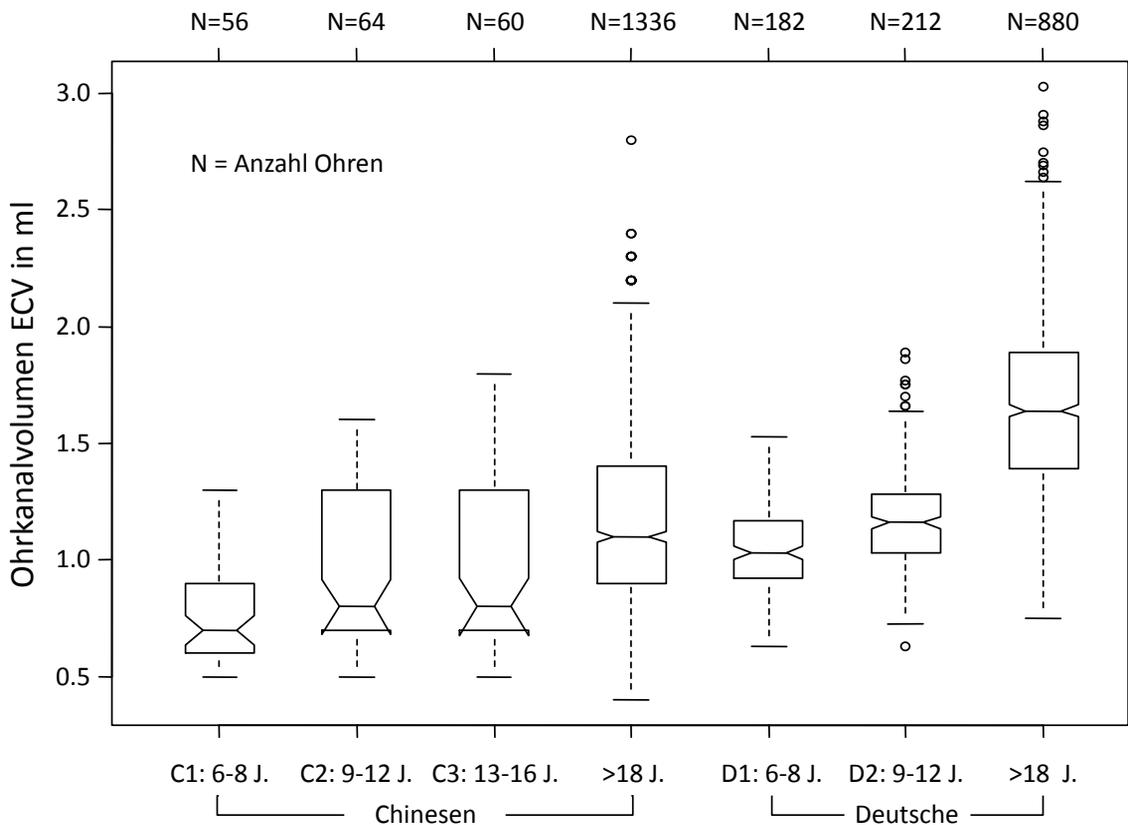


Abbildung 3.3: Ohrkanalvolumen – Vergleich von Altersgruppen aus China und Deutschland (Kinder und Erwachsene). Die Boxplotdarstellung enthält: Minima, 25%-Quantile, Mediane, 75%-Quantile, Maxima, Ausreißer und 95%-Konfidenz-Intervalle als Kerben beim Median. Nach McGill et al. (1978) unterscheiden sich 2 Mediane zu 95 % signifikant voneinander, wenn die Kerben sich nicht überlappen.

Innerhalb der untersuchten Personengruppen sind Untergruppen wie Frauen und Männer oder linkes und rechtes Ohr gebildet, deren gemittelte Messergebnisse durch Differenzbildung auf Unterschiede untersucht werden. Bei den Kindern kommen je-

weils noch die gebildeten Altersgruppen als Untergruppen hinzu (C1, C2 und C3, bzw. D1 und D2). Alle Unterschiede in den Mittelwerten sind signifikant bis auf den Gruppenvergleich der chinesischen Gruppen C2 und C3 ($p = 0,417$) und die Unterschiede beim Geschlechtsvergleich ($p = 0,957$) der chinesischen Kinder. Die anderen statistischen Parameter wie Quartile bzw. Median sind in den Abbildungen 3.3, 3.4 und 3.5 in Boxplotdarstellung grafisch aufbereitet.

In Abb. 3.3 sind die Ohrkanalvolumina der unterschiedlichen Altersgruppen, beide Geschlechter zusammen und beide Ohren gemeinsam, einander gegenübergestellt. Beim Vergleich der Medianwerte der einzelnen Gruppen zeigt sich, dass chinesische Kinder (C1: ECV = 0,7 ml, C2 und C3: ECV = 0,8 ml) kleinere Ohrkanalvolumina haben als deutsche Kinder (D1: ECV = 1,03 ml und D2: ECV = 1,16 ml). Die Gruppen C2 und C3 aber erreichen im 75%-Quartil mit ECV = 1,3 ml schon nahezu die Werte der chinesischen Erwachsenen (ECV = 1,4 ml) und übertreffen damit die ältere deutsche Gruppe D2 (ECV = 1,28 ml), wenn auch knapp. Die Boxen der Gruppen C2 und C3 sind identisch und nur das Maximum von C3 liegt mit ECV = 1,8 ml etwa zwischen dem Ergebnis von C2 (ECV = 1,6 ml) und dem der chinesischen Erwachsenen Personen (ECV = 2,1 ml). Das Ohrkanalvolumen der chinesischen Erwachsenen ist im Median (ECV = 1,1 ml) allerdings deutlich und signifikant größer als das der chinesischen Kinder.

Bei den chinesischen Altersgruppen C2 und C3 sind die unteren Boxgrenzen mit Überschneidung zu erkennen, die daher rühren, dass das Konfidenzintervall größer ist, als der Unterschied von 1. Quartil und Median.

Beim Vergleich der deutschen Altersgruppen in Abb. 3.3 zeigt der Median jeweils deutlich signifikante Unterschiede im Altersverlauf. Besonders auffällig ist, dass die gesamte Box (mit 50 % aller Untersuchten) der deutschen Erwachsenen oberhalb derer der Kindergruppen liegt. Demgegenüber ist es so, dass bei der jüngsten chinesischen Altergruppe C1 das 75%-Quartil (ECV = 0,9 ml) mit dem 25%-Quartil der chinesischen Erwachsenen zusammenfällt. Ebenso ist es erstaunlich, dass die ältere deutsche Schülergruppe D2 mit ECV = 1,16 ml) signifikant größere Volumina hat als die chinesischen Erwachsenen (ECV = 1,1 ml).

Nach Geschlecht getrennt darstellt, ergibt sich das in Abb. 3.4 gezeigte Bild. Bei den chinesischen Mädchen und Jungen (ECV = 0,8 ml) und zwischen chinesischen Frauen und Männern (ECV = 1,1 ml) gibt es keine Unterschiede im Median, auch wenn die Mittelwerte der Erwachsenen im Gegensatz zu den Kindern (siehe Tab.

3.2 in den Zeilen: Diff $\sigma-\varphi$) signifikant verschieden sind. Sowohl Median als auch Mittelwert der Ohrkanalvolumina sind bei chinesischen Mädchen und Jungen gleich groß. Dagegen sind die Quartile der Jungen sind etwas größer als die der Mädchen.

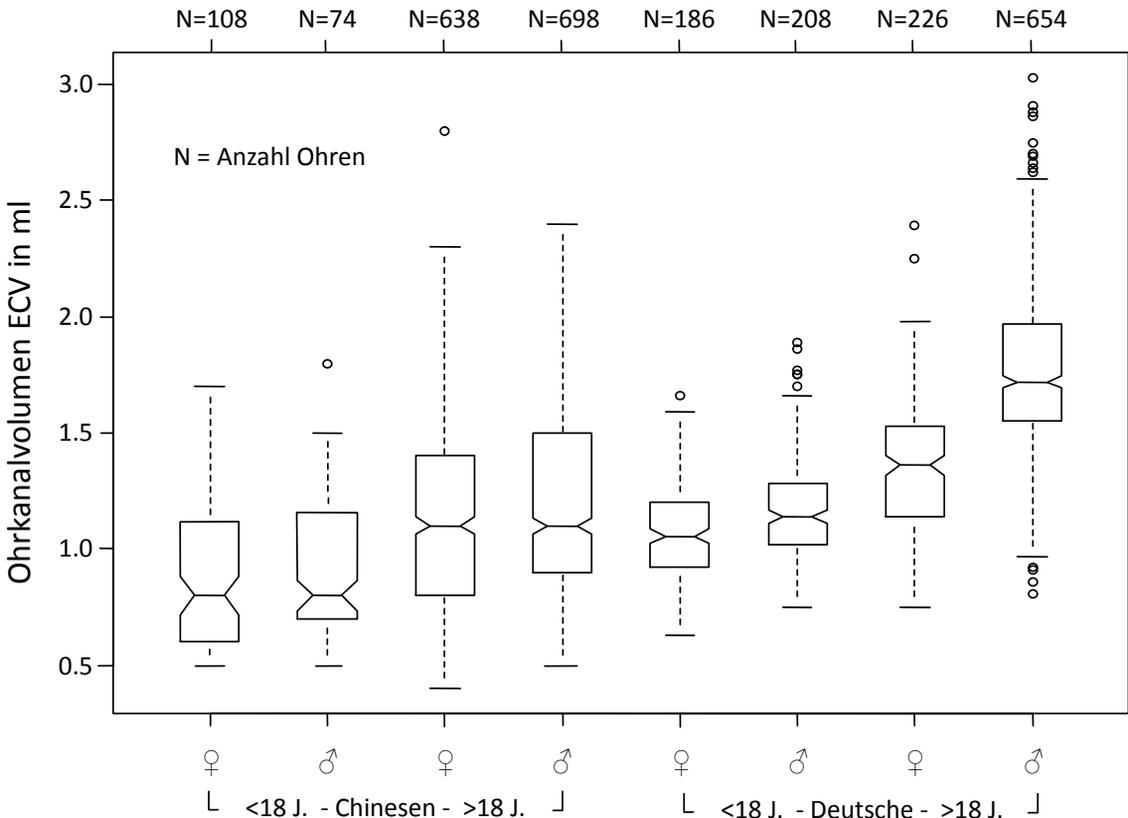


Abbildung 3.4: Ohrkanalvolumen – Geschlechts-Vergleich bei Kindern und Erwachsenen aus China und Deutschland. Die Boxplotdarstellung enthält: Minima, 25%-Quantile, Mediane, 75%-Quantile, Maxima, Ausreißer und 95%-Konfidenz-Interwalle als Kerben beim Median. Nach McGill et al. (1978) unterscheiden sich 2 Mediane zu 95 % signifikant voneinander, wenn die Kerben sich nicht überlappen.

Bei den deutschen Gruppen gibt es eine klare Reihenfolge nach Größe angeordnet, beginnend bei klein: Mädchen (ECV = 1,06 ml) < Jungen (ECV = 1,14 ml) < Frauen (ECV = 1,36 ml) < Männer (ECV = 1,72 ml). Alle Gruppen sind nicht nur im Mittelwert sondern auch im Median signifikant unterschiedlich.

Auffallend ist, dass das 25%-Quantil (1,55 ml) der deutschen Männer größer ist als das 75%-Quantil (1,5 ml) der chinesischen Männer, d. h. die ganzen Boxen haben keine Überschneidung. Der Vergleich der chinesischen mit den deutschen Frauen

fällt demgegenüber nicht so deutlich aus, da sich deren Boxen zum größten Teil überschneiden. Im Median haben die deutschen Frauen mit einem ECV = 1,36 ml allerdings signifikant größere Ohrkanalvolumina als die chinesischen Frauen (1,1 ml).

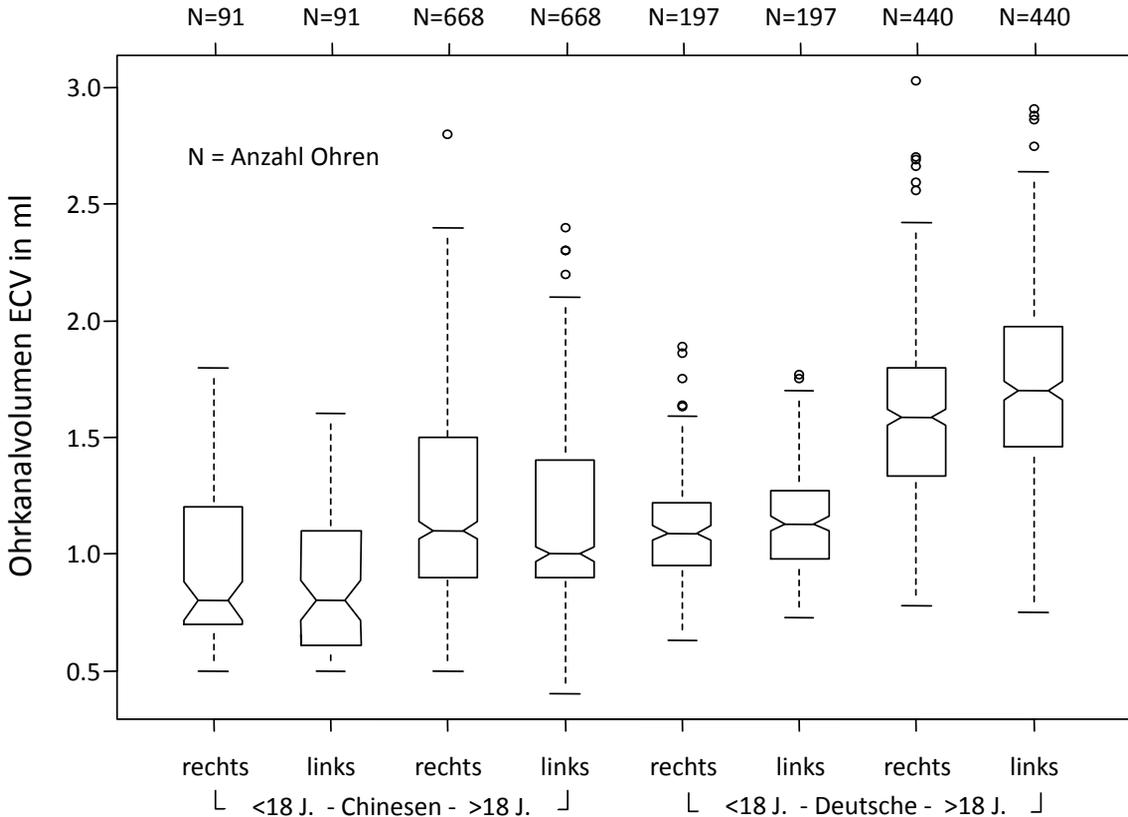


Abbildung 3.5: Ohrkanalvolumen – rechts/links-Vergleich bei Kindern und Erwachsenen aus China und Deutschland. Die Boxplotdarstellung enthält: Minima, 25%-Quantile, Mediane, 75%-Quantile, Maxima, Ausreißer und 95%-Konfidenz-Intervalle als Kerben beim Median. Nach McGill et al. (1978) unterscheiden sich 2 Mediane zu 95 % signifikant voneinander, wenn die Kerben sich nicht überlappen.

Der Seitenvergleich zwischen rechtem und linkem Ohr zeigt hochsignifikante Unterschiede ($p < 0,001$) im Mittelwert (siehe Tab. 3.2). Bei den chinesischen Ohren ist jeweils das rechte Ohrkanalvolumen größer und zwar bei den Kindern um 0,05 ml und bei den Erwachsenen um 0,08 ml. Dagegen ist das linke Ohrkanalvolumen bei den deutschen Kindern um 0,04 ml größer und bei den deutschen Erwachsenen sogar um 0,15 ml. Beim grafischen Vergleich des Medians sind die Unterschiede bei den

Erwachsenen ebenfalls signifikant (siehe Abb. 3.5), während diese bei den Kindern nicht signifikant sind. Bei den chinesischen Kindern ist der Median des Ohrkanalvolumens auf beiden Ohren gleich bzw. $< 0,05$ ml. Das dürfte ein Effekt der Rundung sein, da die Ohrkanalvolumina der chinesischen Kohorte nur auf eine Dezimalstelle genau gemessen wurden.

3.1.3 Ohrkanalvolumina mit unterschiedlichen Stöpseln

Die deutlichen Unterschiede im internationalen Vergleich gerade der erwachsenen Personen legt vergleichende Messungen mit den unterschiedlichen Stöpseltypen nahe. Das Tympanometer MI 26 von Maico, das in China verwendet wurde, war mit Universalstöpseln ausgestattet, die einen eher halbkugelförmigen Schirm haben und im Folgenden mit Stöpsel 1 bezeichnet werden. Demgegenüber wurden für das GSI 38 von Grason Stadler Stöpsel vom Hersteller und Distributer empfohlen und verwendet, die über einen abgeflachten Schirm verfügen und als Stöpsel 2 bezeichnet werden. Die Universalstöpsel werden firmenseitig sowohl für die Tympanometrie als auch für die Messung von otoakustischen Emissionen empfohlen.

Tabelle 3.3: Stöpselvergleich der Ohrkanalvolumina in ml mit 4 Probanden, Stöpsel 1: halbrunder Schirm, Stöpsel 2, flacher Schirm

Geschlecht	weiblich				männlich			
Proband	W 1		W 2		M 3		M 4	
Stöpsel	1	2	1	2	1	2	1	2
Mittel	0,97	1,13	0,67	1,13	1,02	1,26	1,01	1,23
S.D.	0,05	0,05	0,06	0,16	0,04	0,07	0,04	0,04
5%-Q.	0,89	1,05	0,62	0,95	0,98	1,17	0,95	1,17
25%-Q.	0,94	1,10	0,62	1,02	0,98	1,22	0,98	1,20
Median	0,95	1,12	0,66	1,08	1,00	1,27	1,00	1,23
75%-Q.	1,01	1,16	0,70	1,20	1,05	1,30	1,03	1,26
95%-Q.	1,05	1,20	0,77	1,47	1,08	1,36	1,06	1,28
DiffStProb	0,16		0,46		0,24		0,22	
DiffStWM	0,31				0,23			
DiffStAlle	0,27							

S.D.: Standardabw., Q.: Quantil, DiffSt.: Differenz zwischen Stöpsel 2-1, Prob: Proband, W u. M: Geschlecht

Mit dem GSI 38 wurden mit 4 Versuchspersonen (Mädchen, Frau, Junge und Mann) die beiden unterschiedlichen Stöpselarten getestet. Jeweils 10 Messungen

wurden mit jedem Stöpsel an beiden Ohren durchgeführt, also insgesamt 160 Einzelmessungen. Es zeigte sich bei der Auswertung, dass die Unterschiede zwischen den Ohren nur gering und nicht signifikant waren. Deshalb sind die Messergebnisse in Tab. 3.3 für beide Ohren gemeinsam berechnet und in Abb. 3.6 grafisch mit Standardabweichung dargestellt. Die Unterschiede in den Mittelwerten der beiden Stöpselarten sind bei allen Probanden mit $p < 0,001$ hochsignifikant.

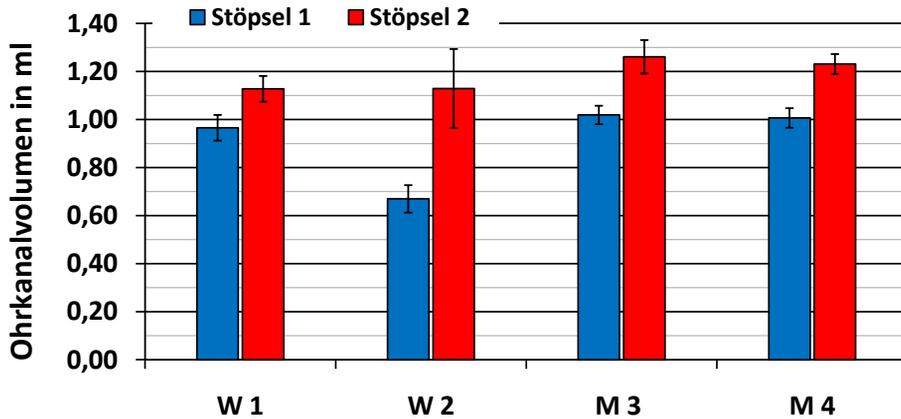


Abbildung 3.6: Stöpselvergleich der Ohrkanalvolumina in ml mit 4 Probanden, Stöpsel 1: halbrunder Schirm, Stöpsel 2: flacher Schirm

Bei allen Versuchspersonen bzw. Probanden werden mit dem abgeflachten Stöpsel größere Ohrkanalvolumina gemessen als mit den halbrunden Universal-Stöpseln. Die beiden weiblichen Probanden unterscheiden sich dadurch, dass bei Probandin W 1 der geringste gemittelte Unterschied mit 0,15 ml festgestellt wurde und bei Probandin W 2 der größte mit 0,46 ml. Die beiden männlichen Probanden haben M 3: 0,24 ml und M 4: 0,22 ml nahezu die gleichen Differenzen und liegen zwischen den beiden weiblichen Probanden. Über alle Probanden gemittelt, ergibt sich ein Unterschied von 0,27 ml um die das mit Stöpsel 2 (abgeflacht) ermittelte Ohrkanalvolumen größer ist als mit Stöpsel 1 (halbrund).

Ohne Probandin W 2 mit doppelter Differenz, ergibt sich ein gemittelter Unterschied von rund 0,2 ml. Diese mittlere Differenz ist beim Vergleich der Messungen in China mit Stöpsel 1 und in Deutschland mit Stöpsel 2 zu berücksichtigen. Nach der Korrektur sind die Ohrkanalvolumen der chinesischen Kinder mit 0,89 ml nur noch unbedeutend kleiner als bei den deutschen Kindern mit 1,14 ml (korrigiert um $-0,2$ ml gleich 0,94 ml). Das gleiche gilt für den Vergleich von deutschen Frauen ($1,36$ ml $- 0,2$ ml = 1,16 ml) mit chinesischen Frauen (1,14 ml). Dagegen ist der Un-

terschied des Ohrkanalvolumens der deutschen Männern ($ECV = 1,76$ ml, korrigiert 1,56 ml) und der chinesischen Männer ($ECV = 1,21$ ml) mit 0,55 ml fast dreimal so groß wie der durch den Stöpselvergleich ermittelte Unterschied von 0,2 ml, der wegen größerer Stöpsel bei Männern durchaus noch etwas größer ausfallen kann. Dennoch finden wir hier einen Unterschied im Ohrkanalvolumen, der nicht allein durch den Stöpseltyp verursacht ist. Solange der Stöpseltyp identisch ist, sind die erhobenen Daten selbstverständlich direkt miteinander vergleichbar.

3.2 Ergebnisse der Voraudiometrie

3.2.1 Voraudiometrie bei chinesischen Kindern

Bei der Feldstudie in China im Frühjahr 2001 war die Durchführung einer Lernphase für audiometrische Untersuchungen eingeplant worden. Wegen der hohen Anforderungen an Geräuschvermeidung bei der Audiometrie sollten alle Instruktionen dazu im Vorfeld erledigt werden. Dieser Vorgang wurde als Voraudiometrie bezeichnet und hatte zur Folge, dass von jedem Probanden für ein Ohr zwei Audiogramme erstellt wurden (immer das linke Ohr).

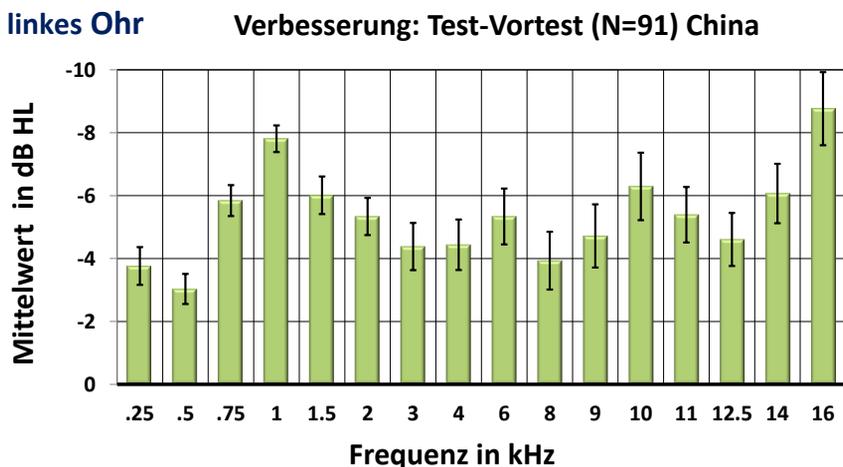


Abbildung 3.7: Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie (Differenz) bei chinesischen Kindern. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

Es zeigte sich dabei, dass in den meisten Fällen bei der eigentlichen Audiometrie deutlich bessere Hörtest-Ergebnisse ermittelt wurden. Die Abb. 3.7 zeigt die gemittelten Differenzen der chinesischen Kinder als Balkendiagramm und zwar als Verbesserungen bei allen getesteten Frequenzen mit Standardfehlerbalken. Negative Werte zeigen an, dass die Mittelwerte der Audiometrie besser sind als diejenigen der Voraudiometrie. Nicht bei allen Frequenzen sind die Verbesserungen gleich groß. Tendenziell sind hier die Verbesserungen bei hohen Frequenzen größer als bei den tiefen Frequenzen. Die geringsten Verbesserungen mit etwas mehr als 3 dB werden bei 500 Hz beobachtet und die größten Verbesserungen bei 16 kHz mit knapp 9 dB.

Es muss darauf hingewiesen werden, dass die akustischen Bedingungen bei der Voraudiometrie etwas ungünstiger waren als bei der Audiometrie, wo höhere Ansprüche an eine ruhige Umgebung gestellt wurden. D. h. teilweise sind die Verbes-

serungen auch dadurch bedingt. Im selben Raum wurde auch die Tympanometrie durchgeführt, was zu leicht höheren Pegeln der Umgebungsgeräusche führte z. Bsp. durch geflüsterte Hinweise. Es war bei diesem Vortest nicht das Anliegen, bestmögliche Testergebnisse zu erzielen, sondern den Kindern eine Erfahrung im Erkennen von reinen Tönen an der Hörschwelle zu vermitteln und sie mit dem Ablauf einer Audiometrie vertraut zu machen. Auf den Test der tiefsten Frequenz bei 125 Hz wurde verzichtet, da bei dieser Frequenz die Schalldämmung des HDA 200 mit etwa 14 dB nicht so gut ist wie bei höheren Frequenzen ab 500 Hz (siehe Tab. 2.11).

3.2.2 Voraudiometrie bei deutschen Kindern

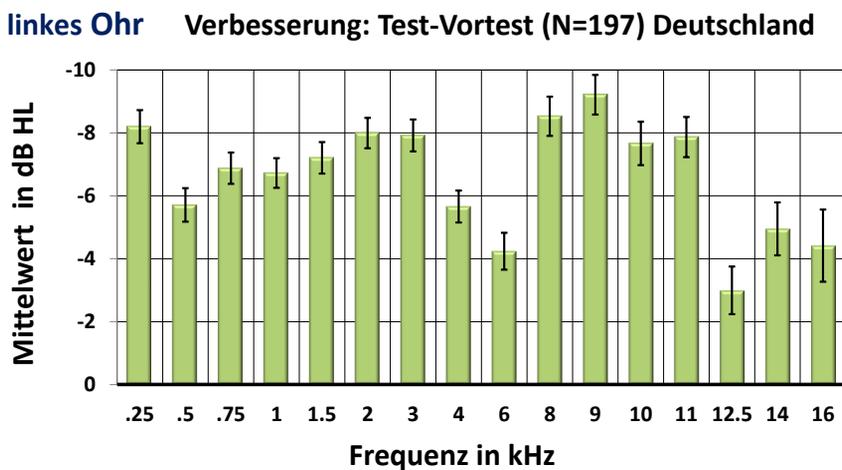


Abbildung 3.8: Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie (Differenz) bei deutschen Kindern. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

Da die Voraudiometrie in China so deutliche Verbesserungen für die anschließende Audiometrie brachte, wurde diese Vorgehensweise auch bei der Untersuchung der Schulkinder in Deutschland beibehalten. In Abb. 3.8 sind die gemittelten Differenzen zwischen der Audiometrie und der Voraudiometrie mit dem Standardfehler bei den deutschen Kindern grafisch dargestellt (Tab. 3.4 listet die entsprechenden Werte). Die Standardfehler dieser Differenzen sind mit 0,5 dB konstant im Bereich von 250 Hz bis 4 kHz. Danach vergrößern sich die Fehler bis zu 1,1 dB bei 16 kHz.

Tabelle 3.4: Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie in Deutschland

links Freq. Hz	Voraudiometrie			Audiometrie			Differenz		(N=197)
	Median dB HL	Mittel dB HL	SE dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	SE dB HL	Delta dB HL	SE dB HL	Sign. p
250	15	17,4	0,5	10	9,3	0,4	-8,1	0,5	<0,001
500	15	15,3	0,5	10	9,7	0,4	-5,6	0,5	<0,001
750	15	14,4	0,5	5	7,6	0,4	-6,9	0,5	<0,001
1000	10	13,3	0,4	5	6,6	0,4	-6,7	0,5	<0,001
1500	10	12,0	0,4	5	4,9	0,4	-7,1	0,5	<0,001
2000	10	12,5	0,4	5	4,5	0,4	-8,0	0,5	<0,001
3000	10	11,6	0,5	5	3,8	0,4	-7,8	0,5	<0,001
4000	10	10,4	0,5	5	4,8	0,4	-5,7	0,5	<0,001
6000	10	8,8	0,5	5	4,5	0,5	-4,3	0,6	<0,001
8000	15	15,0	0,7	5	6,5	0,5	-8,5	0,6	<0,001
9000	10	13,0	0,7	5	3,8	0,6	-9,3	0,6	<0,001
10000	10	11,3	0,8	0	3,5	0,6	-7,8	0,7	<0,001
11250	10	12,4	0,8	5	4,5	0,6	-7,9	0,6	<0,001
12500	5	8,4	0,8	5	5,6	0,7	-2,9	0,8	<0,001
14000	5	7,6	0,9	0	2,7	0,8	-4,9	0,8	<0,001
16000	2,5	4,0	1,1	0	-0,4	1,0	-4,4	1,1	<0,001
gemittelt		11,7			5,1		-6,6		

SE: Standardfehler, dB: Dezibel, HL: Hearing Level zur Hörschwelle (ISO 389), Delta: gemittelte Differenz, Sign. p: Signifikanz

Bei den deutschen Kindern beobachten wir etwas größere Verbesserungen in den unteren beiden Oktaven als bei den chinesischen Kindern, dafür sind diese bei den obersten Frequenzen oberhalb von 11,2 kHz geringer. Den kleinsten Wert finden wir mit $-2,9$ dB bei 12,5 kHz und den größten Wert 9,3 dB bei 9 kHz. Über alle getesteten Frequenzen gemittelt, finden wir bei den deutschen Kindern durchschnittliche Verbesserungen um 6,6 dB.

3.2.3 Zusammenfassung der Voraudiometrie

Durch die unterschiedlich ausgeprägten Verbesserungen bei chinesischen und deutschen Kindern, die ersteren mit größeren Verbesserungen bei hohen Frequenzen und die letzteren bei tiefen, sollen beide Gruppen auch noch gemeinsam dargestellt werden. Die Abbildung 3.9 zeigt die gemittelten Differenzen aller ausgewerteten Kinder in einem gemeinsamen Balkendiagramm zusammengefasst. Diese Zusammenfassung der Verbesserungen sieht etwas gleichmäßiger aus als die beiden Einzelstudien und durchschnittlich sind die Testergebnisse der Audiometrie um 6,2 dB besser als die der Voraudiometrie.

Auch wenn einzelne Probanden schlechtere Testergebnisse bei der Audiometrie hatten, ergeben sich auf die ganze Gruppe gesehen insgesamt Verbesserungen der Testergebnisse. Als Fazit ergibt sich, dass der Vortest eine gute Übung für Hörtests

darstellt und in den weitaus meisten Fällen zu verbesserten Ergebnissen bei der Audiometrie führt.

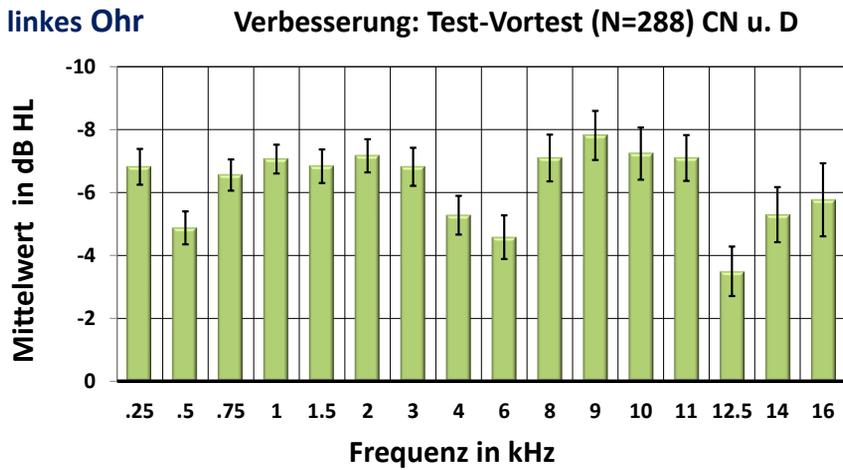


Abbildung 3.9: Verbesserung der Audiometrie nach Voraudiometrie (Differenz) bei chinesischen und deutschen Kindern. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

3.3 Ergebnisse der Audiometrie

Die Ergebnisse der Audiometrie sind in ihrer chronologischen Abfolge aufgeführt und nicht nach der Wichtigkeit der Resultate für die vorliegende Arbeit. So werden zunächst die Auswertungen der China-Expedition dargestellt. Es folgen die Ergebnisse der Querschnitt-Studie an der deutschen Grundschule und zuletzt die Resultate der Längsschnitt-Untersuchung mit einem Teil der Erstklässler der deutschen Querschnitt-Studie.

3.3.1 Feldstudie in China

In China wurden 2001 mehr als 1000 Hörtests durchgeführt, quer durch alle Altersgruppen und in 3 unterschiedlichen Regionen. In Tab. 3.5 sind die Audiometrie-Ergebnisse der ausgewählten chinesischen Kinder in den 3 Altersgruppen C1 (6–8 J.), C2 (9–12 J.) und C3 (13–16 J.) mit Median, Mittelwert und Standardabweichung für alle Frequenzen auf dem linken Ohr aufgelistet. Die Mittelwerte dieser Gruppen sind zusätzlich in Abb. 3.10 grafisch, ähnlich wie in einem Audiogramm, gemeinsam als Kurven dargestellt.

Aufgrund der geringen Anzahl der ausgewerteten Kinder in jeder Altersgruppe und der großen Streuung der Einzel-Ergebnisse, sind die Unterschiede in den Mittelwerten bei Gruppenvergleichen nur zum Teil signifikant. Beim Vergleich von C1 mit C2 sind die altersbedingten Unterschiede bei Frequenzen zwischen 250 Hz und 1 kHz und bei 4 kHz auf beiden Ohren signifikant ($p < 0,05$), am linken Ohr zusätzlich bei 3 kHz. Die Unterschiede zwischen den Gruppen C2 und C3 sind nur auf dem linken Ohr bei 6 kHz und 12,5 kHz signifikant, während dies auf dem rechten Ohr nur bei 2 kHz der Fall ist.

Tabelle 3.5: Audiometrie-Ergebnisse von chinesischen Kindern in 3 Altersgruppen gemittelt für das linke Ohr mit Standardabweichung

links Frequenz Hz	C1: 6–8 Jahre, N=29			C2: 9–12 Jahre, N=32			C3: 13–16 Jahre, N=30		
	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL
125	15	14,3	6,9	12,5	12,7	5,4	10	11,2	6,4
250	10	12,4	5,9	10	8,8	4,4	10	10,7	5,5
500	10	12,2	5,9	7,5	8,3	4,1	10	9,2	4,9
750	10	9,5	4,3	5	5,9	4,5	5	5,5	4,2
1000	5	6,7	4,5	5	3,9	3,8	5	3,7	3,5
1500	5	6,4	5,3	5	4,1	4,7	5	4,0	4,6
2000	5	7,6	5,8	5	5,9	5,3	5	4,2	4,7
3000	5	6,9	5,4	5	5,9	5,3	5	2,7	5,2
4000	5	6,9	5,7	5	3,3	5,5	5	2,8	5,5
6000	0	2,2	4,3	0	2,3	5,2	0	0,8	5,3
8000	5	6,2	5,8	5	4,8	6,4	2,5	2,0	4,8
9000	5	5,0	6,9	2,5	2,0	6,3	0	0,8	7,1
10000	5	2,4	8,3	5	2,5	7,9	0	1,2	7,2
11200	5	7,4	13,0	2,5	2,0	6,3	5	3,3	8,6
12500	5	4,1	12,7	2,5	2,0	6,3	0	-1,5	7,6
14000	-5	-0,7	14,6	0	-0,6	9,2	-5	-3,7	8,9
16000	0	2,4	15,7	-5	-2,5	10,3	-7,5	-5,8	12,1
gemittelt		6,6			4,2			3,0	

Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level relativ zur Hörschwelle nach ISO 389

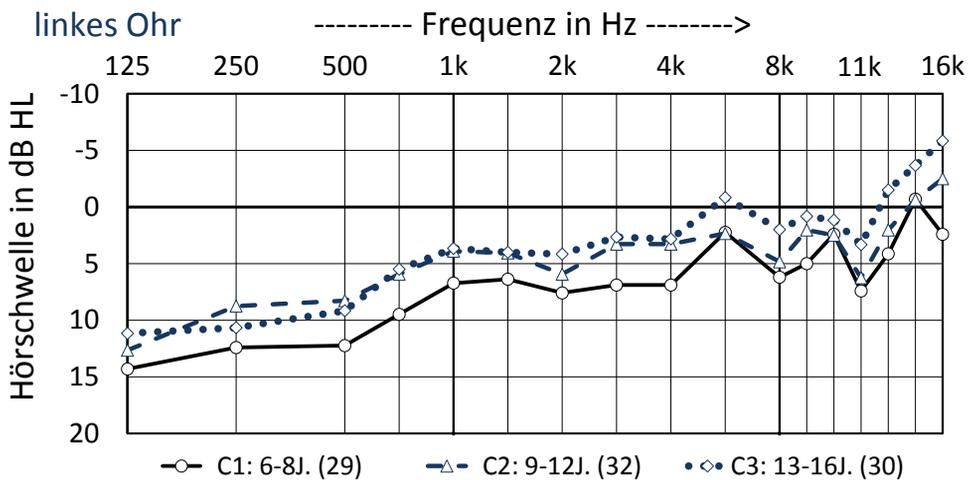


Abbildung 3.10: Gemittelte Audiogramme von chinesischen Kindern in 3 Altersgruppen für das linke Ohr. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

Tabelle 3.6: Audiometrie-Ergebnisse von chinesischen Kindern in 3 Altersgruppen gemittelt für das rechte Ohr mit Standardabweichung

rechts Frequenz Hz	C1: 6–8 Jahre, N=29			C2: 9–12 Jahre, N=32			C3: 13–16 Jahre, N=30		
	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL
125	15	14,3	5,3	10	12,0	4,6	10	10,5	5,1
250	10	11,9	4,5	10	9,2	4,0	10	8,7	4,7
500	10	10,3	5,0	5	8,0	4,2	10	8,2	5,5
750	10	8,8	3,4	5	5,9	4,3	5	5,0	5,3
1000	5	6,2	3,7	5	4,0	3,9	5	3,7	4,3
1500	5	6,0	5,1	5	5,0	4,4	5	4,2	4,9
2000	5	7,4	3,4	5	6,6	5,0	5	3,8	5,4
3000	5	6,6	4,2	5	4,8	5,6	2,5	2,3	5,2
4000	5	6,6	4,2	5	3,1	4,5	2,5	2,2	4,7
6000	5	3,3	4,1	0	2,0	5,1	0	0,3	4,7
8000	5	6,9	5,1	5	4,2	6,0	5	3,7	5,2
9000	5	4,1	6,0	5	3,6	6,4	5	3,7	6,9
10000	5	5,3	12,8	0	2,5	6,5	2,5	2,5	7,5
11200	5	7,4	13,0	5	4,8	7,3	5	2,7	8,7
12500	0	3,5	11,3	0	1,6	8,5	0	-1,2	7,3
14000	0	-1,2	12,2	-5	-2,5	8,9	-5	-4,0	9,1
16000	-5	-1,9	14,7	-5	-2,8	12,3	-5	-4,2	11,6
gemittelt		6,2			4,2			3,1	

Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level relativ zur Hörschwelle nach ISO 389

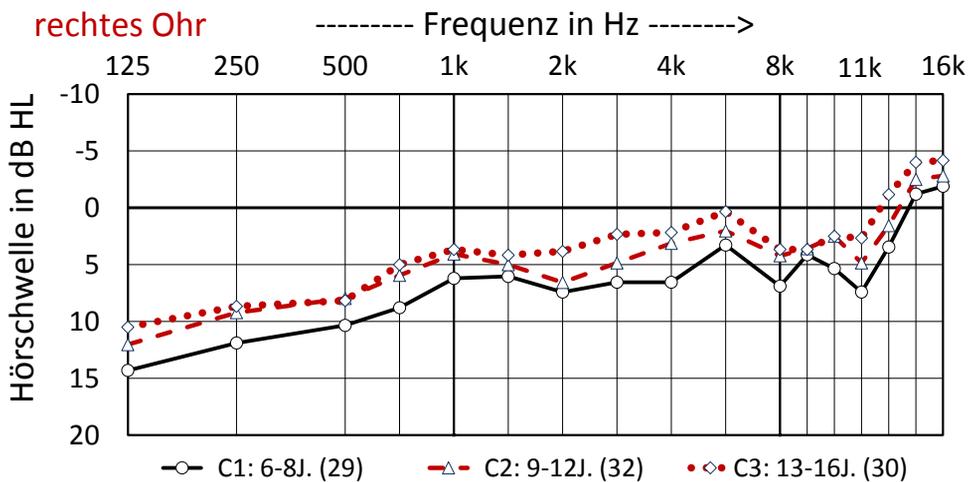


Abbildung 3.11: Gemittelte Audiogramme von chinesischen Kindern in 3 Altersgruppen für das rechte Ohr. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

Beim Vergleich von C1 mit C2 sind die altersbedingten Unterschiede bei Frequenzen zwischen 250 Hz und 1 kHz und bei 4 kHz auf beiden Ohren signifikant ($p < 0,05$), am linken Ohr zusätzlich bei 3 kHz. Die Unterschiede zwischen den Gruppen C2 und C3 sind nur auf dem linken Ohr bei 6 kHz und 12,5 kHz signifikant, während dies auf dem rechten Ohr nur bei 2 kHz der Fall ist.

Wenn man die Gruppe C1 mit der Gruppe C3 vergleicht, gibt es überwiegend signifikante Unterschiede in den Mittelwerten. Nicht signifikant ($p > 0,05$) sind auf dem linken Ohr die Frequenzen im Standardbereich bei 125 Hz, 250 Hz und 1,5 kHz und im erweiterten Hochtonbereich bei 10 kHz, 11,2 kHz und 14 kHz. Das rechte Ohr unterscheidet sich insofern, dass im gesamten erweiterten Hochtonbereich keine signifikanten Unterschiede zu finden sind, während im Standardbereich nur bei den Frequenzen von 500 Hz und 1,5 kHz die Unterschiede nicht signifikant sind.

Insgesamt ist eine klare Verbesserung der Hörschwelle mit dem Alter zu erkennen. Ebenso fällt deutlich auf, dass die tiefen Töne schlechter gehört werden als die hohen. Dieser Unterschied beträgt etwas mehr als 15 dB bei allen Gruppen und scheint damit nicht altersabhängig zu sein.

Im Durchschnitt, d. h. über alle Frequenzen arithmetisch gemittelt, hört die Gruppe C2 auf dem linken Ohr um 2,4 dB besser als die Gruppe C1. Bei Gruppe C3 verbessert sich die Hörschwelle im Schnitt nochmal um weitere 1,1 dB. Insgesamt finden wir eine Verbesserung von 3,5 dB zwischen den Altersgruppen C1 und C3.

Beim rechten Ohr (siehe Tab. 3.6 und Abb. 3.11) sehen wir vergleichbare Verbesserungen im Altersverlauf. Die durchschnittliche Verbesserung zwischen C1 und C2 beträgt rechts 2,0 dB und zwischen C2 und C3 wie beim linken Ohr ebenfalls 1,1 dB. Zwischen den Gruppen C1 und C3 ergibt sich eine Verbesserung von durchschnittlich 3,1 dB und fällt etwas geringer aus als beim linken Ohr.

3.3.2 Querschnitt-Studie in Deutschland

197 otologisch normale Grundschüler in Deutschland wurden bei der Querschnitt-Studie in zwei Altersgruppen unterteilt. 91 Kinder bilden die jüngere Gruppe D1 zwischen 6 und 8 Jahren und einem Durchschnittsalter von 7,4 Jahren. Die ältere Gruppe D2 mit 106 Kindern im Alter zwischen 9 und 12 Jahren haben ein Durchschnittsalter von 10,3 Jahren. Die durchschnittliche Altersdifferenz der beiden Gruppen beträgt 2,9 Jahre.

Die Ergebnisse der Querschnitt-Studie sind für das linke Ohr in Tab. 3.7 gelistet und in Abb. 3.12 grafisch dargestellt. Für das rechte Ohr sind die Daten in Tab. 3.8 und Abb. 3.13 aufgeführt bzw. dargestellt. Am linken Ohr betragen die über alle Frequenzen arithmetisch gemittelten Differenzen 3,6 dB und am rechten Ohr 3,5 dB.

Wenn wir die Differenzen für alle Frequenz betrachten, stellen wir fest, dass die ältere Gruppe D2 (9–12 Jahre) auf dem rechten Ohr bei allen Frequenzen signifikant besser hört ($p < 0,05$) als die jüngere Gruppe D1 (6–8 Jahre). Auf dem linken Ohr sind alle Differenzen bis auf eine Ausnahme bei 16 kHz ($p = 0,09$) ebenfalls signifikant. Die Signifikanzen wurden mit einem T-Test für unabhängige Stichproben berechnet.

Die Messergebnisse der Audiometrie mit den Standardabweichungen sind den Tabellen 3.7 und 3.8 zu entnehmen. Wie schon bei den chinesischen Kindern beschrieben, fällt beim Verlauf der Kurven auf, dass bei tiefen Frequenzen schlechtere Hörschwellenwerte vorliegen als bei hohen Frequenzen. Die Kurven verlaufen etwas flacher als bei den chinesischen Kohorten. Die Gruppenkurven der Altersgruppen D1 und D2 verlaufen dabei nahezu parallel. Multivariate Testanalysen ergeben allerdings merkliche Unterschiede in den Kurvenformen.

Auf dem rechten Ohr sind die durchschnittlichen Schwellwerte marginal besser als auf dem linken Ohr. Bei der jüngeren Altergruppe beträgt dieser Unterschied 0,1 dB und bei der älteren Gruppe 0,2 dB. Die altersbezogenen Verbesserungen der Hörschwelle zwischen den Altersgruppen sind 0,1 dB auf dem rechten Ohr besser als auf dem linken Ohr. Die Kurvenformen beim Vergleich der beiden Ohren, zeigen eine große Ähnlichkeit.

Auffällig sind die beiden „Einbrüche“ bei 8 und 12,5 kHz um 2–3 dB, die den sonst relativ glatten Verlauf etwas stören. Möglicherweise sind diese Abweichungen auf Resonanzeffekte zwischen dem geschlossenen Kopfhörer und den kindlichen Gehörgängen zurückzuführen. Der Frequenzgang der Wandler (HDA 200) wird für das erwachsene Ohr korrigiert und nicht für das kindliche. Bei den chinesischen Kindern sind diese Einbrüche ebenfalls zu beobachten (Abb. 3.10 und 3.11), allerdings liegt der 2. Wert nicht bei 12,5 kHz sondern bei 11,2 kHz.

Tabelle 3.7: Audiometrie-Ergebnisse von deutschen Kindern in 2 Altersgruppen gemittelt für das linke Ohr mit Standardabweichung

Schüler Frequenz Hz	D1: 6–8 Jahre (N=91)			D2: 9–12 Jahre (N=106)			linkes Ohr	
	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Delta dB HL	Sign. p
125	10	13,1	5,2	10	9,3	5,5	-3,8	<0,001
250	10	11,2	5,7	5	7,8	5,2	-3,3	<0,001
500	10	11,3	5,7	10	8,1	5,3	-3,2	<0,001
750	10	9,1	7,4	5	6,1	5,6	-2,9	<0,001
1000	5	7,6	5,3	5	5,7	5,4	-1,9	0,016
1500	5	6,4	5,5	5	3,3	4,8	-3,2	<0,001
2000	5	5,8	5,5	5	3,3	5,3	-2,5	0,001
3000	5	5,3	5,2	0	2,3	4,9	-3,0	<0,001
4000	5	5,9	5,4	5	3,8	6,0	-2,1	0,011
6000	5	6,2	6,5	5	2,9	5,9	-3,3	<0,001
8000	10	9,3	7,8	5	3,9	6,3	-5,4	<0,001
9000	5	6,6	8,7	0	1,4	6,2	-5,2	<0,001
10000	5	6,2	9,0	0	1,3	6,1	-4,9	<0,001
11200	5	6,8	9,9	0	2,4	6,7	-4,4	<0,001
12500	5	7,9	11,0	2,5	3,1	8,4	-4,8	0,001
14000	5	4,7	10,9	0	0,6	9,3	-4,1	0,005
16000	0	1,3	14,5	-5	-2,1	13,5	-3,4	0,090
gemittelt		7,4			3,7		-3,6	

S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level zur Hörschwelle (ISO 389), Delta: gemittelte Differenz, Sign.: Signifikanz

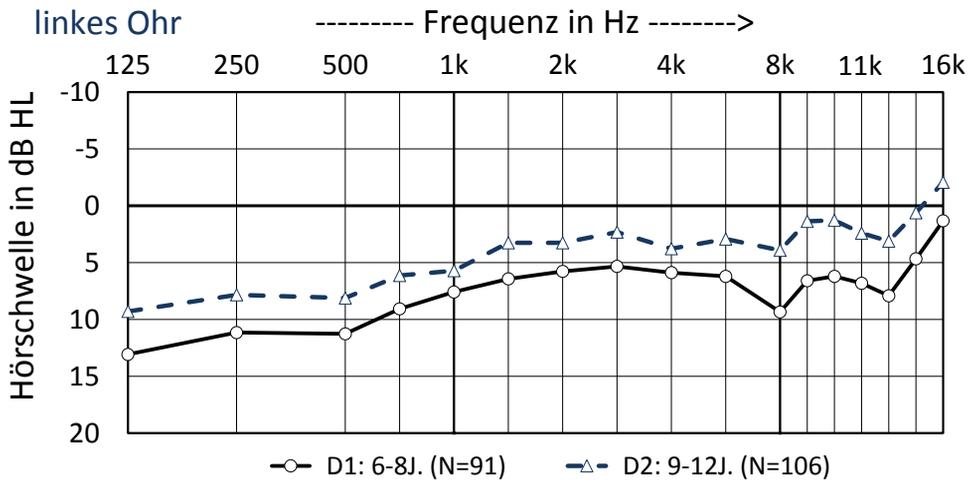


Abbildung 3.12: Gemittelte Audiogramme von deutschen Kindern in 2 Altersgruppen für das linke Ohr. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

Tabelle 3.8: Audiometrie-Ergebnisse von deutschen Kindern in 2 Altersgruppen gemittelt für das rechte Ohr mit Standardabweichung

Schüler Frequenz Hz	D1: 6–8 Jahre (N=91)			D2: 9–12 Jahre (N=106)			rechtes Ohr	
	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Delta dB HL	Sign. p
125	10	12,8	6,1	10	9,4	4,8	-3,4	<0,001
250	10	10,5	5,6	7,5	8,0	4,2	-2,5	0,001
500	10	10,4	5,0	10	8,4	4,0	-2,0	0,002
750	10	9,6	5,5	5	7,2	4,5	-2,4	0,001
1000	10	8,5	4,6	5	6,8	4,8	-1,7	0,014
1500	5	6,4	5,5	5	3,3	4,8	-3,1	<0,001
2000	5	5,2	5,0	5	3,4	4,8	-1,8	0,009
3000	5	4,8	5,6	2,5	3,2	5,0	-1,6	0,028
4000	5	5,1	5,5	5	3,2	5,0	-1,9	0,012
6000	5	6,4	6,9	0	2,1	5,3	-4,3	<0,001
8000	10	8,7	7,9	5	4,5	6,4	-4,2	<0,001
9000	5	7,3	8,8	0	2,2	7,1	-5,1	<0,001
10000	5	4,7	8,3	0	1,0	7,5	-3,7	0,001
11200	5	5,2	8,4	0	0,9	8,2	-4,3	<0,001
12500	5	7,0	9,4	0	2,1	8,6	-4,9	<0,001
14000	0	4,1	11,2	0	-0,8	9,6	-4,9	0,001
16000	0	2,0	14,0	-5	-5,1	13,6	-7,1	<0,001
gemittelt		7,0			3,5		-3,5	

S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level zur Hörschwelle (ISO 389), Delta: gemittelte Differenz, Sign.: Signifikanz

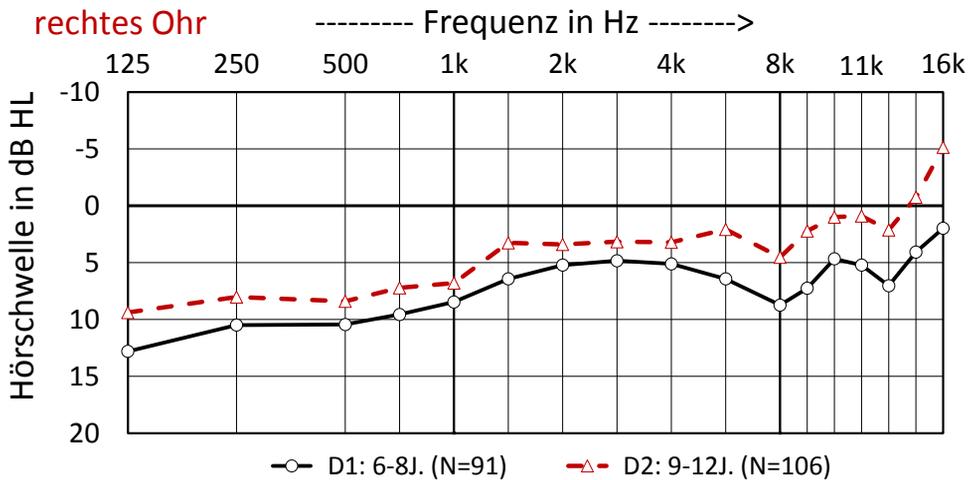


Abbildung 3.13: Gemittelte Audiogramme von deutschen Kindern in 2 Altersgruppen für das rechte Ohr. (HL: Hearing Level, also relativ zur Normhörschwelle)

3.3.3 Geschlechtsunterschiede

Wenn man die Ergebnisse für Mädchen und Jungen getrennt aufführt, lässt sich festzustellen, dass insbesondere bei der jüngeren Gruppe D1 die Jungen deutlich besser hören als die Mädchen. Das betrifft vor allem die tiefen und mittleren Frequenzen zu (links bis 3 kHz und rechts bis 2 kHz), wo diese Unterschiede signifikant sind.

Tabelle 3.9: Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Altersgruppe D1

D1	Mädchen 6–8 Jahre (N=37)				Jungen 6–8 Jahre (N=54)			
	linkes Ohr		rechtes Ohr		linkes Ohr		rechtes Ohr	
Frequenz	Mittel	S.D.	Mittel	S.D.	Mittel	S.D.	Mittel	S.D.
Hz	dB HL	dB HL	dB HL	dB HL	dB HL	dB HL	dB HL	dB HL
125	15,0	5,8	14,9	5,4	11,8	4,2	11,4	6,1
250	13,8	6,6	12,8	5,8	9,4	4,2	8,9	5,0
500	13,9	6,6	13,0	4,9	9,4	4,2	8,7	4,3
750	11,5	5,8	12,4	6,1	7,4	4,5	7,6	4,1
1000	10,3	5,8	10,5	4,9	5,7	4,0	7,0	3,8
1500	9,3	5,5	9,3	5,5	4,4	4,5	4,4	4,5
2000	7,6	6,3	7,4	5,5	4,5	4,5	3,7	3,9
3000	6,9	5,9	5,8	5,8	4,3	4,5	4,2	5,4
4000	6,5	6,1	6,4	5,7	5,5	4,7	4,3	5,2
6000	7,4	6,8	8,0	7,5	5,4	6,1	5,4	6,3
8000	10,7	7,3	9,7	8,8	8,4	8,0	8,1	7,1
9000	7,3	7,9	8,2	8,9	6,1	9,2	6,6	8,7
10000	5,8	8,5	5,1	7,6	6,5	9,4	4,4	8,8
11200	6,1	8,7	5,7	8,8	7,3	10,6	4,9	8,1
12500	7,0	10,5	7,7	9,5	8,5	11,3	6,6	9,3
14000	4,2	9,9	5,1	12,3	5,0	11,5	3,3	10,4
16000	-0,7	13,2	2,8	14,4	2,7	15,1	1,4	13,8
gemittelt	8,4		8,5		6,6		5,9	

Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level relativ zur Hörschwelle nach ISO 389
Signifikant ($p < 0,05$) bessere Schwellwerte im Vergleich zum jeweils anderen Geschlecht sind fett dargestellt!

In Tab. 3.9 und Tab. 3.10 sind signifikant ($p < 0,05$) bessere Werte beim Geschlechtsvergleich derselben Altersgruppe auf dem jeweiligen Ohr fett dargestellt. Die Unterschiede des Hörvermögens in dB durch Differenzbildung zwischen Mädchen und Jungen werden zusätzlich in Abb. 3.14 und Abb. 3.15 dargestellt und als Δ (delta) bezeichnet. Die senkrechte Mittellinie bedeutet gleiche Schwellen von Mädchen und Jungen. Balken nach links zeigen besseres Hören der Mädchen und nach rechts besseres Hören der Jungen an. Bei Frequenzen größer als 9 kHz hören die Mädchen auf dem linken Ohr besser und auf dem rechten Ohr schlechter als die Jungen.

Durchschnittlich hören die Jungen der Gruppe D1 (6–8 J.) um 1,8 dB besser mit dem linken Ohr als die Mädchen und um 2,5 dB besser mit dem rechten Ohr.

Der Geschlechtsvergleich der Altersgruppe D2 ist in Tab. 3.10 Abb. 3.15 dargestellt. Die Unterschiede werden geringer und sind bei weniger Frequenzen signifikant. Das Hörvermögen der Mädchen verbessert sich stärker mit dem Alter als das der Jungen. Das betrifft besonders die Frequenzen oberhalb von 10 kHz auf dem rechten Ohr. Beim linken Ohr hören die Mädchen der Gruppe D2 dagegen erst ab 14 kHz besser als die Jungen. Bei 6 kHz hören die Mädchen ebenfalls ein wenig besser.

Tabelle 3.10: Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen bei Altersgruppe D2

D2 Frequenz Hz	Mädchen 9–12 Jahre (N=56)				Jungen 9–12 Jahre (N=50)			
	linkes Ohr		rechtes Ohr		linkes Ohr		rechtes Ohr	
	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL
125	9,6	5,3	9,7	4,9	8,9	5,7	9,0	4,6
250	8,1	5,3	8,8	4,1	7,5	5,1	7,2	4,1
500	8,8	4,9	9,0	3,8	7,3	5,7	7,7	4,1
750	7,1	5,6	8,3	4,8	5,1	5,5	6,0	3,7
1000	7,0	5,9	8,5	4,8	4,3	4,5	4,9	3,9
1500	4,7	4,9	4,7	4,9	1,6	4,2	1,6	4,2
2000	4,5	4,8	5,1	4,9	1,9	5,5	1,5	3,9
3000	3,0	4,9	4,3	5,5	1,5	4,8	1,9	4,1
4000	3,9	5,6	3,7	5,0	3,6	6,3	2,7	5,0
6000	2,9	5,7	1,8	4,9	3,0	6,1	2,4	5,8
8000	5,1	6,1	5,6	5,6	2,6	6,3	3,3	6,9
9000	1,9	5,7	2,4	6,5	0,8	6,7	2,0	7,6
10000	2,0	7,0	1,4	6,5	0,5	4,7	0,5	8,4
11200	2,9	6,9	0,2	8,3	1,8	6,5	1,7	8,0
12500	3,5	8,3	0,1	7,0	2,7	8,4	4,4	9,6
14000	0,4	9,6	-3,1	8,7	0,9	9,0	1,9	9,9
16000	-4,6	12,4	-7,2	11,2	0,7	14,1	-2,8	14,5
gemittelt	4,2		3,7		3,2		3,3	

Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level relativ zur Hörschwelle nach ISO 389
Signifikant ($p < 0,05$) bessere Schwellwerte im Vergleich zum jeweils anderen Geschlecht sind fett dargestellt!

Die durchschnittlichen Unterschiede werden ebenfalls deutlich geringer, was man aus den kürzeren Balken (delta) in 3.15 gegenüber 3.14 im rechten Teil (Jungen hören besser) ablesen kann. Dafür werden die delta-Balken auf der linken Seite bei hohen Frequenzen im jeweils linken Teil (Mädchen hören besser) für das rechte Ohr (delta R) länger bzw. wandern von rechts nach links. Mit dem linken Ohr hören die Jungen jetzt über alle Frequenzen gemittelt nur noch um 1 dB besser als die Mädchen und mit dem rechten Ohr nur um 0,4 dB.

Mädchen hören besser | Jungen hören besser

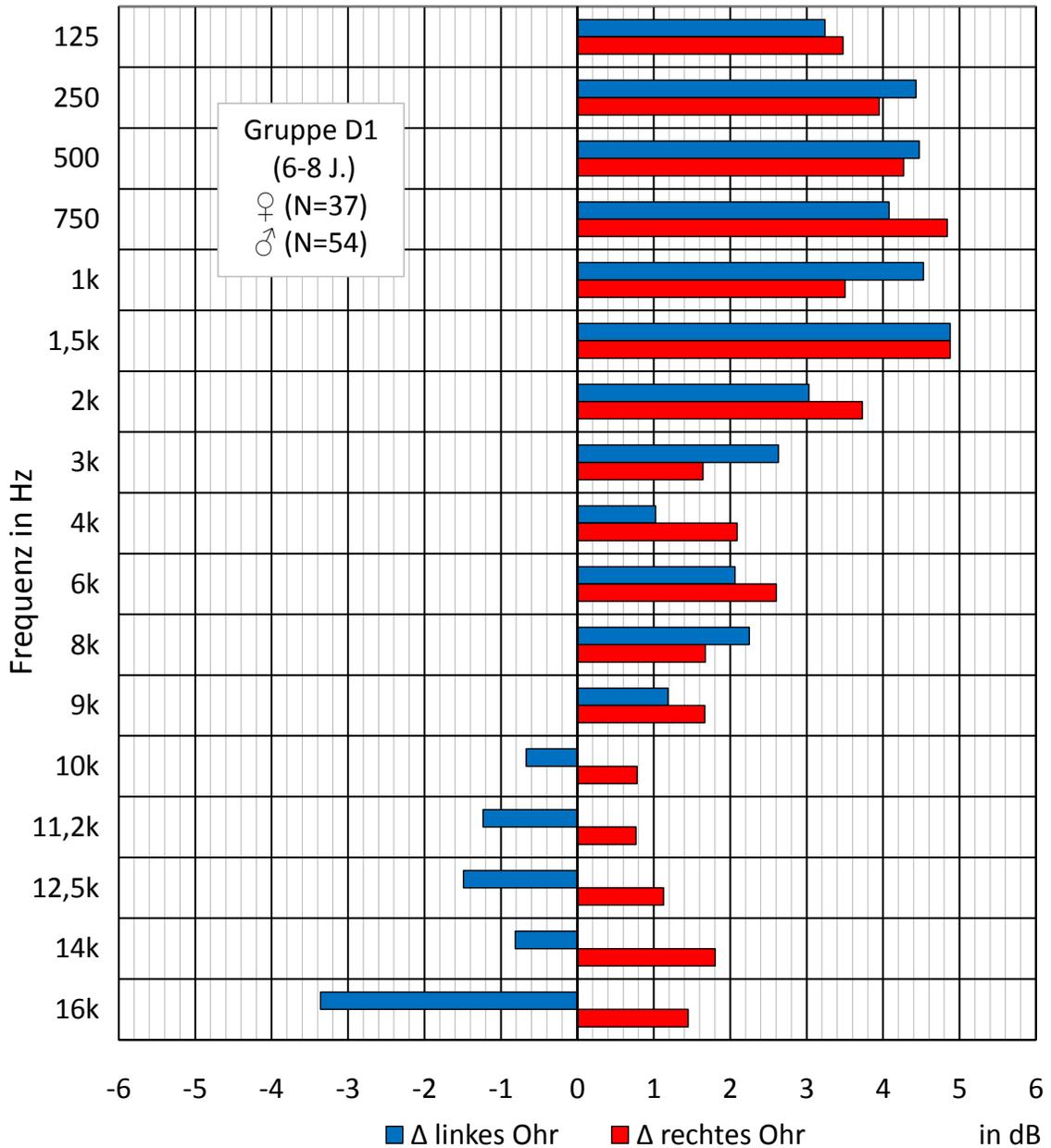


Abbildung 3.14: Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen Δ bei den Kindern der Altersgruppe D1 (6–8 J.). Bei Balken zur linken Seite: Mädchen hören besser, zur rechten Seite: Jungen hören besser.

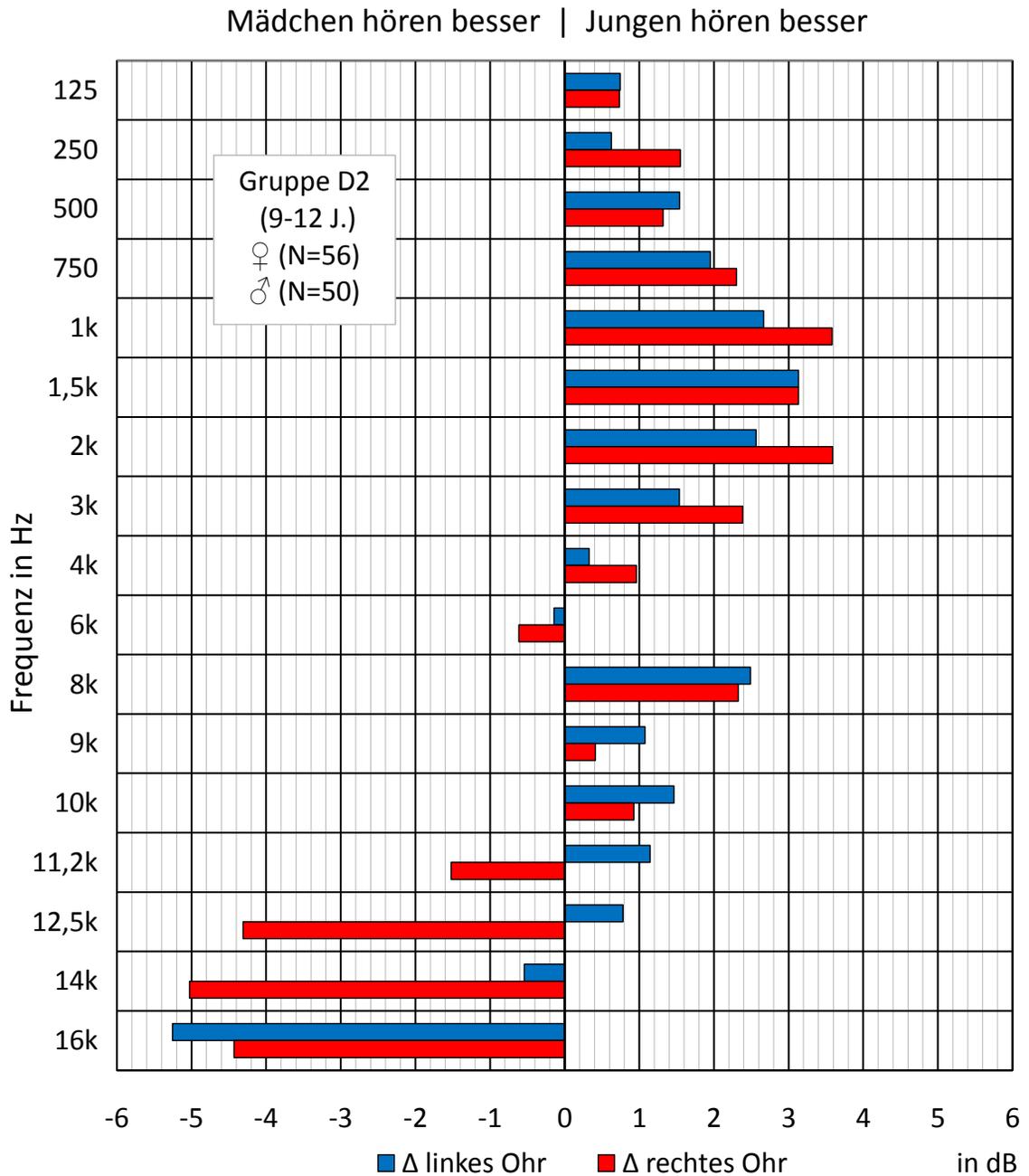


Abbildung 3.15: Geschlechtsunterschiede der Hörschwellen Δ bei den Kindern der Altersgruppe D2 (9–12 J.). Bei Balken zur linken Seite: Mädchen hören besser, zur rechten Seite: Jungen hören besser.

3.3.4 Längsschnitt-Studie in Deutschland

Drei Jahre und drei Monate nach der Querschnitt-Studie wurden 35 otologisch normale ehemalige Erstklässler ein zweites mal audiometrisch untersucht. Die Anzahl der untersuchten Teilnehmer ist damit auf etwa ein Drittel gegenüber der ersten Feldstudie gesunken. Das liegt daran, dass die Kinder der 2. Klasse aus D1 nicht mehr dabei waren, ein paar Schüler die Schule gewechselt hatten oder bei der Querschnitt-Studie nicht zu den otologisch normalen Kindern gehörten. Dafür sind die Altersunterschiede innerhalb der Gruppe bzw. Schulklasse vergleichsweise geringer. Das Alter schwankt zwischen 6,3 und 7,3 Jahren und beträgt im Schnitt 6,8 Jahre. Bei der Nachuntersuchung war die Schwankungsbreite genauso, da es sich um dieselben Kinder handelte. Das Durchschnittsalter war beim Nachtest 10,1 Jahre und die Altersdifferenz mit 3,3 Jahren nahezu ein halbes Jahr größer als zwischen den beiden Altersgruppen D1 und D2 bei der Querschnitt-Studie. Die Testergebnisse sind für die linken Ohren in Tab. 3.11 gelistet und grafisch dargestellt in Abb. 3.16 und für das rechte Ohr in Tab. 3.12 und Abb. 3.17.

Wenn wir die Ergebnisse und die Form der Kurvenverläufe der Längsschnitt-Studie mit denen der Querschnitt-Studie vergleichen, ist eine große Ähnlichkeit zu erkennen, die Senken bei 8 kHz bzw. 12,5 kHz eingeschlossen. Die durchschnittlichen Verbesserungen der Hörschwellen auf dem linken Ohr sind mit 5,2 dB deutlich größer als auf dem rechten Ohr mit 3,7 dB, die wiederum mit den Ergebnissen der Querschnitt-Studie übereinstimmen.

Wegen der geringeren Anzahl an Testpersonen (nur 35) sind die Gruppendifferenzen nicht für alle Frequenzen auf dem gewählten Niveau ($p < 0,05$) signifikant. Die Wahrscheinlichkeiten wurden mit einem verbundenen T-Test berechnet und mit einem nichtparametrischen Test für zwei verbundene Stichproben (Wilcoxon) überprüft. Dabei ergaben sich ähnliche Wahrscheinlichkeitswerte wie beim verbundenen T-Test, die deshalb nicht extra aufgeführt werden.

Auf einen Vergleich zwischen Mädchen und Jungen wird in der Längsschnittstudie verzichtet, da die 8 Mädchen gegenüber den 27 Jungen zu einer kleinen Minderheit geworden sind.

Tabelle 3.11: Ergebnisse der Längsschnitt-Studie von deutschen Schülern: vorher in der 1. Klasse – nachher in der 4. Klasse, linkes Ohr

35 Schüler Frequenz Hz	vorher in der 1. Klasse			nachher in der 4. Klasse			linkes Ohr	
	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	SD dB HL	Delta dB HL	Sign. p
125	15	12,9	4,2	10	8,4	7,7	-4,5	0,004
250	10	11,9	5,4	5	6,7	7,4	-5,2	0,001
500	10	11,9	4,0	5	6,4	6,9	-5,5	<0,001
750	10	8,9	4,5	5	6	6,6	-2,9	0,038
1000	5	6,3	4,0	5	4,9	5,5	-1,4	0,221
1500	5	4,9	5,4	0	1,4	5,7	-3,5	0,012
2000	5	5,7	5,9	0	1,1	6,2	-4,6	<0,002
3000	5	5,1	5,0	0	0,7	5,4	-4,4	<0,001
4000	5	6,1	5,1	0	0,1	6,0	-6,0	<0,001
6000	5	6,0	6,7	0	1,6	6,7	-4,4	0,054
8000	10	9,7	8,1	0	3,9	8,5	-5,8	0,004
9000	5	6,7	8,9	0	1,7	7,5	-5,0	0,013
10000	5	6,3	7,9	0	-0,7	6,9	-7,0	<0,001
11200	5	6,1	9,2	0	3,4	10,7	-2,7	0,258
12500	10	9,4	11,8	0	1,3	6,9	-8,1	0,001
14000	5	5,9	11,7	-5	-1,7	10,0	-7,6	0,005
16000	-5	1,1	16,2	-10	-8,9	10,1	-10,0	0,003
gemittelt		7,3			2,1		-5,2	

S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level zur Hörschwelle (ISO 389), Delta: gemittelte Differenz, Sign.: Signifikanz

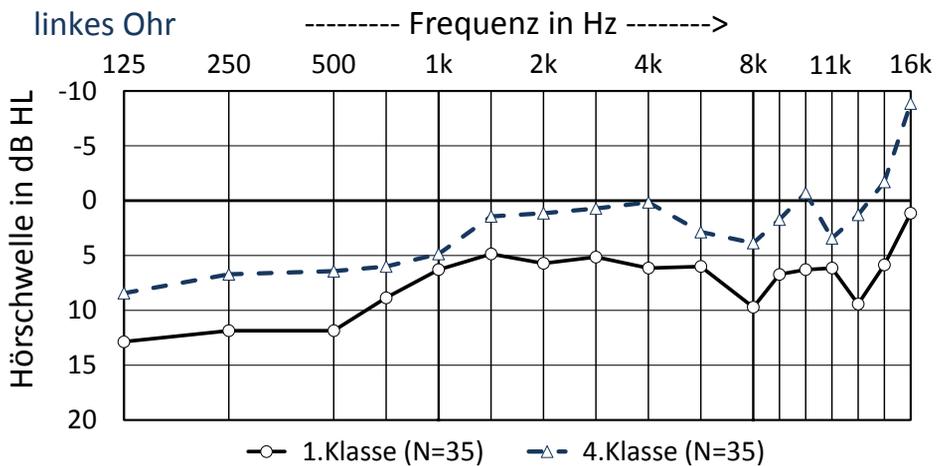


Abbildung 3.16: Audiogramm-Vergleich im Längsschnitt deutscher Schüler: vorher in der 1. Klasse – nachher in der 4. Klasse, linkes Ohr. (HL: Hearing Level)

Tabelle 3.12: Ergebnisse der Längsschnitt-Studie von deutschen Schülern: vorher in der 1. Klasse – nachher in der 4. Klasse, rechtes Ohr

35 Schüler Frequenz Hz	vorher in der 1. Klasse			nachher in der 4. Klasse			rechtes Ohr	
	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Median dB HL	Mittel dB HL	S.D. dB HL	Delta dB HL	Sign. p
125	10	12,0	6,3	10	9,6	6,6	-2,4	0,121
250	10	10,0	5,5	10	8,3	5,5	-1,7	0,195
500	10	10,3	4,5	5	6,4	5,9	-3,9	0,003
750	5	8,7	5,4	5	6,1	6,1	-2,6	0,066
1000	5	7,6	4,7	5	4,6	6,3	-3,0	0,026
1500	5	4,9	5,4	5	3,0	5,9	-1,9	0,174
2000	5	4,6	4,7	5	2,0	5,4	-2,6	0,036
3000	5	4,6	4,8	0	2,0	5,6	-2,6	0,044
4000	5	5,7	5,9	0	0,6	5,6	-5,1	<0,001
6000	5	6,9	7,2	5	2,9	6,7	-4,0	0,019
8000	10	9,1	8,0	5	5,0	8,9	-4,1	0,044
9000	5	8,3	9,4	0	3,7	8,2	-4,6	0,034
10000	5	6,1	9,6	0	0,3	7,1	-5,8	0,005
11200	0	5,4	9,4	5	3,3	7,1	-2,1	0,286
12500	5	8,4	11,4	0	1,9	9,0	-6,5	0,009
14000	0	4,0	11,9	-5	-0,7	11,5	-4,7	0,097
16000	-5	-0,9	13,5	-10	-6,3	12,9	-5,4	0,091
gemittelt		6,8			3,1		-3,7	

S.D.: Standardabweichung, dB: Dezibel, HL: Hearing Level zur Hörschwelle (ISO 389), Delta: gemittelte Differenz, Sign.: Signifikanz

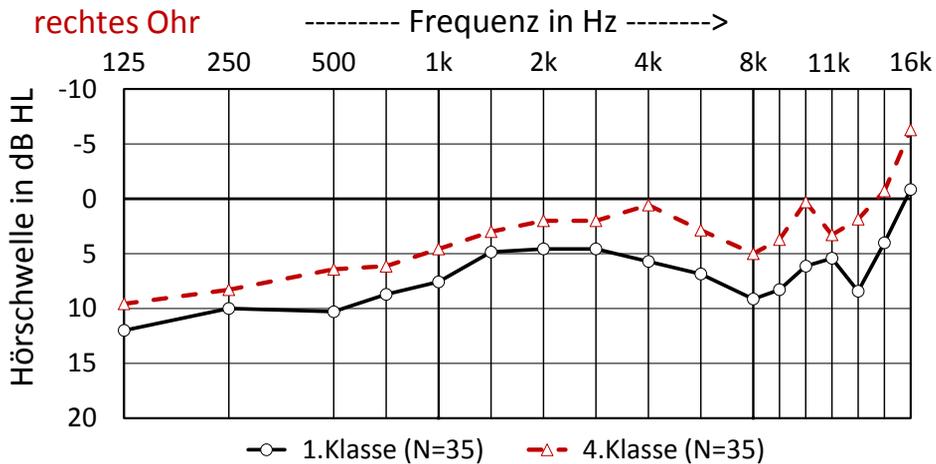


Abbildung 3.17: Audiogramm-Vergleich im Längsschnitt deutscher Schüler: vorher in der 1. Klasse – nachher in der 4. Klasse, rechtes Ohr. (HL: Hearing Level)

3.3.5 Alterskorrektur

Aus den Ergebnissen der Querschnitt-Studie lassen sich Korrekturwerte ableiten, die einen altersunabhängigen Vergleich der Hörfähigkeit ermöglichen, wie es im Kapitel Methoden unter Alterskorrektur beschrieben wurde.

In einem vereinfachenden ersten Schritt werden die Schwellwerte für die einzelnen Frequenzen in den Altersgruppen D1 (6–8 J.) und D2 (9–12 J.) als gültige Alterslinien für das zugehörige Alter angenommen, nachdem die Werte der beiden Ohren noch zusammengefasst worden sind. Dabei wird angenommen, dass beide Ohren idealerweise gleich gut hören und die Änderung pro Jahr bei jeder Frequenz immer dieselbe ist. Nicht berücksichtigt wird hier der geschlechtsbezogene Unterschied der Verbesserungen.

Tabelle 3.13: Lineare Alterskorrekturwerte für Kinder von 5 – 12 Jahre

Korrekturwerte im Jahresabstand								
Frequenz	5	6	7	8	9	10	11	12
Hz	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre	Jahre
125	15,34	14,14	12,94	11,74	10,54	9,34	8,14	6,94
250	12,75	11,79	10,82	9,85	8,89	7,92	6,95	5,99
500	12,58	11,72	10,85	9,98	9,12	8,25	7,38	6,52
750	11,07	10,19	9,31	8,43	7,55	6,67	5,79	4,91
1000	9,20	8,61	8,02	7,43	6,84	6,25	5,66	5,07
1500	8,55	7,49	6,43	5,37	4,31	3,25	2,19	1,13
2000	6,93	6,21	5,49	4,77	4,05	3,33	2,61	1,89
3000	6,64	5,86	5,08	4,30	3,52	2,74	1,96	1,18
4000	6,82	6,16	5,49	4,82	4,16	3,49	2,82	2,16
6000	8,87	7,59	6,32	5,05	3,77	2,50	1,23	-0,05
8000	12,25	10,65	9,04	7,43	5,83	4,22	2,61	1,01
9000	10,34	8,63	6,92	5,21	3,50	1,79	0,08	-1,63
10000	8,31	6,88	5,44	4,00	2,57	1,13	-0,31	-1,74
11200	8,93	7,48	6,02	4,56	3,11	1,65	0,19	-1,26
12500	10,70	9,09	7,47	5,85	4,24	2,62	1,00	-0,61
14000	7,33	5,85	4,37	2,89	1,41	-0,07	-1,55	-3,03
16000	5,16	3,40	1,65	-0,10	-1,86	-3,61	-5,36	-7,12
gemittelt	9,52	8,34	7,16	5,98	4,80	3,62	2,43	1,26

Die letzte Zeile zeigt die gibt die mittleren Abweichungen von der Normhörschwelle an!

Tabellenwerte in dB

Die Schwellwerte von D1 (6–8 J.) sollen also für das mittlere Alter von 7 Jahren gelten und die von D2 (9–12 J.) für das mittlere Alter von 10 Jahren, was etwa dem jeweiligen Durchschnittsalter der beiden Gruppen entspricht. Die Alterslinien im Jahresabstand können nun durch lineare Interpolation für jedes Lebensalter in der Querschnitt-Studie errechnet werden. Diese berechneten Korrekturwerte sind in Tab. 3.13 gelistet.

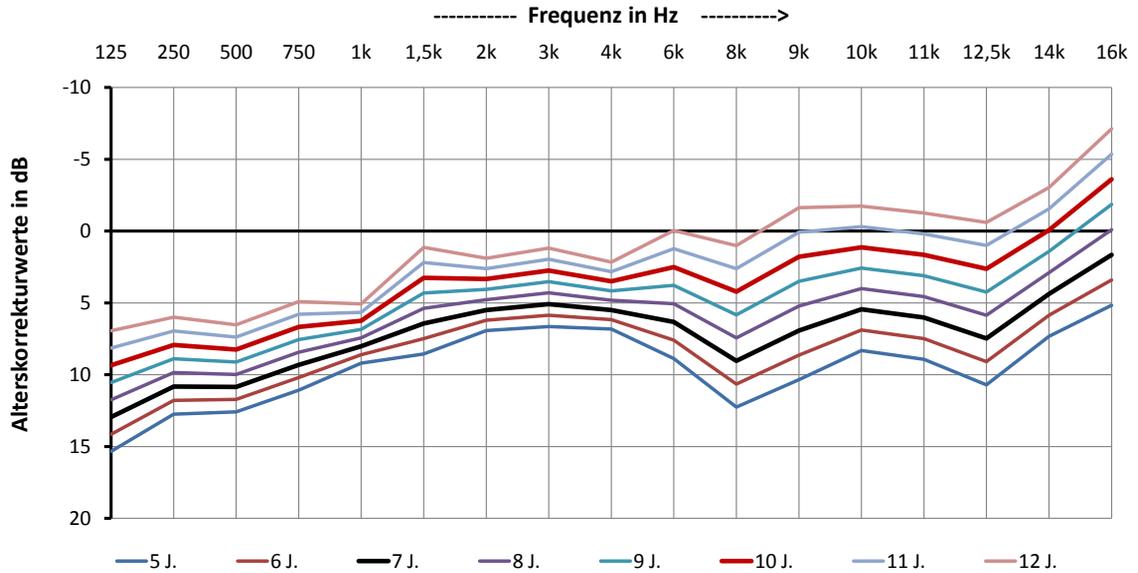


Abbildung 3.18: Alterslinien im Jahresabstand zur Korrektur von kindlichen Audiogrammen, mit äquidistanter Frequenzteilung

In Abb. 3.18 sind diese errechneten Alterslinien für die Altersklassen zwischen 5 und 12 Jahren grafisch dargestellt. Die Alterslinien vom Alter 7 Jahre (dick schwarz) und für 10 Jahre (dick rot) entsprechen den mittleren Audiogrammen beider Ohren aus der Querschnitt-Studie für die deutschen Kinder.

Am Verlauf der Alterskurven fällt auf, dass bei 1 kHz und 4 kHz die Differenzen zwischen den Altersklassen kleiner sind und ab 6 kHz sowie im gesamten erweiterten Hochtonbereich zunehmen und in dB etwa doppelt so groß sind wie in den unteren Frequenzen.

Indem man bei individuellen Audiogrammen von den gemessenen Werten die Werte der zugehörigen Alterslinie subtrahiert, erhält man Audiogramme, die zur Normhörschwelle (der 0-Linie) vergleichbar sind. Bei jüngeren Kindern unter 8 Jahren verbessert sich das Audiogramm im gesamten Frequenzbereich durch die Alterskorrektur. Wo immer die Korrekturwerte negativ sind (siehe Tab. 3.13) bzw. oberhalb der Nulllinie verlaufen (siehe Abb. 3.18), verschlechtert sich das Ergebnis des Audiogramms durch die Korrektur. Das gilt insbesondere für die Frequenzen im erweiterten Hochtonbereich.

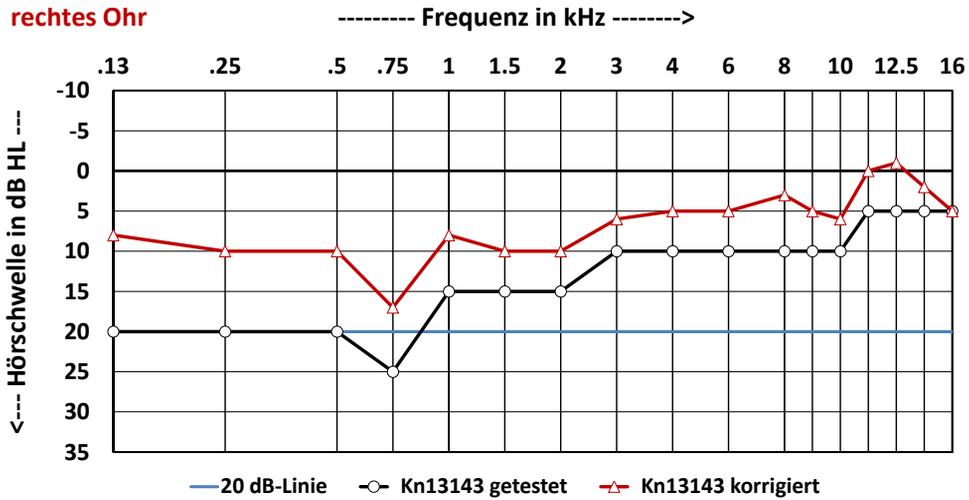


Abbildung 3.19: Alterskorrektur eines Einzel-Audiogramms der Testperson 13143: getestet und korrigiert bei 20 dB als Schadenskriterium. Ergebnis: „falsch positiv“

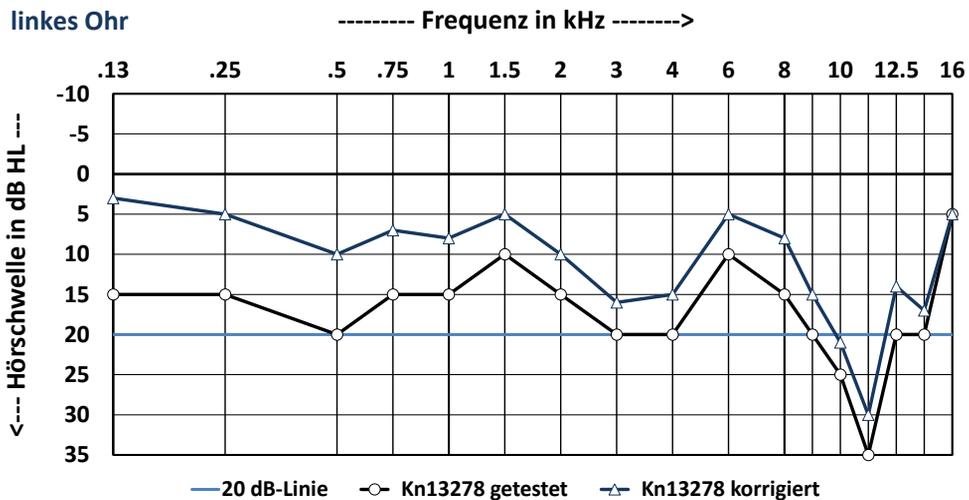


Abbildung 3.20: Alterskorrektur eines Einzel-Audiogramms der Testperson 13278: getestet und korrigiert bei 20 dB als Schadenskriterium. Ergebnis: „richtig positiv“

Die klinische Relevanz einer Alterskorrektur sei anhand der folgenden Beispiele dargestellt. Abb. 3.19 und Abb. 3.20 zeigen zwei pathologische Audiogramme vor und nach der Alterskorrektur. In beiden Fällen handelt es sich um 8 jährige Mädchen, die bei ihrem Hörtest Abweichungen von mehr als 20 dB von der Normhörschwelle aufweisen und damit den pathologischen Fällen zugerechnet werden. Bei beiden Kindern werden also durch das Test-Verfahren Hörschäden festgestellt (schwarze Linien). Nach der Durchführung der zuvor dargelegten Alterskorrektur (rote Linie) in

Abb. 3.19 wird das Schadenskriterium von 20 dB nicht mehr erfüllt und das Mädchen mit der Code-Nummer Kn13143 nicht mehr als pathologisch eingestuft. In Abb. 3.20 ist hingegen das 20-dB-Kriterium für Hörschäden auch nach der Korrektur (blaue Linie) bei den Frequenzen von 10 und 11,2 kHz noch erfüllt und das frühere Knalltrauma mit Hörverlust bleibt weiterhin erkennbar. Das Audiogramm des Mädchens mit der Code-Nummer Kn13278 bleibt auch nach der Korrektur pathologisch.

Somit hat die Alterskorrektur eine Änderung der in „gesund“ und „krank“ eingeteilten Personen zur Folge. Dies geht mit einer Änderung der Sensitivität und der Spezifität einher. Diese für die klinische Beurteilung von Audiogrammen relevanten Parameter sollten ermittelt werden, um die durch die Anwendung des Schadenskriteriums von 20 dB auftretenden „Fehlklassifikationen“ zu quantifizieren.

Von 260 insgesamt getesteten Schülern wurde durch Auswahlkriterien 63 Schüler von der Auswertung ausgeschlossen (siehe Tab. 2.3). 10 Schüler wurden dabei ausgeschlossen, weil sie Röhrchen im Trommelfell hatten (3) oder sich als nicht audiometrierbar erwiesen haben (3), zu alt (2) oder erkältet waren (2). Weitere 53 Kinder wurden ausgeschlossen, weil die Tympanometrie-Ergebnisse nicht im Normalbereich lagen oder im Audiogramm bzw. durch die Befragung ein Knalltrauma ermittelt wurde. Man kann hier aber nicht von Erkrankten im eigentlichen Sinne sprechen, die durch eine entsprechende Therapie behandelt werden und danach wieder gesund sind (also normal hören). Erlittene Knalltraumata sind inkurabel und von der Norm abweichende Tympanometrie-Ergebnisse müssen nicht zwangsläufig mit einer deutlich verschlechterten Hörfähigkeit assoziiert sein.

Die zuletzt genannten 53 aussortierten Schüler sollen zusammen mit den 197 ausgewerteten Schülern, also insgesamt 250 Schüler, anhand des Schadenskriteriums von 20 dB auf Hörschäden überprüft werden. Oder besser ausgedrückt: das 20-dB-Schadenskriterium soll anhand realer Daten auf seine Tauglichkeit für Kinder untersucht werden.

Die 197 ausgewerteten Schüler werden mit „hört normal“ und die 53 aussortierten Schüler mit „Hörstörung liegt vor“ klassifiziert. Das Ergebnis des Tests „20 dB Kriterium positiv“ liegt vor, wenn ein oder mehrere Messwerte im individuellen Audiogramm größer als 20 dB sind. Liegt keine solche Überschreitung der 20 dB Grenze im gesamten Audiogramm vor, ist das Testergebnis „20 dB Kriterium negativ“.

Die Anwendung der Ausschlusskriterien repräsentiert die übliche ärztliche Diagnostik, während die Analyse der Audiogramme mit einem Grenzwert für pathologi-

sche Befunde ein rein rechnerisches Testverfahren darstellt. In einer 4-Felder-Matrix (siehe Tab. 3.14) können die beiden diagnostischen Verfahren miteinander verglichen werden, indem sowohl die Sensitivität (Empfindlichkeit oder Trefferquote der Erkrankten) der Testmethode als auch die Spezifität (Quote der als Gesund ermittelten Fälle) errechnet werden. Die ärztliche Diagnostik, die sich mehrerer Kriterien bedient, wird dabei als korrekt angesetzt.

In Tab. 3.14 werden Ergebnisse des Testverfahrens zeilenweise und Ergebnisse der klassischen Diagnostik spaltenweise angeordnet. Daraus ergeben sich für die Matrixfelder folgende vier Möglichkeiten:

- a** \cong „Erkrankung liegt vor“ – „Testergebnis positiv“ (richtig positiv),
- b** \cong „Erkrankung liegt nicht vor“ – „Testergebnis positiv“ (falsch positiv),
- c** \cong „Erkrankung liegt vor“ – „Testergebnis negativ“ (falsch negativ) und
- d** \cong „Erkrankung liegt nicht vor“ – „Testergebnis negativ“ (richtig negativ).

Tabelle 3.14: 4-Felder-Matrix zu Sensitivität und Spezifität

4 Felder-Matrix	Erkrankung liegt vor	Erkrankung liegt nicht vor
Testergebnis positiv	a = richtig positiv	b = falsch positiv
Testergebnis negativ	c = falsch negativ	d = richtig negativ

Die Sensitivität bestimmt den Anteil der richtig erkannten Kranken und die Spezifität den Anteil der richtig erkannten Gesunden. Also ergibt sich:

$$\text{Sensitivität} = \frac{a}{a+c}$$

$$\text{Spezifität} = \frac{d}{b+d}$$

Tabelle 3.15: Anwendung des 20-dB-Schadenskriteriums auf die Originaldaten der Querschnitt-Studie mit 250 Schülern

Ohne Alterskorrektur	Hörstörung liegt vor	hört normal	Summe:
20 dB Kriterium positiv	39	54	93
20 dB Kriterium negativ	14	143	157
Summe:	53	197	250

Tabelle 3.16: Anwendung des 20-dB-Schadenskriteriums auf die alterskorrigierten Daten der Querschnitt-Studie mit 250 Schülern

Mit Alterskorrektur	Hörstörung liegt vor	hört normal	Summe:
20 dB Kriterium positiv	37	29	66
20 dB Kriterium negativ	16	168	184
Summe:	53	197	250

In Tab. 3.15 sind die Fallzahlen der deutschen Schüler vor der Alterskorrektur aufgeführt. Die Spaltensummen enthalten links die 53 als pathologisch ausgewiesenen und rechts die 197 in die Studie aufgenommenen Fälle. Die 53 aussortierten Fälle werden nicht alle als pathologisch erkannt, sondern bei 14 Fällen wird der Schwellwert von größer als 20 dB nicht überschritten. Von den 197 Ausgewählten werden ebenfalls nicht alle als gesund erkannt. Im Gegenteil, mehr als ein Drittel aller Ausgewerteten (N=54) haben mindestens bei einer Frequenz einen Schwellwert, der 20 dB übersteigt und deshalb werden diese Fälle als auffallend eingestuft. Die Zeilensummen zeigen insgesamt 93 Geschädigte in der oberen und 157 Gesunde in der unteren Zeile, die durch das Tesverfahren ermittelt wurden. Der Prozentsatz an Geschädigten beträgt 37,2 % der Kinder ($100 \times 93 / 250$), was wenig realistisch sein dürfte.

Für die Sensitivität des einfachen 20-dB-Schadenskriteriums ergibt sich ein Wert von 73,6 % ($39 / 53 = 0,736$) und die Spezifität errechnet sich zu einer Quote von 72,6 % ($143 / 197 = 0,726$).

Nach Anwendung der Alterskorrektur ergeben sich deutliche Änderungen in den Zeilensummen in Tab. 3.16. Die Spaltensummen sind verständlicherweise die gleichen wie vor der Korrektur. Bei der Berechnung der Anzahl Geschädigter (>20 dB) werden etliche Fälle durch die Alterskorrektur umgruppiert. Durch das Absenken der Hörschwellen insbesondere bei jüngeren Kindern werden potenzielle Hörstörungen seltener detektiert. So steigt die Anzahl der fälschlicherweise als normal angesehenen Kinder mit Hörstörung vor der Alterskorrektur von 14 auf 16 Fälle nach der Alterskorrektur an. Die Anzahl der Normalhörigen, deren Audiogramm mindestens einen Schwellwert über 20 dB hatte, wurde vor der Korrektur mit 54 Fällen ermittelt und lag danach bei nur noch 29 Fällen. Somit wurde der Anteil der „falsch positiven“ Fälle um 25 Fälle (46,3 %) reduziert.

Mit den Fallzahlen aus der Tab. 3.16 kann nach der Alterskorrektur erneut die Sensitivität und die Spezifität des Schadenkriteriums ermittelt werden. Wir erhalten jetzt eine Sensitivität von 69,8 % ($37/53 = 0,698$) und eine Spezifität von 85,3 % ($168/197 = 0,853$). Der Verlust an Sensitivität durch die Alterskorrektur beträgt 3,8 % (2 Fälle). Diesem steht aber ein Gewinn an Spezifität von 12,7 % (25 Fälle) gegenüber.

Betrachtet man die reinen Fallzahlen, die von der Alterskorrektur betroffen sind, ist der Gewinn durch diese Maßnahme weitaus deutlicher. Bei Screening-Untersuchungen mit vielen Personen wird eine hohe Spezifität erforderlich, um zu viele falsch positive Befunde zu eliminieren. Die Sensitivität zum Nachweis einer Hörstörung wird dadurch kaum beeinflusst.

Kapitel 4

Diskussion

4.1 Tympanometrie bei Erwachsenen und Kindern

4.1.1 Ohrkanalvolumina von Erwachsenen

In der vorliegenden Untersuchung ist der Einfluss des Ohrkanalvolumens auf die Schallübertragung im Mittelohr von größerer Bedeutung als die anderen tympanometrischen Messgrößen, wenn man von ihrer Verwendung als Ausschlusskriterien absieht. Der Vergleich der Daten von Erwachsenen soll deshalb auch auf diesen Parameter beschränkt bleiben, obwohl die anderen Parameter wie Compliance, Gradient und Druck im Mittelohr in den meisten Publikationen ebenfalls dokumentiert sind. Der Parameter Druck im Mittelohr ist keine charakteristische Größe sondern eine Momentaufnahme, die Aufschluss über die Tubenfunktion gibt und wurde bei den untersuchten Kindern als Ausschlusskriterium für die Auswertung verwendet.

Die Fachliteratur bietet einen recht überschaubaren Fundus an Tympanometriedaten von größeren Bevölkerungsgruppen, so dass die Ergebnisse im Vergleich übersichtlich dargestellt werden können. Deutlich häufiger werden die unterschiedlichen Messtechniken bzw. die ermittelten Parameter beschrieben z. B. von Keefe et al. (1993) und Keefe und Levi (1996). Die diagnostische Anwendbarkeit der Testresultate ist ebenfalls in einigen Publikationen behandelt so z. B. von Silman et al. (1992). Im Folgenden sollen die eigenen Testergebnisse mit Daten aus der Literatur verglichen werden.

Im internationalen Vergleich werden Daten von Chinesen als Volksgruppe den Daten von Kaukasiern als den Vertretern der europäischen Bevölkerung gegenübergestellt. Die vorliegende Untersuchung umfasst Daten zu beiden Volksgruppen.

Da die Ohrkanalvolumina, die tympanometrisch bei der deutschen Studie ermittelt wurden, mit 1,66 ml im Durchschnitt deutlich (um 0,48 ml) größer waren als die in China gemessenen mit durchschnittlich 1,18 ml, rückte der verwendete Stöpsel als mögliche Ursache für die Unterschiede in den Fokus.

Je größer und flacher der Stöpsel ist, desto größer ist auch das dahinterliegende Volumen des Gehörgangs, zu dem ein Teil des Volumens der Cavitas Conchae hinzukommt. Standardabweichungen von bis zu 0,39 ml zeigen eine große Variabilität des Ohrkanalvolumens, die teilweise durch den ausgewählten Stöpsel bedingt sind. Eine Überprüfung des GSI 38 mit 2 unterschiedlichen Stöpseln an 4 Probanden, mit je 10 Mess-Wiederholungen auf beiden Ohren, ergab denn auch deutliche, signifikante Unterschiede ($p < 0,001$) beim Ohrkanalvolumen. Die anderen Parameter Peak Compliance, Gradient und Druck waren hingegen kaum beeinflusst.

Zu den eigenen Messungen ist anzumerken, dass beim MI 26 halbkugelförmige Universalstöpsel zum Einsatz kamen, die etwas tiefer in den Gehörgang eingeführt werden können als die Stöpsel mit flachem Schirm, die beim GSI 38 eingesetzt wurden. Die Vergleichsmessungen ergaben, dass mit dem flachen Stöpsel etwa 0,2 ml größere Ohrkanalvolumen gemessen werden als mit dem halbrunden Universalstöpsel. Bei den erwachsenen deutschen Frauen mit $ECV = 1,36$ ml kann der Unterschied zu den chinesischen Frauen mit $ECV = 1,14$ ml (Differenz 0,22 ml) in etwa mit dem Stöpsel erklärt werden. Der Vergleich der Männer fällt mit 0,55 ml mehr als doppelt so groß aus, so dass der Stöpsel nicht als alleinige Erklärung der größeren Ohrkanalvolumina bei deutschen Männern angesehen werden kann.

Bei der Tympanometrie ist das Ohrkanalvolumen nicht die eigentliche Zielgröße, sondern wird ermittelt, um die Parameter Peak Compliance und Gradient durch Kompensationsrechnung bestimmen zu können. Dabei werden Unterschiede des Parameters Volumen herausgerechnet (Shanks 1984). Shanks und Lilly (1981) haben tympanometrische Messungen der Ohrkanalvolumina mit einer direkten Methode verglichen und dabei festgestellt, dass die Messmethode mit Tympanometer meist deutlich zu hohe Werte ermittelt. Die direkte Methode mit Flüssigkeit (Alkohol) ergab Werte von 0,696 ml ($SD = 0,131$ ml) bei 8 Probanden (4 ♀, 4 ♂). Da bei der tympanometrischen Messung der Druck variiert, wurde weiter ermittelt wie sich der

Gehörgang unter Druckänderungen verhält. Bei Drücken zwischen -400 daPa und 400 daPa ändert sich das Volumen durch Ausdehnung bzw. Nachgeben um $0,113$ ml. Das tympanometrisch ermittelte Ohrkanalvolumen wird bis zu 40% größer als das mit der Flüssigkeitsmethode direkt bestimmbare Volumen.

Tabelle 4.1: Ohrkanalvolumina von Erwachsenen im Vergleich mit der Literatur

Tympanometrie bei Erwachsenen				Ohrkanalvolumen (ECV) in ml			
Studie	Ohren	Alter	Geschlecht	Mittel	S.D.	5%-Q.	95%-Q.
Eigene	1336	18-70	Alle	1,18	0,39	0,70	1,90
2001	638	18-70	♀	1,14	0,38	0,60	1,80
Chinesen	698	18-70	♂	1,21	0,38	0,70	2,00
Eigene	880	18-83	Alle	1,66	0,39	1,05	2,30
2003	226	18-82	♀	1,36	0,28	0,91	1,86
Deutsche	654	18-83	♂	1,76	0,37	1,23	2,35
Margolis & Heller	87	19-61	Alle	1,05	0,25		
1987	38	19-55	♀	0,93	0,18		
US-Amerikaner	49	21-61	♂	1,14	0,26		
Roup et al.	102	20-30	Alle	1,29	0,29	0,90	1,80
1998	51		♀	1,18	0,22	0,80	1,60
Kaukasier	51		♂	1,40	0,32	1,00	2,10
Shahnaz & Davies	160	18-33	Alle	1,02	0,32	0,60	1,60
2006	(31)		♀	0,98	0,29	0,60	1,50
Chinesen	(52)		♂	1,10	0,33	0,60	1,80
Shahnaz & Davies	143	18-33	Alle	1,16	0,34	0,70	1,80
2006	(42)		♀	1,05	0,27	0,67	1,60
Kaukasier	(34)		♂	1,30	0,37	0,72	2,06
Wan & Wong	200	19-34	Alle	1,17	0,28	0,80	1,60
2002	100		♀	1,13	0,31	0,70	1,60
Chinesen	100		♂	1,22	0,25	0,81	1,70

Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, 5%-Q.: 5%-Quantil und 95%-Q.: 95%-Quantil

In Tab. 4.1 sind die eigenen Messergebnisse von Ohrkanalvolumina für chinesische und deutsche Erwachsene den Ergebnissen aus den Studien von Margolis und Heller (1987), Roup et al. (1998), Shahnaz und Davies (2006) und Wan und Wong (2002) gegenübergestellt. Im Gegensatz zu den eigenen Ergebnissen werden in den zitierten Studien von Erwachsenen keine signifikanten Unterschiede zwischen linken und rechten Ohren erwähnt. Die Anzahl N bezieht sich auf die untersuchten Ohren. Shahnaz und Davies (2006) listen in ihren Tabellen die Anzahl der untersuchten Personen auf, geben im Text aber eine verminderte Anzahl von untersuchten Ohren an, die nicht mehr nach Geschlecht aufgeschlüsselt sind. Deshalb sind bei diesen

Autoren in Tab. 4.1 die Anzahl für Frauen und Männer in Klammern angegeben.

Im internationalen Vergleich fällt auf, dass die Ohrkanalvolumina der Kaukasier größer sind als die der Chinesen. Ebenso sind in allen angegebenen Untersuchungen die Messwerte für Männer größer als diejenigen für die Frauen.

Die eigenen Messungen an chinesischen Frauen mit $ECV = 1,14$ ml (90%-Spannweite: 0,6–1,8 ml) und Männern mit $ECV = 1,21$ ml (90%-Spannweite: 0,7–2,0 ml) stimmen sehr gut mit den Ergebnissen von Wan und Wong (2002) überein. Chinesische Frauen haben hier $ECV = 1,13$ ml (90%-Spannweite: 0,7–1,6 ml) und chinesische Männer ein $ECV = 1,22$ ml (90%-Spannweite: 0,8–1,7 ml). Die chinesischen Messergebnisse von Shahnaz und Davies (2006) (ECV : 1,02 ml, ♀: 0,98 ml, ♂: 1,10 ml) sind dagegen deutlich kleiner. Die Messungen von Margolis und Heller (1987) an US-Amerikanern, ohne Angabe von deren ethnischer Zusammensetzung, (ECV : 1,05 ml, ♀: 0,93 ml, ♂: 1,14 ml) sind eher vergleichbar mit den chinesischen Ergebnissen von Shahnaz und Davies (2006) als mit irgendeiner der anderen aufgeführten Untersuchungen an Kaukasiern.

Die Messergebnisse bei den Kaukasiern differieren stärker als diejenigen bei den Chinesen. Margolis und Heller (1987) berichten von US-Amerikanern die kleinsten Volumina, die auf dem Niveau der Chinesen liegen. Die Werte der Kaukasier von Shahnaz und Davies (2006) (ECV : 1,16 ml, ♀: 1,05 ml, ♂: 1,30 ml) sind vergleichbar mit den etwas höheren Werten für Chinesen bei Wan und Wong (2002) und der eigenen Untersuchung. Merklich größere Ohrkanalvolumina (ECV : 1,29 ml, ♀: 1,18 ml, ♂: 1,40 ml) finden Roup et al. (1998) und am größten sind diese bei den eigenen Untersuchungen an deutschen Erwachsenen (ECV : 1,66 ml, ♀: 1,35 ml, ♂: 1,76 ml). Die eigenen Befunde, die immerhin an 880 Ohren erhoben wurden, sind recht bemerkenswert, werden aber infolge unterschiedlicher Stöpseltypen relativiert.

Bei Deutschen bzw. Kaukasiern liegen die Messwerte von Roup et al. (1998) ($ECV=1,29$ ml) näher bei denen von Shahnaz und Davies (2006) ($ECV=1,16$ ml) als bei den eigenen ($ECV=1,59$ ml). In allen Untersuchungen sind die Geschlechtsunterschiede bei Chinesen deutlich kleiner als bei den Kaukasiern und liegen bei rund 0,1 ml größeren Volumen für Männer. Die deutschen Männer haben in den eigenen Untersuchungen im Schnitt 0,4 ml größere Ohrkanalvolumen als die deutschen Frauen. Bei den Kaukasiern von Shahnaz und Davies (2006) beträgt dieser Unterschied nur 0,25 ml und bei Roup et al. (1998) sogar nur 0,22 ml.

4.1.2 Tympanometrie-Vergleich von Kindern

Beim Seitenvergleich der Ohrkanalvolumina bei Kindern gibt es signifikante Unterschiede in den Mittelwerten (siehe Tab. 3.2) und in den Medianen (siehe Abb. 3.5). Bei den chinesischen Kindern ist das Volumen auf dem rechten Ohr um 0,05 ml größer, während bei den deutschen Kindern das Volumen auf dem linken Ohr um 0,04 ml größer ist. Dass bei den Chinesen das rechte Ohrkanalvolumen größer ist als das linke und bei den Deutschen umgekehrt, wäre schon etwas ungewöhnlich. Li et al. (2006) fanden bei tympanometrischen Untersuchungen an chinesischen Schulkindern hingegen, dass die Ohrkanalvolumina im linken Ohr dieser Kinder signifikant etwas größer sind als beim rechten Ohr, während bei Haapaniemi (1996a) die rechten Ohrkanalvolumen signifikant größer sind als bei den linken Ohren von finnischen Schulkindern. Das bedeutet, dass hier umgekehrte Befunde erhoben wurden als bei den eigenen Untersuchungen. In beiden Publikationen äußerten die Autoren die Vermutung, dass diese Unterschiede mit der Händigkeit der Untersucher zusammenhängen könnten.

Die eigenen Messungen bei allen Chinesen wurden von einem angehenden chinesischen Arzt und alle Messungen bei den Deutschen vom Autor selbst durchgeführt. Da beide Untersucher Rechtshänder sind, liegt die Vermutung nahe, dass noch andere Faktoren bei solch systematischen Unterschieden eine Rolle spielen könnten. Eine Erklärung könnte die unterschiedliche Bauart der Mess-Sonden der beiden verwendeten Tympanometer sein (siehe Abb. 2.4). Das MI 26 (China) hat eine abgewinkelte und das GSI 37 (Deutschland) eine gerade, gestreckte Sonde. Die unterschiedliche Handhaltung beim Einsetzen der Sonde beeinflusst möglicherweise die genaue Position des Stöpsels während der Messung. Von Einfluss könnte auch der Sitz des Probanden sein, ob der Proband mittels Drehstuhl gedreht wird oder der Untersucher um den Probanden herumgeht. Das Einsetzen der Sonde und sichere Abdichten des Gehörgangs erfordert viel Erfahrung und ist ziemlich fehleranfällig. Jeder Untersucher hat vermutlich seine eigene Methode der Tympanometrie, die von der anderer Untersucher abweicht. So könnte die Händigkeit des Untersuchers die systematischen Unterschiede erklären, aber nicht die bevorzugte Seite rechts oder links vorhersagen.

In Tab. 4.2 werden die eigenen Tympanometrie-Ergebnisse von chinesischen und deutschen Kindern den Ergebnissen aus der Literatur gegenübergestellt.

Bei den eigenen Untersuchungen in China waren die Unterschiede der 3 Altersgruppen bezüglich der Tympanometrie im Vergleich zu den deutschen Kindern gering, deshalb sind alle chinesischen Kinder in Tab. 4.2 gemeinsam aufgeführt.

Tabelle 4.2: Tympanometrie-Ergebnisse bei Kindern im Vergleich mit der Literatur

Studie	N	Alter	Statistik	ECV	PComp	Grad	PPress
Kinder	Ohren	Jahre		ml	ml	daPa	daPa
Eigene 2001 China	182	6-16	Mittel S.D. 5%-Q. 95%-Q.	0,89 0,31 0,51 1,50	0,46 0,21 0,20 0,89	87 21 51 120	-39 27 -95 -4
Eigene 2001 Deutschland	182 74 108	6-8	Mittel S.D. 5%-Q. 95%-Q. ♀ ♂	1,05 0,18 0,80 1,32 1,01 1,08	0,61 0,35 0,28 1,16 0,56 0,64	88 24 50 135 88 89	-39 42 -130 10 -48 -33
Eigene 2001 Deutschland	212 112 100	9-12	Mittel S.D. 5%-Q. 95%-Q. ♀ ♂	1,18 0,22 0,63 1,60 1,11 1,26	0,64 0,37 0,25 1,19 0,59 0,71	81 22 45 115 82 80	-31 32 -93 2 -26 -36
Haapaniemi 1996 Finnland	942 530 412	6-15	Median 5%-Q. 95%-Q. ♀ ♂	0,80 0,50 1,20 0,75 0,80	0,50 0,30 1,10 0,50 0,60	86 66 125 86 86	-5 -80 25 -10 -5
Hanks & Rose 1993 USA	316	6-15	Mittel 5%-Q. 95%-Q.	1,00 0,60 1,50	0,70 0,30 1,50		-7 -65 20
Li et al. 2006 China	538	6-13	Mittel 5%-Q. 95%-Q.	1,03 0,68 1,46	0,58 0,26 1,13	112 62 156	-25 -85 10
Margolis & Heller 1987 USA	184 94 90	4-6	Mittel S.D. ♀ ♂	0,75 0,15 0,70 0,80	0,50 0,19 0,52 0,49	100 28 95 105	-41 50 -41 -41
Nozza et al. 1992, 1994 USA	260	3-16	Mittel 5%-Q. 95%-Q.	0,90 0,60 1,35	0,78 0,40 1,39	104 60 168	-34 -207 15
Silman et al. 1992 USA	42	3-10	Mittel 5%-Q. 95%-Q.		0,35 1,25	55 180	

ECV: Ohrkanalvolumen, PComp: Peak Compliance, Grad: Gradient, PPress: Mittelohrdruck daPa: 10 Pa
Mittel: Mittelwert, S.D.: Standardabweichung, 5%-Q.: 5%-Quantil und 95%-Q.: 95%-Quantil

Von den in Tab. 4.2 zitierten Publikationen berichten nur Li et al. (2006) und Margolis und Heller (1987) über Ergebnisse für alle 4 tympanometrischen Parameter.

Bei der Untersuchung von Silman et al. (1992) werden nur die Parameter Peak Compliance und Gradient aufgeführt. Auch wird auf die Angabe des Mittelwertes verzichtet. Die Autoren geben nur das 90 %-Intervall an und leiten aus diesen Parametern Kriterien für die Diagnose von Flüssigkeits-Ansammlungen im Mittelohr ab. Bei Haapaniemi (1996a) sind Medianwerte als mittlere Ergebnisse angegeben aber nicht die Mittelwerte wie bei allen anderen Untersuchungen.

Da die Alterszusammensetzung der untersuchten Gruppen zwischen den Publikationen differiert, finden wir bei allen 4 Parametern allein daraus erklärbare Unterschiede der Ergebnisse sowohl für die Mittelwerte, als auch im 90 %-Interwall.

Im vorangegangenen Kapitel wurde bereits der Einfluss von Untersucher, Messsonde und verwendeter Stöpsel auf das Ohrkanalvolumen diskutiert. Bei den Kindern sind die Unterschiede im Ohrkanalvolumen nicht so groß wie bei den Erwachsenen. Die deutsche Altersgruppe D2 (9–12 J.) liegt mit einem Volumen von 1,16 ml am oberen Ende der Skala während die Gruppe der 6–15 Jährigen bei Haapaniemi (1996a) mit einem ECV von 0,8 ml das untere Ende bildet. Die kleinste Angabe für Ohrkanalvolumen ist das 5 % Quantil von 0,50 ml bei Haapaniemi (1996a) und die größte das 95 % Quantil von 1,60 ml bei der deutschen Gruppe D2 (9–12 J.), alle anderen Angaben für kindliche Ohrkanalvolumina liegen zwischen diesen Grenzen.

Der direkte Vergleich der Tympanometrie-Ergebnisse wird erschwert durch die in den Publikationen fehlenden Angaben zu den verwendeten Stöpseln. Gerade für den Vergleich der Ohrkanalvolumina oder der daraus abzuleitenden Gehörgangslänge, die maßgeblich an den Resonanzfrequenzen bei der Schallübertragung beteiligt ist, sind die Abweichungen nicht zu vernachlässigen. Die Tympanometrie erweist sich für die Bestimmung des tatsächlichen Ohrkanalvolumens als zu anfällig. Die Genauigkeit für diesen Messparameter, die von den Herstellern mit $\pm 0,1$ ml angegeben wird, ist klinisch nicht zu verifizieren. Bei Messwiederholungen mit einer Versuchsperson und der Verwendung von ein und demselben Stöpsel bleibt lediglich die Standardabweichung mit durchschnittlich 0,06 ml innerhalb dieser Grenzen. Ein uneingeschränkter Vergleich mit publizierten Daten ist daher limitiert.

Die Peak Compliance Werte sind am größten in der Studie von Nozza et al. (1992) mit $PComp = 0,78$ ml, gemittelt über 130 Kinder (3–16 J.) und am kleinsten bei den chinesischen Kindern der eigenen Studie mit $PComp = 0,45$ ml. Wie beim

Ohrkanalvolumen liegen auch die Peak Compliance Werte bei Haapaniemi (1996a) eher am unteren Ende mit $PComp = 0,50$ ml. Es zeigt sich eine Tendenz zu größeren Werten bei den Kaukasiern im Vergleich zu Chinesen, abgesehen von der finnischen Ausnahme (Haapaniemi 1996a).

Mit zunehmendem Alter steigen die Werte etwas an. Die Altersgruppe D1 (6–8 J.) mit Jungen und Mädchen hat eine durchschnittliche Peak Compliance von 0,61 ml, während die Altersgruppe D2 (9–12 J.) einen Wert von 0,64 ml hat, also einen Zuwachs von 0,03 ml. Bei Jungen (D1: 0,64 ml, D2: 0,71 ml) sind die Peak Compliance Werte und deren Zuwachs mit dem Alter etwas größer als bei den Mädchen (D1: 0,56 ml, D2: 0,59 ml). Bei Margolis und Heller (1987) haben die Mädchen eine um 0,03 ml größere Peak Compliance als die Jungen, dagegen ist diese bei Haapaniemi (1996a) für die Jungen um 0,1 ml größer.

Die Peak Compliance ist ein Maß für die akustische Leitfähigkeit des Mittelohres und damit auch für den Energieeintrag in die Cochlea und hat somit auch einen gewissen Einfluss auf die Hörschwelle. Dieser Einfluß wird aber eher gering ausfallen, wenn man die hier beobachteten kleinen Unterschiede berücksichtigt. Während bei der Tympanometrie Größen mit linearen Skalen erfasst werden, sind diese bei der Audiometrie in logarithmischen Skalen in dB angegeben. 3 dB Unterschiede bedeuten bei letzteren eine Verdoppelung bzw. -3 dB eine Halbierung der Schallenergie. Die beobachteten Unterschiede der Compliance Werte bewegen sich im einstelligen Prozentbereich, die beim Schalldruck in der dB-Skala unter 1 dB liegen und bei der Schallenergie unter 0,5 dB. Bei der Audiometrie werden aber Unterschiede vom gesunden Gehör erst ab etwa 5 dB wahrgenommen.

Der Gradient aus den eigenen Daten ist nur mit den Daten von Li et al. (2006) vergleichbar und das 90 %-Intervall des Gradienten mit dem von Silman et al. (1992), das mit $180-55=125$ daPa auch am größten von allen Vergleichsdaten ist. Die anderen Autoren verwendeten abweichende Definitionen für den Gradienten und können deshalb nicht direkt verglichen werden. Haapaniemi (1996a) und Nozza et al. (1992) z. Bsp. verwenden die Methode nach Paradise et al. (1976), die man näherungsweise in die hier verwendete „*tympanic width*“ umrechnen kann. Nozza et al. (1992) haben dies selbst in einer späteren Publikation durch Vermessung der ausgedruckten Tympanogramme in Nozza et al. (1994) durchgeführt. Die umgerechneten Werte von Haapaniemi (1996a) und Nozza et al. (1994) sind in die Tabelle mit kursiven Ziffern angegeben.

Der Druck im Mittelohrraum ist bei allen dargestellten Studien im Mittelwert bzw. Median negativ, d. h. es herrscht ein leichter Unterdruck. Dieser mittlere Unterdruck ist bei Haapaniemi (1996a) mit -5 daPa und bei Hanks und Rose (1993) mit -7 daPa sehr nahe am Nullpunkt und bewegt sich bei allen übrigen Studien zwischen -31 daPa und -41 daPa.

4.2 Hörschwellenbestimmungen durch Audiometrie

Zur Entwicklung der Hörschwelle bei Kindern sind eine ganze Reihe von Untersuchungen durchgeführt worden. Die dabei verwendeten Audiometer wurden im Laufe der Zeit verbessert und auch die Normwerte für die Hörschwellen wurden angepasst bzw. verändert. Daher sind die in der Literatur publizierten Schwellwerte häufig nicht direkt miteinander vergleichbar. Hingegen kann man Differenzwerte in den Hörschwellen von Altersgruppen innerhalb einer Studie, die ja relativ zu sehen und damit unabhängig von Referenzwerten sind, mit denjenigen von anderen Studien direkt vergleichen.

Da nur wenige Autoren zum Thema Hörschwelle den ganzen Frequenzbereich von 125 Hz bis zu 16 kHz oder höher untersucht haben und die Tabellen dazu auch unhandlich breit werden, soll der Vergleich in zwei unterschiedlichen Frequenzbereichen durchgeführt werden. Einmal im konventionellen Bereich bis 8 kHz und gesondert davon im erweiterten Hochtonbereich ab 8 kHz. In der Anfangszeit der erweiterten Hochtonaudiometrie wurden für die beiden Frequenz-Bereiche unterschiedliche Wandler benutzt, bis die Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig den HDA 200 der Firma Sennheisser für alle Frequenzen freigegeben hat. Zunächst soll der konventionelle Bereich diskutiert werden.

4.2.1 Audiometrie bei Frequenzen von 125 Hz bis 8 kHz

In Tab. 4.3 werden die Untersuchungsergebnisse der insgesamt 13 Studien nach Altersgruppen getrennt aufgelistet. Nicht alle Studien haben die heute üblichen Frequenzen im konventionellen Hörbereich bis 8 kHz erhoben. So wurden in der größten Studie an Kindern von Richardson et al. (1976) lediglich die Frequenzen von 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz, 2 kHz, 4 kHz und 8 kHz, also nur die ganzen Oktaven gemessen.

Beim Vergleich der Altersgruppen werden die Differenzen der Schwellwerte derart gebildet, dass die gemittelten Schwellwerte der jüngeren Altersgruppe von denen

der älteren Altersgruppe bei jeder gemessenen Frequenz abgezogen werden. Positive Differenzwerte zeigen dann eine Verschlechterung der Schwellwerte an und negative eine Verbesserung im Altersverlauf. Diese Festlegung harmoniert mit der üblichen Darstellung von Hörverlusten in Audiogrammen, die als positive Abweichungen nach unten auftreten. Deshalb spricht man bei Schwellenanhebungen auch von Senken im Audiogramm.

Tabelle 4.3: Hörschwellen von Kindern und jungen Erwachsenen bei Frequenzen von 125 Hz bis 8 kHz. Vergleich von 13 internationalen Studien und 32 Altersgruppen.

Studie				Frequenz in Hz (Hörschwellwerte in dB HL)											
	Gruppe	Anzahl	Alter	125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000	
eigene Studie	C1	29	6-8	14,3	11,9	10,3	8,8	6,2	6,0	7,4	6,6	6,6	3,3	6,9	
2001	C2	32	9-12	12,0	9,2	8,0	5,9	4,1	5,0	6,6	4,8	3,1	2,0	4,2	
China	C3	30	13-16	10,5	8,7	8,2	5,0	3,7	4,2	3,8	2,3	2,2	0,3	3,7	
eigene Studie	D1	91	6-8	12,9	10,8	10,9	9,3	8,0	6,4	5,5	5,1	5,5	6,3	9,0	
2003, Deutschland	D2	106	9-12	9,3	7,9	8,3	6,7	6,3	3,3	3,3	2,7	3,5	2,5	4,2	
Buren, Solem u.	B1	172	9-11	10,3	6,7	3,8		2,6		2,3	1,9	2,5	5,6	9,4	
Laukli	B2	94	14-16	12,3	8	3,7		2,7		0,9	1,9	1,2	4,8	7,6	
1992, Norwegen	B3	69	17-22	6,4	4,7	1,8		1,1		2,6	1,6	4,1	6,7	7,5	
Haapaniemi	Ha1	156	7	10,2	6,9	3,7		0,8		0,7	1,6	1,2	6,1	5,8	
1996	Ha2	131	10	5,9	2,7	0,1		-1,2		-1,5	-0,7	-0,8	3,3	2,6	
Finnland	Ha3	184	14	5,2	2,6	-0,7		-1,5		-1,8	-0,5	-1,4	4,8	2,1	
Roberts & Federico	Ro1	>1000	7			8,0		7,9	4,7	1,5	5,5	6,5	10,1	8,9	
1972, USA	Ro2	>1000	10			5,9		5,1	2,6	0,7	4,3	5,3	8,9	7,6	
Holmes et al.	Ho1	3109	6-11			7,1		5,2		3,4	5,2	4,8	9,0	11,6	
2004, USA	Ho2	3059	12-19			6,0		4,3		3,0	5,4	4,7	9,2	9,0	
Pirilä et al.	P	796	7	10,3	6,6	6,9		5,0		3,6	3,3	4,6	6,3	10,6	
1992, Finnland															
Rhako & Karma	Rh	355	5	16,6	11,3	9,3		7,2		6,7		6,9	10,7	12,4	
1989, Finland															
Reuter et al.	R0	35	4-7	6,7	7,8	7,6		8,8		8,5		7,6		12,1	
1997, Deutschland															
Richardson et al.	Ri1	11370	7	9,0	9,5			6,0		4,0		3,0		6,0	
1976, UK	Ri2	12406	11	9,5	9,5			5,0		2,5		1,5		3,0	
Schechter et al.	S1	~30	6-10	7,0	5,0			2,0		3,0	5,0	5,0	3,0	6,0	
1986, USA	S2	~30	11-15	4,0	3,0			0,0		1,0	3,0	3,0	2,0	4,0	
N=157 insgesamt	S3	~30	16-20	2,0	3,0			0,0		1,0	2,0	4,0	4,0	4,0	
(dB SPL korrigiert)	S4	~30	21-25	-1,0	0,0			0,0		1,0	2,0	5,0	6,0	5,0	
	S5	~30	26-30	-1,0	2,0			0,0		0,0	1,0	5,0	3,0	5,0	
Kennedy	K1	110	7	4,4	5,1	-1,5		-4,6		-6,6		-7,1		-4,5	
1957, USA	K2	100	10	2,3	2,8	-2,9		-5,8		-8,1		-8,6		-4,8	
				(Kalibrierung nicht berichtet)											
Eagles et al.	E1	282	5	8,9	8,8			8,3		6,6		2,4	2,2	6,3	
1963, USA	E2	266	7	3,9	5,8			5,0		4,0		0,1	-0,1	3,3	
(Ref. ASA -> ISO korrigiert)	E3	257	8	3,5	5,2			4,7		4,5		0,7	0,4	3,4	
	E4	272	10	3,0	4,6			4,7		3,8		0,1	0,3	2,8	
	E5	399	12	0,6	3,0			3,1		2,7		-1,4	-1,4	0,8	

Gruppenamen der eigen. Studie bzw. aus dem Namen des 1. Autors gebildet und nach dem Alter aufsteigend numeriert. HL: Hearing Level

Die ermittelten Differenzen der Hörschwellwerte zwischen den verschiedenen Altersgruppen sind in Tab. 4.4 aufgelistet, wobei in der Spalte „ Δ Gruppe“ die beiden

Altersgruppen aus Tab. 4.3 aufgeführt sind und deren Differenzen gebildet wurden (z. Bsp. C2–C1 oder Ha2–Ha1). In der Spalte „ Δ Jahre“ ist die Altersdifferenz der verglichenen Gruppen in Jahren angegeben. Desweiteren wurde in der Spalte Mittel-Z eine durchschnittliche Differenz der Schwellwerte für alle gemessenen Frequenzen in der betreffenden Zeile gebildet, hier im Standard-Frequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz. Bei mehr als zwei Altersgruppen in einer Studie sind mehrere Altersvergleiche aufgeführt. Die Gruppenstärken sind dabei nicht identisch, können aber der Tab. 4.3 entnommen werden.

Tabelle 4.4: Differenz der Hörschwellen von Kindern und jungen Erwachsenen für Frequenzen von 125 Hz bis 8 kHz. Insgesamt 15 Altersvergleiche.

Studie	Δ (delta)		Mittel-Z (Zeile)	Frequenz in Hz (Differenzen in dB)										
	Gruppe	Jahre		125	250	500	750	1000	1500	2000	3000	4000	6000	8000
eigene Studie CN	C2-C1	3	-2,1	-2,3	-2,7	-2,4	-2,9	-2,1	-1,0	-0,9	-1,7	-3,4	-1,2	-2,7
eigene Studie D	D2-D1	3	-2,9	-3,6	-2,9	-2,6	-2,6	-1,8	-3,2	-2,2	-2,3	-2,0	-3,8	-4,8
Haapaniemi	Ha2-Ha1	3	-3,0	-4,3	-4,2	-3,6		-2,0		-2,2	-2,3	-2,0	-2,8	-3,2
Roberts & Federico	Ro2-Ro1	3	-1,6			-2,1		-2,8	-2,1	-0,8	-1,2	-1,2	-1,2	-1,3
Kennedy	K2-K1	3	-1,5	-2,2	-2,3	-1,4		-1,2		-1,5		-1,5		-0,3
Eagles et al.	E4-E2	3	-0,4		-0,9	-1,2		-0,3		-0,2		0,0	0,4	-0,5
Eagles et al.	E3-E1	3	-3,0		-5,4	-3,6		-3,6		-2,2		-1,7	-1,8	-3,0
Richardsen et al.	Ri2-Ri1	4	-1,1		0,5	0,0		-1,0		-1,5		-1,5		-3,0
Buren et al.	B2-B1	5	-0,2	2,0	1,3	-0,1		0,1		-1,4	0,0	-1,3	-0,8	-1,8
Schechter et al.	S2-S1	5	-2,0		-3,0	-2,0		-2,0		-2,0	-2,0	-2,0	-1,0	-2,0
eigene Studie CN	C3-C1	7	-3,3	-3,8	-3,2	-2,2	-3,8	-2,5	-1,9	-3,6	-4,2	-4,4	-2,9	-3,2
Eagles et al.	E5-E1	7	-5,2		-8,2	-5,9		-5,2		-4,0		-3,8	-3,6	-5,6
Haapaniemi	Ha3-Ha1	7	-3,1	-5,0	-4,3	-4,4		-2,3		-2,5	-2,1	-2,6	-1,3	-3,7
Holmes et al.	Ho2-Ho1	7	-0,7			-1,1		-0,9		-0,4	0,2	-0,1	0,2	-2,6
Buren et al.	B3-B1	9	-1,0	-3,9	-2,0	-2,0		-1,5		0,3	-0,3	1,6	1,1	-1,9
Mittel-3 (nur für Altersdiff. 3 Jahre)			-2,1	-3,1	-3,1	-2,4	-2,7	-2,0	-2,1	-1,4	-1,9	-1,7	-1,8	-2,2
Mittel-S (ganze Spalte gemittelt)			-2,1	-2,9	-2,9	-2,3	-3,1	-1,9	-2,0	-1,7	-1,6	-1,7	-1,4	-2,6

Gruppennamen der eigenen Studie bzw. aus dem Namen des 1. Autors gebildet und nach dem Alter aufsteigend numeriert.

Mittel = Mittelwert (-Z: über alle Werte der Zeile, -3: nur bei Altersdifferenz 3 Jahre, -S: über die ganze Spalte)

Die einzelnen Untersuchungen differieren bezüglich der Alterszusammensetzung. Die Anzahl der untersuchten Kinder lag zwischen 30 und über 12.000 untersuchten Personen. Die Referenzhörschwelle oder auch Normalhörschwelle, auf die die Ergebnisse bezogen werden, sind nicht alle nach demselben Standard definiert. Für 2 Untersuchungen von Eagles et al. (1963) und Schechter et al. (1986) konnten die Ergebnisse anhand der angegebenen Kalibrierwerte für die akustischen Wandler so umgerechnet werden, dass sie vergleichbar wurden. Für die Studie von Eagles et al. (1963) wurden die von ihnen verwendeten Referenzwerte aus dem angegebenen ASA-Standard (für 705A-Earphone) zunächst in Schwellwerte in dB SPL umgerechnet. Ebenso für die Schwellwerte in der Studie von Schechter et al. (1986), die eigene Sollwerte für ihr Audiometer angeben. Diese Zwischenwerte in dB SPL konnten dann

nach der ISO 389-1 der Norm für supra-aurale Kopfhörer in aktuell vergleichbare Werte in dB HL umgerechnet werden. Bei Kennedy (1957) z. B. sind gar keine Referenzwerte angeführt, die zu einer Umrechnung geeignet wären. Trotzdem können diese Daten beim Vergleich der Altersgruppen verwendet werden.

Der angegebene ASA-Standard (705A-Earphone) für eine Referenzhörschwelle wurde bereits von Glorig et al. (1956) beschrieben (ASA: American Standard Audiometric Zero) und erfuhr bis zur Verwendung von Eagles et al. (1963) Änderungen bzw. Anpassungen. Diese Referenzwerte wurden bei 8 kHz von 28,3 dB SPL auf 21 dB SPL, also um 7,3 dB SPL am stärksten abgesenkt. Aber verglichen mit dem heute verwendeten ISO-Standard, waren diese Referenzwerte bei mehreren Frequenzen immer noch um mehr als 10 dB höher. Angaben in SPL (Sound Pressure Level) werden immer auf den Referenzschalldruck von 20 μ Pa bei 1 kHz bezogen, der den Nullpunkt der dB-Skala in der Akustik definiert.

Die umfangreichsten Kollektive haben Richardson et al. (1976) in Großbritannien mit insgesamt fast 24.000 Probanden untersucht, während das zahlenmäßig geringste Kollektiv von Reuter et al. (1997) ($N = 35$) in Deutschland erfasst wurde. Letzteres ist wegen der zusätzlich gemessenen Frequenzen im erweiterten Hochtonbereich (8–16 kHz) interessant, wurde aber leider im Standardhörbereich nicht nach dem Alter der Kinder differenziert. Bei Schechter et al. (1986) sind in 5 einzelnen Altersgruppen jeweils nur ungefähr 30 Probanden untersucht worden, wenn man davon ausgeht, dass die Untersuchten mit einer Gesamtzahl von $N = 157$ (63 ♀, 94 ♂) gleichmäßig auf die Altersgruppen verteilt sind. Das entspricht der Gruppenstärke der chinesischen Kinder in der eigenen Studie.

In den Publikationen von Haapaniemi (1996b), Roberts (1972), Kennedy (1957) und Eagles et al. (1963) wurden Altersgruppen untersucht, die den eigenen untersuchten Altergruppen entsprechen und deren Hörschwellwert-Differenzen daher direkt vergleichbar sind. Die Hörschwellwert-Differenzen dieser vier Untersuchungen sind in Tab. 4.4 mit den eigenen Daten in den ersten sechs Zeilen gelistet. Ab der 7. Zeile ist von Eagles et al. (1963) ein weiterer Gruppenvergleich (Gruppen E3–E1) eingefügt, mit 2 Jahre jüngeren Altersgruppen bei gleicher Altersdifferenz von 3 Jahren. Die weiteren Zeilen sind nach Altersdifferenz der Gruppen aufsteigend sortiert, wobei noch ein 3. Vergleich von Eagles et al. (1963) (Gruppen E5–E1) mit 7 Jahren Altersdifferenz aufgeführt ist. Beim 2. Altersvergleich von Burén et al. (1992) (Gruppen B3–B1) ist die Altersdifferenz mit 9 Jahren am größten, seine jüngste Al-

tersgruppe ist aber bereits 10 Jahre im Durchschnitt alt und entspricht der eigenen Altersgruppe D2 (9–11 J.).

Ab 500 Hz sind von allen Autoren die Hörschwellwerte im Oktavabstand gemessen worden bzw. angegeben (bei 500 Hz, 1kHz, 2kHz, 4 kHz und bei 8 kHz). Die beiden unteren Oktaven 125 Hz und 250 Hz sind ebenso wie die Halboktaven ab 750 Hz und Vielfachen davon in unterschiedlichen Bereichen weggelassen worden mit Ausnahme von 6 kHz, die nur bei Kennedy (1957) und Richardson et al. (1976) fehlen. Die gemittelten Hörschwellunterschiede zwischen den Altersgruppen, die in Spalte „Mittel-Z“ angegeben sind, beziehen sich daher auf unterschiedlich viele Frequenzstufen, je nach Studie. Bei den gemittelten Unterschieden in „Mittel-3“, wo nur Gruppenvergleiche für Altersdifferenzen von 3 Jahren berücksichtigt werden, setzen sich die gelisteten Werte je nach Frequenz aus unterschiedlich vielen Werten zusammen. Das gilt ebenso für die gemittelten Unterschiede in „Mittel-S“, die aus allen Werten einer Spalte in Tab. 4.4 gebildet werden.

Wenn man die Differenzwerte in Tab. 4.4 näher betrachtet, sieht man weit überwiegend negative Werte, die eine Verbesserung der Hörfähigkeit mit dem Alter anzeigen. Vom Betrag am größten ist dieser negative Wert oder die Verbesserung von $-8,2$ dB bei Eagles et al. (1963) im Gruppenvergleich E5 (12 J.) mit E1 (5 J.) bei der tiefsten gemessenen Frequenz von 250 Hz. Der Altersunterschied bei diesem Vergleich beträgt 7 Jahre. Beschränkt man sich auf die Gruppenvergleiche mit einem Altersunterschied von 3 Jahren, finden wir ebenfalls bei Eagles et al. (1963) im Gruppenvergleich E3 (8 J.) mit E1 (5 J.) den größten Betrag (also Verbesserung) von $-5,4$ dB bei 250 Hz.

In der Studie von Eagles et al. (1963) werden beim Gruppenvergleich E4 (10 J.) und E2 (7 J.) keine altersbezogenen Unterschiede bei der Frequenz 4 kHz berichtet. Richardson et al. (1976) finden bei 500 Hz keine altersbezogenen Unterschiede, während dies bei Burén et al. (1992) beim Gruppenvergleich B2 ((14–16 J.) mit B1 (9–11 J.) bei der Frequenz von 3 kHz zutrifft.

Für einzelne Frequenzen finden sich in manchen Studien auch positive Differenzen oder Verschlechterungen der Hörfähigkeit mit steigendem Alter. Für die Studie von Eagles et al. (1963) trifft dies für die Frequenz 6 kHz mit $0,4$ dB beim Gruppenvergleich E4 (10 J.) mit E2 (7 J.) zu. Bei Richardson et al. (1976) fand sich bei der Frequenz 250 Hz eine Verschlechterung von $0,5$ dB beim Vergleich von 11-Jährigen (Ri2) mit 7-Jährigen (Ri1) und bei Holmes et al. (2004) bei Frequenzen 3 kHz

und 6 kHz von jeweils 0,2 dB. Burén et al. (1992) fanden bei beiden aufgeführten Gruppenvergleichen Verschlechterungen der Hörschwellwerte mit dem Alter. Beim Vergleich der Altersgruppe B2 (14–16 J.) mit B1 (9–11 J.) beträgt diese 2 dB bei der Frequenz 125 Hz, bei 250 Hz 1,3 dB und bei 1 kHz 0,1 dB. Beim Gruppenvergleich von B3 (17–22 J.) und B1 (9–11 J.) wurden Verschlechterungen der Hörschwellen bei 4 kHz um 1,6 dB und bei 6 kHz um 1,1 dB berichtet.

In Spalte „Mittel-Z“, der Zusammenfassung aller gemessenen Frequenzen, zeigen jedoch alle Publikationen eine mittlere Verbesserung der Hörschwelle mit zunehmendem Alter der Kinder bzw. Jugendlichen. Diese durchschnittlichen Verbesserungen sind bei Haapaniemi (1996b) mit $-3,0$ dB für den Vergleich der Gruppen Ha2 (10 J.) mit Ha1 (7 J.) für die Altersdifferenz von 3 Jahren am größten. Haapaniemi (1996b) hat noch eine 3. Altersgruppe Ha3 im Alter von 14 Jahren untersucht und festgestellt, dass die durchschnittlichen Verbesserungen ab einem Alter von 10 Jahren an aufwärts mit $-0,1$ dB nur noch marginal sind. Demgegenüber zeigt der Vergleich der eigenen chinesischen Altersgruppe C1 (6–8 J.) mit der Gruppe C3 (13–16 J.) insgesamt mit $-3,3$ dB etwa die gleichen Verbesserungen bei der gleichen Altersdifferenz von 7 Jahren. Die geringsten Verbesserungen beim Vergleich von 10-Jährigen mit 7-Jährigen finden wir bei Eagles et al. (1963) mit $-0,4$ dB (Gruppen E4–E2). Im Gruppenvergleich B2 (14–16 J.) mit B1 (9–11 J.) sind die durchschnittlichen Verbesserungen mit nur $-0,2$ dB bei Burén et al. (1992) absolut am geringsten bei einer Altersdifferenz von 5 Jahren. In den beiden zuletzt genannten Vergleichen sind die bereits erwähnten Verschlechterungen der Schwellwerte bei einzelnen Frequenzen mit eingerechnet. Die Gruppe B2 (14–16 J.) von Burén et al. (1992) fällt dadurch auf, dass diese Jugendlichen entgegen dem sonst vorhandenen Trend bei tiefen Tönen von 125 Hz und 250 Hz schlechter hören als die Kinder der Altersgruppe B1 (9–11 J.) und auch schlechter als die jungen Erwachsenen in Altersgruppe B3 (17–22 J.)

Eagles et al. (1963) haben insgesamt 10 Altersgruppen im Jahresabstand von 5–14 Jahren untersucht, von welchen in Tab. 4.3 fünf dieser Gruppen aufgeführt sind. Die Altersgruppe E1 (5 J.) hat die schlechteste und die Altersgruppe E5 (12 J.) die beste Hörschwelle. Der Vergleich dieser beiden Altersgruppen ergibt mit $-5,2$ dB im Schnitt die größten Verbesserungen aller Vergleiche mit dem Alter bei einer Altersdifferenz von 7 Jahren, während der Vergleich der beiden Altersgruppen E4 (10 J.) mit E2 (7 J.) mit $-0,4$ dB die geringsten Verbesserungen zeigt.

Die größte Altersdifferenz mit 9 Jahren finden wir bei Burén et al. (1992) im

Vergleich der jungen Erwachsenen der Gruppe B3 (17–22 J.) mit den Kindern der Gruppe B1 (9–11 J.). Diese Ergebnisse sind nur bedingt mit den eigenen Resultaten vergleichbar, weil die jüngste Altergruppe von Burén et al. (1992) unserer älteren deutschen Altersgruppe D2 (9–12 J.) entspricht und die älteste Gruppe B3 von Burén et al. (1992) im Schnitt bereits 20 Jahre alt, also erwachsen ist. Aber im Durchschnitt aller Frequenzen gibt es auch hier noch Verbesserungen von -1 dB, die noch größer sind als beim Vergleich der Gruppen B2 (14–16 J.) und B1 (9–11 J.) mit nur $-0,2$ dB.

In der Spalte „Mittel-Z“ (Z für Zeile) in Tab. 4.4 wurden die Gruppendifferenzen über alle gemessenen Frequenzen gemittelt. D. h. für die durchschnittliche Verbesserung der Hörschwelle wurde ein Einzahlwert gebildet, der die Gruppenvergleiche innerhalb der einzelnen Studien repräsentiert bzw. zusammenfasst. Fasst man diese Durchschnittswerte Mittel-Z nochmals zusammen, erhält man die Werte Mittel-S (S für Spalte). Der Wert in der Spalte „Mittel-Z“ repräsentiert die durchschnittliche Gesamtverbesserung aller dargestellten Gruppenvergleiche und beträgt $-2,1$ dB. Der gleiche Wert ergibt sich bei der Zusammenfassung aller Gruppenvergleiche mit 3 Jahren Altersunterschied in der Zeile „Mittel-3“. Es zeigt sich, dass der Gruppenvergleich C2 (9–12 J.) mit C1 (6–8 J.) der eigenen Studie in China mit $-2,1$ dB genau im Durchschnitt aller Studien liegt, während die durchschnittliche Verbesserung der Hörschwelle aus der deutschen Querschnitt-Studie mit $-2,9$ dB im Standardfrequenzbereich von 125 Hz bis 8 kHz am oberen Ende angesiedelt ist.

Bei den einzelnen Messfrequenzen wurden ebenfalls Durchschnittswerte über die Gruppenvergleiche berechnet (spaltenweise). Am geringsten sind diese mittleren Verbesserungen mit $-1,4$ dB bei der Frequenz 2 kHz und am größten mit $-3,1$ dB bei den Frequenzen 125 Hz und 250 Hz bei der Beschränkung auf Vergleiche mit 3 Jahren Altersdifferenz. Über alle Altersvergleiche gemittelt, liegen die Verbesserungen zwischen $-1,4$ dB bei 6 kHz und $-3,1$ dB bei 750 Hz. Es zeigen sich bei tiefen Frequenzen etwas größere Verbesserungen der Hörfähigkeit mit zunehmendem Alter als im Frequenzbereich zwischen 1 kHz und 6 kHz, die $-2,0$ dB nicht übertreffen. Bei der höchsten Frequenz des Standardhörbereichs, bei 8 kHz werden diese mit $-2,2$ dB (Δ -Alter 3 J.) bzw. $-2,6$ dB insgesamt aber im Betrag wieder etwas größer.

Die Untersuchung von Eagles et al. (1963) zeigt, dass die größeren Verbesserungen der Hörfähigkeit bei den jüngeren Kindern unter 7 Jahren zu beobachten sind, während bei Kindern über 10 Jahren die Verbesserungen deutlich geringer werden.

Es wurden dabei auch ethnische und geschlechtsspezifische Unterschiede zwischen weißen und nicht-weißen (non-white) Kindern beobachtet. Die weißen Mädchen der gesamten Altersspanne (5–14 Jahre) hören durchweg besser als die Jungen, während bei den nicht-weißen Kindern die Jungen bis 4 kHz besser hören als die Mädchen, bei 6 kHz und 8 kHz aber schlechter.

Kennedy (1957) hat bei ihren Untersuchungen festgestellt, dass die Verbesserung der Hörfähigkeit nicht kontinuierlich, sondern in Schüben erfolgt. Möglicherweise erfolgen diese Entwicklungsschübe nicht bei allen ethnischen Gruppen im selben Alter sondern etwas zeitversetzt. Diese Entwicklungs-Unterschiede sind auch zwischen den Geschlechtern zu beobachten. So hat Kennedy (1957) beobachtet, dass Jungen im früheren Lebensalter etwas besser hören, mit höherem Lebensalter die Mädchen dann aber besser hören als die Jungen. Im Gegensatz dazu hörten die Jungen der deutschen Altersgruppe D2 (9–12 J.) im Standardhörbereich immer noch deutlich besser als die Mädchen, allerdings waren die Unterschiede nicht mehr so groß wie in der Altersgruppe D1 (6–8 J.). Die Unterschiede bei Kennedy (1957) wurden leider nicht explizit dargestellt, sollen aber nicht signifikant gewesen sein. Die bessere Hörfähigkeit der Jungen bei tiefen Frequenzen und die bessere der Mädchen bei hohen Frequenzen scheint aber eine gesicherte Erkenntnis zu sein.

Erwähnenswert ist noch die Publikation von Elliott und Katz (1980), die mit einem experimentellen Verfahren, der sogenannten „Three-alternative, forced-choice procedure“, Hörschwellen von Kindern mit 6 Jahren, 10 Jahren und Erwachsenen bei den Frequenzen 500 Hz und 2 kHz untersuchten. Mit dieser Prozedur wurden sowohl die absoluten Hörschwellen als auch die Mithörschwellen für 2 kHz Töne in Breitbandrauschen und Schmalbandrauschen (Terzband) als Verdeckungsgeräusch bei überschwelligen Pegeln getestet. Als Mithörschwellen werden die Pegel bezeichnet, bei denen ein Testsignal in Störschall wahrgenommen wird. Bei dem Messverfahren wurden wiederholt in einem Zeitfenster mit 3 Takten Testtöne angeboten, deren Amplitude variiert und die zeitliche Zuordnung zu den drei Angebots-Takten richtig angegeben werden musste, um gültig zu sein. Bei genügend häufigen Wiederholungen (hier 20), konnten Zufallsresultate ausgeschlossen werden. Richtige Antworten wurden mit einem „Smiley“ quittiert und darauf die Amplitude um 2 dB erniedrigt. Bei falschen Antworten wurde die Amplitude wieder um 2 dB erhöht. Die letzten 15 Umkehr-Amplituden (Übergang falsch-richtig und richtig-falsch) wurden als Hörschwelle gemittelt. Es zeigte sich, dass die 6-Jährigen bei 500 Hz um 13,6 dB höhere

Schwellen hatten als 10-Jährige und diese wieder um 2,3 dB höhere als Erwachsene. Bei 2 kHz betrug der Unterschied bei den Kindern nur noch etwa 5,1 dB, während die 10-Jährigen im Vergleich mit Erwachsenen 1,5 dB besser hören. Bei den Mithörschwellen mit beiden Störgeräushtypen waren die 6-Jährigen sogar etwas besser als die 10-Jährigen, während der Vorsprung der Erwachsenen vor den 10-Jährigen mit 3 dB etwas größer wurde. Dieses Resultat zeigt, dass die schlechtere Hörschwelle der jüngeren Kinder keine Frage der Aufmerksamkeit oder der geringeren kognitiven Fähigkeiten ist, sondern tatsächlich an einer zugrundeliegenden geringeren Sensitivität liegt. Später haben Yoneshige und Elliott (1981) mit demselben Verfahren dieses Ergebnis im Vergleich von 6-Jährigen mit Erwachsenen bestätigt, wenn auch mit geringeren Unterschieden (bei 500 Hz 9,3 dB gegenüber 15,9 dB und bei 2 kHz 3,3 dB gegenüber 3,6 dB).

4.2.2 Audiometrie im erweiterten Hochtonbereich

Die Untersuchung der Oktave zwischen 8 kHz und 16 kHz hat bis heute noch keinen Eingang in den klinischen Alltag der Routine-Untersuchungen gefunden. Aus diesem Grunde gibt es kaum Publikationen, die diesen Frequenzbereich behandeln und wenn, dann haben sie meist experimentellen Charakter. Die einzige Studie, deren Daten mit vergleichbarer Ausrüstung wie der eigenen erhoben wurden, stammt von Reuter et al. (1997) bei der Untersuchung von Kindern im Vorschulalter, also jüngeren Kindern als bei den eigenen Studien.

In Tab. 4.5 sind die Hörschwellwerte in dB SPL angegeben. SPL steht für Sound Pressure Level und bedeutet Schalldruckpegel, der in dB relativ zum Referenzschalldruck von $20 \mu\text{Pa}$ bei 1 kHz angegeben wird. Dies war eine Möglichkeit, um die Werte mit den Literaturdaten vergleichen zu können. Dazu wurden die eigenen Messwerte aus Tab. 3.8 auf Seite 49 über die Referenzwerte der ISO 389-8 für circumaurale Kopfhörer in dB SPL-Werte umgerechnet.

Studien von Burén et al. (1992), Osterhammel (1978), Reuter et al. (1997) und Schechter et al. (1986) vergleichen die Hörschwellen im erweiterten Hochtonbereich für Kinder in unterschiedlichen Altersgruppen mit den Hörschwellwerten von Erwachsenen.

Tabelle 4.5: Hörschwellen von Kindern und jungen Erwachsenen im erweiterten Hochtonbereich von 8 kHz bis 20 kHz. 7 Studien mit insgesamt 23 Altersgruppen.

Studie				Frequenz in kHz (Hörschwellwerte in dB SPL)								
	Gruppe	Anzahl	Alter	8	9	10	11	12	14	16	18	20
eigene 2001 China	C1	29	6-8	22,9	21,1	26,8	28,4	30,9	36,3	56,1		
	C2	32	9-12	20,2	20,6	24,0	25,8	29,1	35,0	55,2		
	C3	30	13-16	19,7	20,7	24,0	23,7	26,3	33,5	53,8		
eigene, 2003 Deutschland	D1	91	6-8	25,0	23,9	26,9	27,0	35,0	41,9	59,7		
	D2	106	9-12	20,2	18,8	22,6	22,7	30,1	37,4	54,4		
Buren, Solem u. Laukli, 1992 Norwegen	B1	172	9-11	25,6		31,4		32,3	40,3	49,2	71,7	94,8
	B2	94	14-16	26,8		29,4		32,0	41,6	53,2	76,8	95,8
	B3	69	17-22	19,7		30,4		30,9	40,5	57,4	87,5	105,9
Osterhammel 1978, Dänemark	O1	46	10-12	25,3		28,8		35,2	34,5	46,7	64,5	84,2
	O2	40	18-24	22,9		25,8		30,8	33,4	54,1	77,1	93,5
Schechter et al. 1986, USA N=157 insgesamt	S1	~30	6-10	18,0		23,0		20,0	28,0	39,0	55,0	77,0
	S2	~30	11-15	16,0		21,0		22,0	31,0	51,0	69,0	94,0
	S3	~30	16-20	16,0		24,0		24,0	36,0	55,0	77,0	102,0
	S4	~30	21-25	17,0		26,0		29,0	42,0	63,0	81,0	102,0
	S5	~30	26-30	17,0		25,0		28,0	40,0	61,0	90,0	109,0
Reuter et al. 1997 Deutschland	R0	35	4-7	28,4		28,0	33,4	36,9	42,9	52,6		
	R1	?	<5	30,0		31,0	37,1	41,1	48,8	56,3		
	R2	?	>5	27,5		26,4	31,4	34,5	39,7	50,6		
	R3	?	18-30	22,6		25,4	28,8	35,2	44,4	64,6		
Rosen et al. 1964	Sudan: Su	117	10-19					20,1	24,9	40,4	64,5	
	New York: NY	126	10-19					17,9	23,9	40,0	66,5	91,2
	Düsseldorf: Dü	100	10-19					26,0	30,1	53,5	78,1	
	Kairo: Ka	112	10-19					24,0	30,4	45,6	79,2	

Gruppenamen der eigenen Studie bzw. aus dem Namen des 1. Autors gebildet und nach dem Alter aufsteigend nummeriert.

Bei Rosen et al. sind die Gruppenamen aus den Untersuchungsorten gebildet.

SPL: Sound Pressure Level (Schalldruck)

Bei der Studie von Rosen et al. (1964) handelt es sich um eine der ersten publizierten Studien zur Hörfähigkeit im erweiterten Hochtonbereich. Nur die jüngste von Rosen et al. (1964) untersuchten Altersgruppen mit einer Altersspanne von 10–19 Jahren ist in Tab. 4.5 aufgeführt, deren Daten zur Hörfähigkeit an vier unterschiedlichen Orten erhoben wurden. Interessant ist hier vor allem die Tatsache, dass die heranwachsenden Kinder bzw. Jugendlichen in der lauten amerikanischen Metropole New York deutlich besser hörten als in Düsseldorf und Kairo. Das gilt, wenn auch mit geringeren Unterschieden, für die ethnische Gruppe der Mabaans aus dem Sudan, die ohne Industrielärm aufwachsen und als beispielhaft für nahezu fehlende Presbyakusis gelten. Bei der höchsten gemessenen Frequenz von 18 kHz hörten die Mabaans allerdings um 2 dB besser als die New Yorker. Aber selbst die Kohorte Dü (10–19 J.) aus Düsseldorf, die innerhalb der Studie die höchsten Hörschwellwerte zwischen 12–16 kHz haben, hören etwas besser als die chinesischen Kinder der Altersgruppe C3 (13–16 J.) mit den niedrigsten Schwellwerten der eigenen Studien in diesem Frequenzbereich. Die Altergruppe S1 (6–10 J.) von Schechter et al. (1986)

hat als einzige aller aufgeführten Studien Hörschwellwerte, die nur geringe Abweichungen zu den Messwerten der Gruppen Su und NY (10–19 J.) von Rosen et al. (1964) zeigen, bei 14 kHz ca. 4 dB schlechter, bei 18 kHz etwa –10 dB besser hören.

Einige der aufgeführten Publikationen zeigen Hörschwellwerte auch für Frequenzen über 16 kHz. Die Messwerte für die Frequenzen von 18 kHz und 20 kHz sind in den Tabellen 4.5 und 4.6 kursiv dargestellt. In den eigenen Studien und in der Studie von Reuter et al. (1997) wurden bei diesen Frequenzen keine Messwerte erhoben. Bei der Berechnung des Mittelwertes in Spalte Mittel-Z wurden deshalb zur besseren Vergleichbarkeit der Resultate, die kursiv dargestellten Differenzwerte in Tab. 4.6 nicht mit einbezogen.

Tabelle 4.6: Differenz der Hörschwellen von Kindern und jungen Erwachsenen für Frequenzen von 8 kHz bis 20 kHz. Insgesamt 10 Altersvergleiche.

Studie	Δ (delta)		Mittel-Z (Zeile)	Frequenz in kHz (Differenzen in dB)								
	Gruppe	Jahre		8	9	10	11	12	14	16	18	20
Reuter et al.	R2-R1	2	-5,7	-2,5		-4,6	-5,7	-6,6	-9,1	-5,7		
eigene Studie CN	C2-C1	3	-1,8	-2,7	-0,5	-2,8	-2,6	-1,9	-1,3	-0,9		
eigene Studie D	D2-D1	3	-4,7	-4,8	-5,1	-4,3	-4,4	-4,9	-4,4	-5,3		
Schechter et al.	S2-S1	5	2,6	-2,0		-2,0		2,0	3,0	12,0	<i>14,0</i>	<i>17,0</i>
Schechter et al.	S5-S4	5	-1,2	0,0		-1,0		-1,0	-2,0	-2,0	<i>9,0</i>	<i>7,0</i>
Buren et al.	B2-B1	5	0,8	1,2		-2,0		-0,3	1,3	4,0	<i>5,1</i>	<i>1,0</i>
eigene Studie CN	C3-C1	7	-3,0	-3,2	-0,5	-2,8	-4,7	-4,6	-2,8	-2,3		
Buren et al.	B3-B1	9	0,0	-5,9		-1,0		-1,4	0,2	8,2	<i>15,8</i>	<i>11,1</i>
Osterhammel	O2-O1	10	-0,7	-2,4		-3,0		-4,5	-1,1	7,4	<i>12,6</i>	<i>9,3</i>
Reuter et al.	R3-R0	>15	-0,2	-5,8		-2,6	-4,6	-1,7	1,5	12,0		
Mittel-3 (nur für Altersdiff. <=3 Jahre)			-4,1	-3,3	-2,8	-3,9	-4,2	-4,4	-4,9	-4,0		
Mittel-S (ganze Spalte gemittelt)			-1,4	-2,8	-2,0	-2,6	-4,4	-2,5	-1,5	2,7	<i>11,3</i>	<i>9,1</i>

Gruppennamen der eigenen Studie bzw. aus dem Namen des 1. Autors gebildet und nach dem Alter aufsteigend numeriert.

Mittel = Mittelwert (-Z: über alle Werte der Zeile, -3: nur bei Altersdifferenz <=3 Jahre, -S: über die ganze Spalte)

Die größten Verbesserungen der Hörschwellen im erweiterten Hochtonbereich finden wir bei Reuter et al. (1997) beim Vergleich der unter 5-Jährigen mit den Kindern über 5 Jahre mit durchschnittlich –5,7 dB bei einem Altersunterschied von nur zwei Jahren. Verbesserungen in ähnlicher Größe ergeben sich mit –4,7 dB bei deutschen Kindern der Altersgruppen D1 (6–8 J.) und D2 (9–12 J.). Bei den Kindern unserer chinesischen Studie finden wir mit durchschnittlich –1,8 dB geringere Verbesserungen der Hörschwelle als bei den deutschen Kindern.

Bei Frequenzen bis 12 kHz finden wir wie im Standard-Frequenzbereich überwiegend Verbesserungen der Hörschwellwerte, wie an den negativen Vorzeichen abzulesen ist. Bei der Frequenz 12 kHz gibt es zwei Ausnahmen. Beim Gruppenvergleich S2 (11–15 J.) mit S1 (6–10 J.) von Schechter et al. (1986) verschlechtert sich die Hör-

schwelle um 2 dB und beim Vergleich von B2 (14–16 J.) mit B1 (9–11 J.) von Burén et al. (1992) beträgt diese Verschlechterung 1,3 dB. Bei 8 kHz ist die Hörschwelle der älteren Gruppe B2 (14–16 J.) ebenfalls mit 1,2 dB schlechter als die Gruppe B1 (9–11 J.), dem steht aber eine Verbesserung der Hörfähigkeit von –1,8 dB entgegen, die mit einem anderen Wandler im Standard-Frequenzbereich bei denselben Altersgruppen festgestellt wurde.

Ab Frequenzen von 14 kHz sind beim Vergleich der Altersgruppen über 10 Jahre bereits mehrheitlich Verschlechterungen der Hörschwellwerte zu beobachten, was ab 18 kHz dann ausschließlich der Fall ist, da es sich bei der älteren Vergleichsgruppe bereits um junge Erwachsene handelt.

Die publizierten Daten zeigen, dass Erwachsene an der oberen Grenze des Hörbereiches deutlich schlechter hören als Kinder. Sehr gut kann man das bei Schechter et al. (1986) ablesen, der fünf Altersgruppen im 5-Jahresabstand darstellt. Bei 18 kHz verschlechtert sich das Hörvermögen von 55 dB SPL in Altersgruppe S1 (6–10 J.) auf 90 dB SPL in Altersgruppe S5 (26–30 J.). Die Hörbarkeit eines 20 kHz Tones verschlechtert sich bei denselben Altersgruppen von 77 dB SPL auf 109 dB SPL. Es ist noch anzumerken, dass bei Schechter et al. (1986) für die Frequenzen oberhalb von 16 kHz mit zunehmendem Alter immer weniger Probanden die Töne bei höchstem Pegel hörten. Die durchschnittlichen Messwerte bei diesen Frequenzen enthalten also immer weniger Einzeldaten, je älter die Gruppe ist.

Bei Trehub et al. (1988) wurde die Hörbarkeit eines 20 kHz-Tones in verschiedenen Altersgruppen untersucht. Dabei zeigte sich eine stetige Verbesserung der Hörfähigkeit mit dem Alter bis etwa 10 Jahre. Danach nimmt diese Hörfähigkeit mit zunehmendem Alter aber wieder ab. Bei tieferen Frequenzen haben Schneider et al. (1986) festgestellt, dass sich die Hörfähigkeit bis zu einem Alter von 10 Jahren deutlich verbessert, danach aber in eine Art Sättigung übergeht bzw. nur noch wenig merklich verbessert, sich aber auch nicht verschlechtert.

Ein Gruppenvergleich bei Schechter et al. (1986) mit Erwachsenen sei ebenfalls noch erwähnt. Die Altersgruppe S5 (26–30 J.) hört bei allen Frequenzen zwischen 10 kHz und 16 kHz besser als die Gruppe S4 (21–25 J.), die im Schnitt fünf Jahre jünger ist. Bei 8 kHz hören beide Gruppen gleich gut und erst ab 18 kHz hört die ältere Gruppe S5 schlechter.

Die Studie von Burén et al. (1992) zeigt aber auch, wie problematisch der Vergleich von Daten sein kann, deren Daten mit unterschiedlicher Ausrüstung erhoben

worden sind. Trotz Standardisierung und sorgfältiger Kalibrierung der Audiometer wurde bei der Hörschwelle des 8 kHz Testtons ein durchschnittlicher Unterschied von 3 dB festgestellt, der nur aus der Verwendung unterschiedlichen Wandler bei denselben Versuchspersonen resultierte.

Passend zu dieser Problematik untersuchten Voss und Herrmann (2005) verschiedene Audiometrie-Kopfhörer auf Unterschiede des Schalldruckes im Gehörgang zwischen Kleinkindern und Erwachsenen. Es zeigte sich, dass die Unterschiede für Frequenzen unter 2 kHz bei cirkumauralen Kopfhörern, wie dem HDA200 innerhalb von ± 2 dB liegen und oberhalb von 2 kHz 5–7 dB kleinere Schalldrücke im kleinkindlichen Gehörgang erzeugen. Bei Schulkindern dürften diese Unterschiede allerdings kleiner ausfallen, könnten aber die Ursache für die beobachtete Senke bei 8 kHz sein.

4.3 Hörentwicklung

Kinder befinden sich in einem Wachstumsprozess. Viele Fähigkeiten und Funktionen sind noch nicht voll entwickelt und müssen sich erst herausbilden. Es ist deshalb nachvollziehbar, dass auch der Gehörsinn diesem Muster folgt.

Durch das körperliche Wachstum verändern sich die einzelnen Komponenten, die beim Hörvorgang mitwirken. Das sind vor allem die Abmessungen des Gehörgangs und die Entwicklung der Mastoidzellen. Die Übertragungsfunktion des Mittelohres ist auf die Eigenschaften des Corti'schen Organs auf der Basilarmembran mit den Sinneszellen der Kochlea abgestimmt, damit Schallsignale verlässlich entschlüsselt werden können. Eby und Nadol (1986) untersuchten Felsenbeine von Neugeborenen und fanden kein postnatales Wachstum der kochleären Strukturen, jedoch ein geringes Wachstum der Mittelohr-Komponenten. Am größten war das Wachstum des Mastoidvolumens, das im Wesentlichen in zwei Wachstumsschüben erfolgt. Nach elektronenmikroskopischen Untersuchungen von Lavigne-Rebillard und Pujol (1990) ist die Kochlea bereits vor der Geburt anatomisch voll funktionsfähig und ausgereift. Das optimale Zusammenwirken dieser Strukturen macht das Erlernen von Sprache und Kommunikation überhaupt erst möglich.

Die beobachtete, bessere Hörfähigkeit höherer Töne bei Kindern gegenüber den tieferen Tönen muss vor diesem Hintergrund betrachtet werden. Trehub et al. (1988) berichten von der schnelleren Entwicklung der Hörfähigkeit des Menschen bei hohen Tönen im Vergleich zu den tiefen Tönen, was in scharfem Gegensatz zu der

Hörentwicklung bei Säugetieren steht. Diese hören zunächst die tiefen Töne besser als die hohen. Das könnte auch ein Hinweis für einen Vorrang der Sprachentwicklung sein, die beim *homo sapiens* einzigartig ist und einen wesentlichen Schritt in der Evolution darstellt. Bei den Säugetieren ist die akustische Wahrnehmung von Gefahren wichtiger als die direkte Kommunikation mit Artgenossen, was mit tiefen Tönen besser gelingt als mit hohen.

Wer die akustische Interaktion von Erwachsenen mit Säuglingen beobachtet hat, dem ist sicher aufgefallen, dass die Erwachsenen ihre Stimmen dabei automatisch sehr hoch einstellen. Frauen mit ihren höheren Stimmen fällt dies natürlich deutlich leichter als Männern. Dazu passt auch, dass die Kleinkinder in den ersten Tagen bis Monaten bzw. Jahren hauptsächlich von Frauen betreut werden und in dieser Zeit die Fähigkeit der Sprache erlernt wird.

Der Informationsgehalt der Sprache steckt überwiegend in den Frequenzen oberhalb von 1 kHz. Da tiefe Töne durch ihren starken Verdeckungseffekt die Wahrnehmung hoher Töne erschweren, macht es durchaus Sinn, dass diese beim Erlernen der Sprache erst einmal ausgeblendet bzw. deutlich schwächer wahrgenommen werden. Tiefe Frequenzen haben ihre Vorteile bei der Kommunikation über größere Entfernungen hinweg, da sie aufgrund der geringeren Reibungsverluste in Luft viel weiter getragen werden. Für Säuglinge hat dieser Aspekt überhaupt keine Bedeutung, da sie in unmittelbarer Reichweite einer Schutzperson leben und darauf fixiert sind.

Untersuchungen des Hörvermögens von Neugeborenen wurden von Lins et al. (1996) mit einer speziellen Methode der akustisch evozierten Potenziale durchgeführt. Mühler (2004) und Mühler und Rahne (2009) haben diese Methode beschrieben und auf ihre Tauglichkeit als objektive Audiometrie untersucht. Diese Methode benutzt stationäre sinusförmige Signale im Hörbereich, die mit einer Niederfrequenz zwischen 40 Hz und 120 Hz moduliert sind. Bei Erwachsenen erhält man mit diesen ASSR (Auditory Steady-State Responses) etwa um 10–20 dB höhere Schwellwerte als mit der konventionellen Audiometrie, kann aber auf beiden Ohren mehrere Hörfrequenzen gleichzeitig untersuchen. Mit diesen ASSR Messungen wurden bei Neugeborenen Unterschiede beim Vergleich der Luftleitung mit der Knochenleitung bei der tiefsten Testfrequenz von 500 Hz gefunden. Der Knochenleitungswert war hier etwa 20 dB besser als der Luftleitungswert, was bei höheren Frequenzen nicht der Fall war. Die Autoren vermuteten einen möglichen Okklusions-Effekt als Grund für diesen Unterschied, wahrscheinlicher liegt die Ursache dafür aber in der gemin-

derten Übertragung tiefer Frequenzen durch das unausgereifte Mittelohr mit einer höheren Resonanzfrequenz.

Das kindliche Wachstum ist am Anfang des Lebens am größten und verläuft in Wachstumsschüben, die einzelne Entwicklungsabschnitte voneinander abgrenzen. In der vorliegenden Studie wurde die Hörentwicklung vom Beginn des Schulalters an untersucht. Hier sind die Entwicklungs-Fortschritte bereits weniger ausgeprägt, was sich vor allem auch aus dem Literaturvergleich ergibt. Bei einem Alter um 5 Jahre zeigten Reuter et al. (1997) für den erweiterten Hochtonbereich innerhalb eines Zeitabschnitts von nur 2 Jahren größere Entwicklungs-Fortschritte als die weiteren Vergleiche zwischen den älteren untersuchten Altersgruppen.

Von diesem sich verlangsamenen Fortschritt der Hörentwicklung müssen die frequenzabhängigen Unterschiede im kindlichen Audiogramm getrennt betrachtet werden. Schließlich finden wir bei allen untersuchten kindlichen Altersgruppen eine bessere Hörfähigkeit bei hohen als bei tiefen Tönen vor. Das zeigen die nahezu parallel verschobenen Durchschnitts-Audiogramme. Die frequenzabhängige Steigung ist zwar bei den chinesischen Kindern geringfügig größer als bei den deutschen Kindern, aber selbst bei der ältesten Gruppe C3 (13–16 J.) noch vorhanden.

4.3.1 Verschiebung der Hörschwelle im Frequenzbereich

Aus den ermittelten Ohrkanalvolumina der Kinder im Vergleich mit den Erwachsenen ergeben sich Hinweise auf Ursachen dieser unterschiedlichen Hörfähigkeiten im Frequenzgang. Wegen der deutlich größeren Länge des Ohrkanals gegenüber dessen Querabmessungen, ist nur diese für eine Verstärkung der Schallübertragung durch Resonanz im Gehörgang wirksam. Setzt man die ermittelten Ohrkanalvolumina von Erwachsenen zu Kindern ins Verhältnis, so kann man daraus die Änderung der Resonanzfrequenz des Ohrkanals bestimmen, indem man die dritte Wurzel aus dem Volumenverhältnis zieht. Das gilt unter der Annahme, dass das Volumen in allen drei Dimensionen gleichmäßig mit dem Alter wächst. Auf die Länge des Gehörgangs entfällt damit eine altersbedingte Zunahme im Verhältnis $L_{Erw.}/L_{Kind} = \sqrt[3]{V_{Erw.}/V_{Kind}}$.

Die Resonanzfrequenz errechnet sich aus der Länge des Gehörgangs und der Schallgeschwindigkeit. Der Resonator ist ein einseitig geöffnetes Rohr mit einem Schwingungsbauch am offenen Ende und einem Schwingungsknoten am geschlossenen Ende. Im Rohr selbst entsteht bei akustischer Anregung eine stehende Schall-

welle mit einem Viertel der gesamten Wellenlänge und wir erhalten eine Resonanzfrequenz von $\nu_{Resonanz} = c/(4 * L_{Ohrkanal})$. Man spricht hier von einem Lambda-Viertel-Resonator, der auch bei gedackten Orgelpfeifen und Klarinetten für einen tiefen Grundton sorgt. Keefe et al. (1994) gibt die Länge des Gehörgangs für Erwachsene mit 23 mm und einen Durchmesser von 8 mm an. Mit einer Mündungskorrektur ($0,6133 \times \text{Radius}$) von ≈ 2 mm und die verbreiterte Concha zur Hälfte ihrer Tiefe von 10 mm, also 5 mm hinzugerechnet, ergeben sich etwa 30 mm effektive Gehörgangslänge. Daraus errechnet sich mit der Schallgeschwindigkeit $c = 340$ m/s eine Resonanzfrequenz von $\nu_0 \approx 2800$ Hz. Liu und Chen (2000) haben mit Sondenmikrofonen in situ Resonanzen im Gehörgang vor dem Trommelfell gemessen und dabei Werte zwischen 2600 Hz und 2900 Hz gefunden, was mit der errechneten Resonanzfrequenz gut übereinstimmt.

Erwachsene in Deutschland haben ein durchschnittliches Ohrkanalvolumen von etwa 1,45 ml (um $-0,2$ ml korrigiert); das der deutschen Kinder beträgt etwa 0,92 ml. Daraus errechnet sich ein Volumenverhältnis von $V_{Erwachsene}/V_{Kinder} = 1,576$ und daraus wiederum ein Längenverhältnis von $L_{Erwachsene}/L_{Kinder} = \sqrt[3]{1,576} = 1,163$. Das Längenverhältnis ist die entscheidende Größe für den Änderungsfaktor der Resonanzfrequenz. Der Resonator sorgt für eine verbesserte Übertragung der Frequenzen, die für die Sprachverständlichkeit wichtig sind.

Schall wird hinsichtlich seiner spektralen Zusammensetzung, d. h. durch die enthaltenen Frequenzanteile gekennzeichnet. So spricht man von Tönen, wenn nur eine einzelne Frequenz erzeugt wird und von Klängen, wenn Obertöne mit einem Vielfachen der Grundfrequenz zusammenklingen. Alle anderen Frequenzgemische nennt man Geräusche. Bei Ermittlung der Hörschwelle durch Knochenleitung wird zur Veräufung des Gegenohres ein Schmalbandrauschen verwendet, um ein Übersprechen des Tones auf das Gegenohr zu maskieren.

Wenn in der Musik von Tönen gesprochen wird, handelt es sich streng genommen um Klänge mit unterschiedlichen Obertonanteilen und gemeint ist der Grundton eines Instrumentes oder einer Singstimme. Übliche Tonleitern (z. B. C-Dur) bestehen aus den 7 Einzeltönen c, d, e, f, g, a und h mit 5 Ganztonstufen und einem Halbtonschritt zwischen e und f. Mit einem weiteren Halbtonschritt von h nach c' wird der 8. Ton erreicht, dessen Intervall zum Grundton deshalb auch Oktave genannt wird. Dieser 8. Ton zeichnet sich durch seine enge Verwandtschaft zum Grundton aus und hat genau die doppelte Frequenz wie dieser. Wenn man von Oktaven spricht, ver-

steht man darunter Tonintervalle mit dem Frequenzverhältnis 2^n (mit $n \in \mathbb{Z}$). Bei der wohltemperierten Stimmung wird diese Oktave in zwölf gleich große Halbtöne (a, h, b, c, cis/des, dis/es, e, f, fis/ges, g, gis/as, a') untergliedert, die die Grundelemente der abendländischen Musik bilden und sich in jeder Oktavstufe wiederfinden. Die Oktave wird hinsichtlich der Frequenzen dabei nicht arithmetisch (linear) sondern geometrisch unterteilt. Wir haben also keine konstanten additiven Frequenzschritte von einem Halbton zum nächsten, sondern ein konstantes Frequenzverhältnis als multiplikativen Faktor $q = \sqrt[12]{2} \approx 1,059$. Jedes Tonintervall kann jetzt durch mehrfache Multiplikation mit dem Faktor q gebildet werden. Eine kleine Terz z. B. besteht aus drei Halbtonschritten und deren Frequenz wird durch $\nu_{\text{terz}} = \nu_{\text{Grundton}} \times q^3$ ermittelt. Allgemein gilt $\nu_{\text{Intervall}} = \nu_{\text{Grundton}} \times q^n$ (mit $n \in \mathbb{Z}$, der Anzahl der enthaltenen Halbtonschritte). Bei positiven Werten für n geht das Intervall in der Frequenz nach oben – der Ton wird höher empfunden, bei negativen geht es nach unten – der Ton wird tiefer empfunden.

Die ISO 389-7 gibt die Hörschwellen im gesamten Hörbereich von 20 Hz bis 16 kHz unter Freifeldbedingungen und Diffusfeldbedingungen in dB SPL relativ zur Referenz von $20 \mu\text{Pa}$ in Terzabständen an. Terzabstand bedeutet eine Unterteilung einer Oktave in drei gleich große Abstände (drittel Oktave) in einer logarithmischen Frequenzdarstellung. Das sind sogenannte große Terzen, die sich aus zwei Ganztönen oder vier Halbtönen bilden lassen mit $\nu_{\text{Terz}}/\nu_{\text{Grundton}} = q^4 \approx 1,260$. Als Dritteloktave ausgedrückt wäre das $\sqrt[3]{2} \approx 1,260$.

Die Verschiebung der Resonanzfrequenz, die aus dem Längenverhältnis der Gehörgangskanäle von Erwachsenen und Kindern errechnet wurde, liegt bei einem Faktor von 1,163. Dieses Frequenzverhältnis ist größer als bei einem Ganzton mit $\nu_{\text{Ganzton}}/\nu_{\text{Grundton}} = q^2 \approx 1,122$ und kleiner als bei einer kleinen Terz mit einem Verhältnis von $\nu_{\text{terz}}/\nu_{\text{Grundton}} = q^3 \approx 1,189$. Da die Hörschwelle in ISO 389-7 in erster Linie für Männer gilt, soll dieser Frequenzvergleich noch zwischen Kindern und Männern geführt werden, für Mädchen und Jungen getrennt. Die korrigierten Ohrkanalvolumen von Mädchen betragen 0,87 ml, von Jungen 0,96 ml und von Männern 1,56 ml. Beim Vergleich der Ohrkanalvolumina von Mädchen mit Männern ergibt sich ein Volumenverhältnis $V_{\text{Mann}}/V_{\text{Maed.}} \approx 1,793$ und ein Längenverhältnis von $L_{\text{Mann}}/L_{\text{Maed.}} \approx \sqrt[3]{1,793} \approx 1,215$. Daraus folgt, dass die Resonanzfrequenz des Gehörgangs von Mädchen recht genau zwischen einer kleinen und großen Terz höher liegt als die von erwachsenen Männern. Die Mitte zwi-

schen einer kleinen und großen Terz wird durch geometrische Mittelung gebildet: $\sqrt{\nu_{\text{terz}} \times \nu_{\text{Terz}}}/\nu_{\text{Grundton}} \approx 1,224$. Der Vergleich von Jungen mit Männern führt zu einem Volumenverhältnis von $V_{\text{Mann}}/V_{\text{Junge}} \approx 1,625$ und entsprechend einem Längenverhältnis von $L_{\text{Mann}}/L_{\text{Junge}} \approx \sqrt[3]{1,625} \approx 1,176$. D. h., dass bei Jungen die Resonanzfrequenz knapp eine kleine Terz ($\nu_{\text{terz}}/\nu_{\text{Grundton}} \approx 1,189$) höher liegt als bei Männern. Der Unterschied zwischen Mädchen und Jungen beträgt als Längenverhältnis ausgedrückt: $L_{\text{Junge}}/L_{\text{Maed.}} \approx 1,033$, was etwas mehr als einem Vierteltonabstand entspräche.

Um die Konsequenzen aus der Resonanzverschiebung für die Hörfähigkeit von Kindern zu verdeutlichen, soll folgendes Gedankenexperiment durchgeführt werden. Die Hörschwellkurve für Erwachsene aus ISO 389-7 soll mit einer Kurve verglichen werden, die auf der Frequenzachse etwas zu höheren Frequenzen hin verschoben und dadurch an das kindliche Ohr mit kleineren Gehörgangsvolumina adaptiert ist. In Abb. 4.1 sind die beiden Kurven gemeinsam dargestellt. Die Normhörschwellenkurve für Erwachsene ist mit „ISO-389-7“ bezeichnet und die zweite Kurve mit den gleichen Schwellwerten mit „ISO+Terz“, die aber um eine große Terz bzw. eine Dritteloktave nach oben, entsprechend im Diagramm um eine Einheit nach rechts verschoben ist. Die Form der Kurve hat sich dabei nicht verändert.

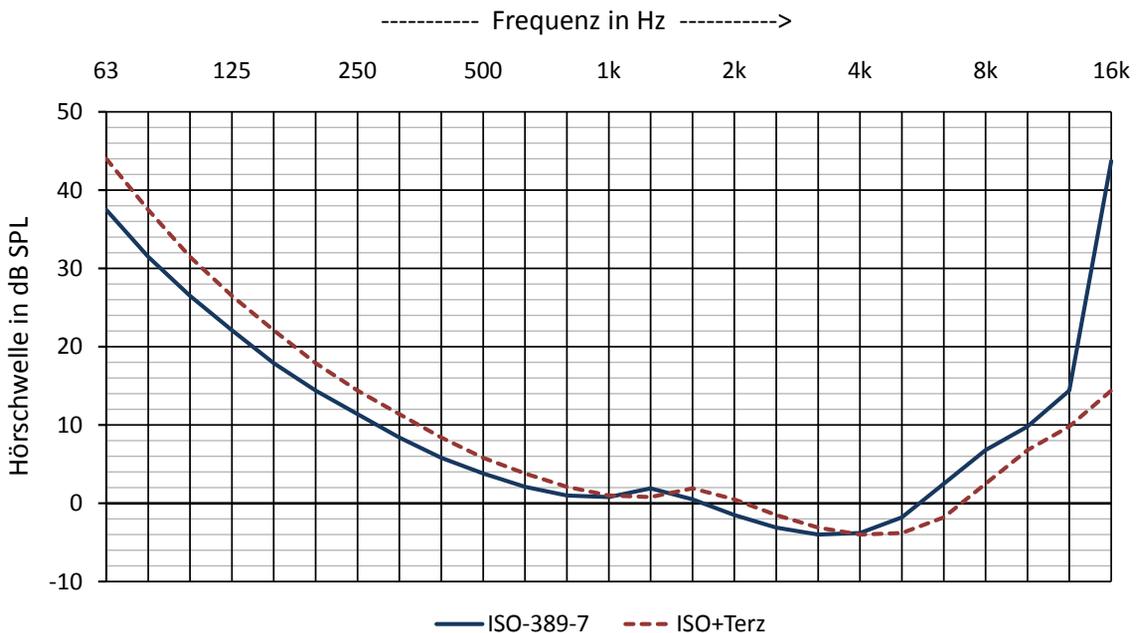


Abbildung 4.1: Terzverschiebung der ISO 389-7 Diffusfeld-Hörschwelle im Frequenzbereich um eine Terz nach oben und Vergleich mit der Ausgangskurve.

Die unterbrochene Hörschwelldkurve „ISO+Terz“ repräsentiert das kindliche Hörvermögen. Aus dem Vergleich der beiden Kurven ergeben sich für Kinder höhere Schwellwerte als für Erwachsene im Frequenzbereich unterhalb von 1 kHz, ebenso zwischen 1,5 kHz und 4 kHz, aber etwas niedrigere Schwellwerte oberhalb von 4 kHz. Bei 1 kHz, zwischen 1,25 kHz und 1,6 kHz und bei 4 kHz schneiden sich die beiden Hörschwelldkurven. Schnittpunkte der Kurven bedeuten, dass hier geringe bzw. keine Unterschiede bei Hörschwelldwerten von Erwachsenen und Kindern bestehen. Für die Schnittpunkte bei 1 kHz und 4 kHz wird das durch die enger zusammenliegenden Alterslinien der Alterskorrektur bei diesen beiden Frequenzen bestätigt (siehe Abb. 3.18 auf Seite 59).

Die Differenzkurve der beiden gegeneinander verschobenen Kurven aus Abb. 4.1, ist in Abb. 4.2 als „ISO- Δ -Terz“ dargestellt. Zu dieser wurde eine Regressionsgerade („Linear-(ISO- Δ -Terz)“) eingezeichnet, die eine Steigung von $-1,2$ dB/Oktave hat. Dabei wurde die Differenz bei 16 kHz, die nahezu 30 dB beträgt, als ein alles übertragender Extremwert nicht berücksichtigt. Der Konvention für die Darstellung von Audiogrammen folgend, sind hier negative Funktionswerte nach oben und positive nach unten aufgetragen und entsprechendes gilt für die Steigung der Geraden.

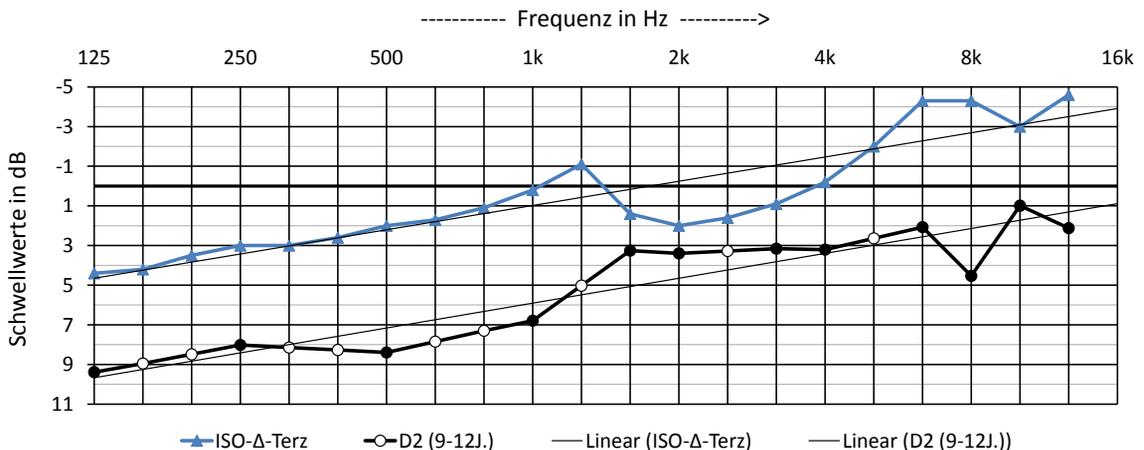


Abbildung 4.2: Terzdifferenzen der ISO 389-7 Schwellwerte im Vergleich mit der Hörschwelldkurve der Gruppe D2 (9–12 J.), jeweils mit Regressionsgeraden.

Die zweite Kurve Abb. 4.2 ist die Hörschwelldkurve der Altersgruppe „D2 (9–12 J.)“ des rechten Ohres im logarithmischen Frequenz-Maßstab. Die gefüllten Symbole dieser Kurve entsprechen den gemessenen Schwellwerten der Querschnitt-Studie

in Tab. 3.8 und Abb. 3.13 (siehe Seite 49). Da bei Audiogrammen Hörschwellwerte im Oktavabstand bzw. näherungsweise Halboktavabstand gemessen werden, gibt es nicht für alle Terzen entsprechende Messwerte. Die ungefüllten Kreissymbole der Kurve „D2 (9–12 J.)“ repräsentieren interpolierte Hörschwellenwerte für nicht direkt gemessene Terzfrequenzen. Auch zu dieser Kurve wurde eine entsprechende Regressionsgerade eingetragen, deren Steigung ebenfalls $-1,2$ dB/Oktave beträgt, was man an dem parallelen Verlauf sieht. Der vertikale Abstand der beiden Regressionsgeraden beträgt bei allen Frequenzen etwa 5 dB. Wenn man die durchschnittliche Hörschwellkurve der Altersgruppe „D2 (9–12 J.)“ um diese 5 dB im Diagramm nach oben verschiebt, liegen die beiden Regressionsgeraden ziemlich genau aufeinander. D. h. die Hörschwelle der Gruppe D2 (9–12 J.) ist gegenüber der ISO-Null-Linie um 5 dB verschoben und um eine Steigung von $-1,2$ dB pro Oktave gekippt.

Für Frequenzen bis $1,5$ kHz zeigen die beiden Kurven in Abb. 4.2 einen ähnlichen Verlauf, doch oberhalb dieser Frequenz zeigen sich auch entgegengesetzte Verläufe. So nähern sich die Kurven bei 2 kHz stark an, mit etwas mehr als 1 dB Abstand, um sich dann bei 8 kHz bis fast 9 dB voneinander zu entfernen. Als Ursache für diese differierenden Verläufe kommen die unterschiedlichen Einzelresonanzen infrage, aus welchen sich die Hörschwellkurve „ISO-389-7“ in Abb. 4.1 zusammensetzt. Bei der Verschiebung um eine Terz zur Bildung der Kurve „ISO+Terz“ wurden alle Teilresonanzen um den gleichen Faktor mitverschoben, was bei der Ausreifung der Mittelohr-Komponenten nicht im gleichen Maße der Fall sein muss.

Bei der Kalkulation der Resonanzverschiebung aus den gemessenen Ohrkanalvolumen ergaben sich für Mädchen größere Verschiebungen als für Jungen gegenüber erwachsenen Männern. Daraus lässt sich für Mädchen eine schlechtere Hörfähigkeit bei tieferen Frequenzen und eine bessere für hohe Frequenzen ableiten. Im Kapitel Geschlechtsunterschiede ab Seite 50 ff. wird das durch die Hörtestergebnisse bestätigt.

Die beobachteten Unterschiede zwischen Kindern und Erwachsenen, aber auch die Geschlechtsunterschiede lassen sich nicht im ganzen Umfang mit den unterschiedlichen Gehörgangvolumina erklären. Dazu waren die daraus errechneten Resonanzverschiebungen nicht groß genug. Selbst die größte Verschiebung bei den Mädchen mit $L_{Mann}/L_{Maed.} \approx 1,215$ erreichte nicht die große Terz mit $\nu_{terz}/\nu_{Grundton} \approx 1,260$, die bei dem Gedankenexperiment in Abb. 4.1 angesetzt wurde. Es muss also einen weiteren Einflussfaktor für diese Resonanz-Verschiebung geben, der sich der Aus-

wirkung des Ohrkanalvolumens bzw. der Gehörganglänge hinzuaddiert. Für diesen Faktor kommt das Wachstum des Mastoid-Systems infrage, das im folgenden Kapitel beschrieben wird.

4.3.2 Der Einfluss des Mastoidsystems auf die Hörschwelle

Während der fetalen Phase des Menschen hat die Entwicklung des Gehirns oberste Priorität. Dies findet seinen Ausdruck in der Dominanz des oberen Schädelvolumens, in dem das Gehirn seinen Platz hat. Wie schon erwähnt, ist die Cochlea zur Zeit der Geburt bereits völlig ausgereift und die schwingenden Elemente des Mittelohres, Trommelfell und Gehörknöchelchen weitgehend fertig entwickelt. Für das Mastoid als raumfordernder Mittelohrkomponente ist zunächst nur wenig Platz vorhanden. Da zur Entwicklung der Mastoid-Zellen zudem eine gute Belüftung des Mittelohres notwendig ist, beginnt das Wachstum erst nach der Geburt, wenn die Atmung einsetzt. Das Volumen dieser Zellen wächst von der Geburt bis zum Erwachsenenalter um ein Vielfaches und macht den größeren Anteil des Gesamtvolumens im Mittelohrraum aus.

Die Volumensteifigkeit des Mittelohres ist eine sehr wichtige Komponente für die Transferfunktion der Schallübertragung. Ein größeres Volumen führt zu einer geringen Steifigkeit, was die Übertragung von tiefen Frequenzen begünstigt. Fleischer (1978) hat darauf hingewiesen, dass Säugetiere, die in offenem Gelände wie Wüsten leben, eine gute Hörfähigkeit für tiefe Frequenzen haben müssen, um ihre vergrößerte „biologische Distanz“ kontrollieren zu können. Die Natur findet hier einen Kompromiss zwischen den beiden Forderungen: große Reichweite der tiefen Frequenzen und hoher Informationsgehalt der hohen Frequenzen. Die betreffenden Spezies verfügen über große Volumina hinter dem Trommelfell mit geringer Volumensteifigkeit und guter Übertragung der tiefen Frequenzen.

Die Natur hat noch eine weitere Möglichkeit zur verbesserten Hörbarkeit tiefer Frequenzen gefunden, wenn für ein vergrößertes Mittelohrvolumen kein Platz vorhanden ist. Diese besteht in der Entwicklung einer Art von spongiosen Material, das durch Reibung zu einer Bedämpfung der Resonanz führt und eine Verbreiterung des übertragenen Spektrums mit sich bringt. Die Ausdifferenzierung der Mastoid-Zellen in einem ans Mittelohr angekoppelten Zusatzvolumen ist die Umsetzung dieser Methode, die mit einem weiteren Vorteil verbunden ist. In einer einfachen Höhle erfolgen

die Zustandsänderungen des eingeschlossenen Gases bei Kompression und Expansion adiabatisch, wenn die Änderungen schnell erfolgen. Das ist beim Hörschall der Fall. Stärker als das Volumen des Mastoids wächst die durchblutete Oberfläche der Mastoidzellen, die Wärme aufnehmen und abgeben können. Dadurch wird ein Wärmeaustausch möglich und die adiabatischen Zustandsänderungen des Gases in der leeren Höhle gehen zu isothermen Zustandsänderungen in der zellerfüllten Mastoidhöhle über. Das wiederum bedeutet ein Ansteigen des wirksamen Volumens um einen Faktor von bis zu 1,4 (Zollner und Zwicker 1993), entsprechend dem Adiabatenexponenten von Luft: $p \times V^\kappa = \text{const.} \Rightarrow p \times V = \text{const.}$, mit $\kappa_{\text{Luft}} = 1,4$. Dieser Gewinn an effektivem Volumen wird allerdings durch den Raumbedarf der Zellen selbst mehr oder weniger kompensiert. Deshalb dürfte der Haupteffekt des Mastoids vermutlich in der Bedämpfung der Resonanz liegen. Für hohe Frequenzen geht der Einfluss des Mastoids auf die Schallübertragung zurück, da der Reibungswiderstand im engen Antrum Mastoideum mit der Frequenz zunimmt und damit das Mastoid in seiner Wirksamkeit mehr und mehr vom Mittelohrraum abgekoppelt wird. Zu hohen Frequenzen hin nimmt damit auch die Dämpfung ab, die von der inneren Reibung im Medium Luft stärker betroffen sind als tiefe Frequenzen.

Zum Verständnis der Schallübertragung in das Ohr wurden im Laufe der Zeit eine ganze Reihe von mathematischen Modellen für die Funktionen des Mittelohres erstellt. Bei der Modellierung wurden zwei prinzipiell unterschiedliche Systeme bzw. Methoden verwendet. Sehr verbreitet sind Modellierungen mit elektrischen Bauelementen, für die aus der Elektrotechnik entsprechende Rechenmethoden zur Verfügung stehen. Price und Kalb (1991) verwenden diese Methoden, um das Schadensrisiko von lauten Schallereignissen zu bestimmen und verweisen dabei auf ältere Modelle von Zwislocki (1962) und Lynch et al. (1982). Diese elektrischen Modelle haben den generellen Nachteil, dass bestimmte dynamische Vorgänge damit nicht adäquat abgebildet werden können. Die zweite Gruppe der rein mechanischen Ohrmodelle ist etwas komplizierter zu rechnen. Dafür können sie aber das natürliche Schwingverhalten im dreidimensionalen Raum besser wiedergeben. Das gilt besonders für die mechanischen Modelle, die mittels der Finite Element Methode auch die Eigenverformung der beteiligten Strukturen berücksichtigen können. Dies wurde allerdings erst möglich durch die enorm gewachsene Rechnerleistung in den letzten Jahren. Eiber (2008) hat ein solches Modell mit 77 Freiheitsgraden realisiert und kann damit die Einflüsse einzelner Komponenten gezielt untersuchen. Dieses Modell

wurde immer weiter verfeinert, aber bereits in früheren Varianten zur Untersuchung und Optimierung von Mittelohrprothesen (Eiber et al. 1999) herangezogen.

Der Einfluss eines sich vergrößernden Mastoidvolumens wurde freundlicherweise von der Arbeitsgruppe Eiber im Institut für Technische und Numerische Mechanik an der Universität Stuttgart mit dem erwähnten mechanischen Ohrmodell berechnet. Die Resultate sind in einem Institutsbericht festgehalten (Eiber et al. 2008) und dem Autor zur Verfügung gestellt worden. Die Simulation ergibt für einen Anstieg des Mastoidvolumens von 2 ml auf 3 ml eine Zunahme der Stapesamplitude von etwa 2 dB für die Frequenzen 125 Hz, 250 Hz und 500 Hz. Die Anregung erfolgte mit einem Schalldruck von 1 Pa oder 94 dB SPL am Eingang des äußeren Gehörgangs. Zu höheren Frequenzen hin werden die Amplitudenunterschiede kleiner und es kommt sogar zu einer Abnahme der Amplituden zwischen 1 kHz und 3 kHz. Für Frequenzen oberhalb von 5 kHz, ist kein Einfluss mehr zu beobachten.

Lee et al. (2005) untersuchten bei 9 Altersgruppen in 10-Jahresabständen die Mastoidzellen aus CT-Aufnahmen und ermittelten die Volumina dieses Zellsystems durch 3-D Rekonstruktion. Das Volumen wächst von durchschnittlich etwa 3 ml bei der jüngsten Altersgruppe (0–9 J.) bis etwa 7 ml bei der zweiten Altersgruppe (10–19 J.). Bis zum Alter von 30–39 Jahren, ändern sich die Volumina nicht mehr, um dann kontinuierlich zwischen 40 Jahren und 89 Jahren wieder abzunehmen bis zu Werten, die mit etwa 2 ml unter die der ersten Altersgruppe zurückfallen.

Interessant ist die nach Geschlecht getrennte Betrachtung dieser Wachstumsverläufe. In der ersten Altersgruppe (0–9 J.) sind die Volumina für Jungen im Schnitt mit über 4 ml fast viermal so groß wie die der Mädchen, die nur wenig über 1 ml maßen. In der zweiten Altersgruppe (10–19 J.) glichen sich die Volumen einander an, wobei die der Mädchen sogar etwas größer als 7 ml wurden. Im weiteren Altersverlauf liegen die Mastoidvolumen für Männer immer über denen von Frauen und erreichen in der Altersgruppe 20–29 Jahren ihr Maximum mit etwas über 8 ml, während hier die Volumina der Frauen bereits wieder unter 7 ml abgesunken sind. Diese Geschlechtsunterschiede im Mastoidvolumen zwischen den beiden ersten von Lee et al. (2005) untersuchten Altersgruppen bestätigen ebenfalls die von uns gefundenen Geschlechtsunterschiede bei tiefen Frequenzen ab Seite 50 ff, wie schon beim Vergleich der Ohrkanalvolumina.

Die vorangegangene Diskussion hat die Ursachen für den unterschiedlichen Frequenzverlauf der kindlichen Hörschwellen ausführlich beleuchtet, aber noch keinen

Hinweis auf Ursachen für die generelle Parallaxverschiebung dieser Hörschwellen erbracht. Die zitierten Autoren argumentieren hierzu sehr zurückhaltend und vermuten hauptsächlich einen Einfluss der geringeren Compliance als Ursache für die schlechteren Hörschwellwerte bei jüngeren gegenüber den älteren Kindern. Dem stehen die Untersuchungsergebnisse von Elliott und Katz (1980) entgegen, die bei Kindern eine höhere Hörschwelle fanden, aber keine erhöhten Mithörschwellen in Störgeräuschen. Beide Testverfahren erfordern ein hohes Maß an Aufmerksamkeit und würden in ähnlicher Weise durch Konzentrationsmängel im Ergebnis beeinträchtigt.

Die Forschungsergebnisse, die überwiegend mit akustisch evozierten Potentialen ermittelt wurden und besonders mit den stationären Varianten dieser Verfahren geben Hinweise dafür, dass die Ursachen vermutlich in unausgereiften Gehirnstrukturen zu suchen sind. Im Folgenden soll dieser Aspekt etwas näher beleuchtet werden.

4.3.3 Ausreifung von Hörbahn und Cortex

In einem Übersichtsartikel diskutiert Werner (1996) die Reifung des komplexen Hörvorgangs. Dabei werden vier Aspekte betrachtet: 1. die Frequenzauflösung, 2. die Wahrnehmungsschwelle, 3. die Zeitauflösung und 4. die Intensitätsauflösung. Bei allen finden Reifungsprozesse statt, die in unterschiedlichem Ausmaße und in unterschiedlichen Zeitperioden vom Kleinkindalter zum Teil bis ins Erwachsenenalter andauern. Es wird auch auf die Frage eingegangen, ob physiologische Reaktionen notwendigerweise zu einer Wahrnehmung führen. Denn es könnte sein, dass zwar die Sensorik bereits ausgereift, aber die Wahrnehmung bzw. die Verarbeitung der Reize noch unreif ist. Zwei Entwicklungen laufen parallel ab bzw. greifen ineinander: die Reifung der Hörbahn als primärer Prozess und die Entwicklung der zentralen Verarbeitung der angelieferten Signale im Cortex als sekundärer Prozess. Beide Vorgänge beeinflussen das Hören.

Bereits Murphy (1969) stellte fest, dass eine auditorische Reaktion nicht notwendigerweise eine Hörwahrnehmung impliziert. Das Hören setzt cortikale Funktionen voraus. Solange diese Funktionen nicht überprüfbar waren, wurde eine Reaktion nicht als beweiskräftig angesehen. Das bezieht sich aber mehr auf die Erkennung komplexerer Muster wie Sprache etc. Altersangaben für die Erlangung bestimmter Fähigkeiten des Hörsystems fehlen leider.

Aus dem gleichen Jahr stammen Untersuchungen von Siegenthaler (1969). Er fand eine Entwicklung der Hörfähigkeit sowohl bei Hörschwellen-Untersuchungen als

auch bei anderen Aspekten des Hörvermögens. Zwischen 4 und 8 Jahren verbessert sich bei den untersuchten Kindern die Hörschwelle um durchschnittlich 5 dB. Bei Kindern ab 12 Jahren erreichen auch weitere Fähigkeiten wie z. B. Reaktionszeiten das Niveau von Erwachsenen.

Ein wichtiger Aspekt für das Erkennen von Tönen ist die Erwartung eines bestimmten Tones. Nach Dai et al. (1991) führt bei Erwachsenen die Erfahrung des Höreindrucks eines Tones und dessen Erwartung zu einer bis zu 7 dB besseren Hörschwelle für diesen Ton. Kleinkinder zeigen hier keine Verbesserungen, sie profitieren offensichtlich nicht von der Erfahrung. Während diese Fähigkeit bei Kleinkindern völlig fehlt, könnte diese bei jüngeren Kindern noch nicht völlig entwickelt und bei älteren Kindern aber bereits weiter fortgeschritten sein. Das kann eine mögliche Erklärung für sinkende Hörschwellen bei allen Testfrequenzen mit zunehmendem Alter sein.

Trehub et al. (1988) fanden bei 5-Jährigen Schwellwerte des Hörvermögens bei einer Frequenz von 10 kHz, die denen von Erwachsenen entsprechen. Bei 4 kHz waren diese um 1–2 dB und bei 1 kHz etwa 5 dB höher. Bei 400 Hz Tönen erreichen erst die 10- bis 12-Jährigen die Schwellwerte von Erwachsenen. Bei diesen Versuchen wurden Stimuli aus Rauschen mit Oktavbandbreite verwendet.

Ari-Even Roth et al. (2002) untersuchten das Phänomen der zeitlichen Rückwärtsmaskierung von Testtönen bei Kindern und Erwachsenen. Mit der Methode „Three-Alternative Forced-Choice adaptive Procedure“ fanden sie heraus, dass die Schwelle für die Erkennung eines 1 kHz Tons aus einem zeitlich nachfolgenden Verdeckungsgeräusch bei Kindern unter 11 Jahren gegenüber Erwachsenen deutlich erhöht ist. Die zeitliche Auflösung des Hörens erreicht also erst mit etwa 11 Jahren das Niveau von Erwachsenen. Hartley et al. (2000) quantifizierten diese Schwellenerhöhung für 6-Jährige mit ähnlichen Methoden und fanden sogar bis zu 34 dB Unterschiede, was man aber nicht auf die absolute Hörschwelle übertragen kann. Buss et al. (2001) untersuchten ebenfalls das Phänomen der zeitlichen Rückwärtsmaskierung von Testtönen bei Kindern und Erwachsenen. Die Kindergruppe im Alter zwischen 6 und 11 Jahren hatte bei der Ermittlung der biometrischen Funktion im Schnitt 12,5 dB höhere Schwellwerte. Als Untersuchungsmethoden dienten drei unterschiedliche Varianten der „Three-Alternative Forced-Choice adaptive Procedure“, deren Ergebnisse dabei verglichen werden sollten: 1. „3-down, 1-up adaptive staircase Levitt!“, 2. „maximum likelihood estimation (MLE)“ und 3. „method of constant stimuli“.

Buss et al. (2006) überprüften, ob sich die geringeren Hörfähigkeiten von Kindern auf eine angenommene innere Rauschquelle, die maskierend wirkt, zurückführen lassen. Dies konnte durch Versuche mit der Erkennung von Testtönen in Schmalbandrauschen experimentell bestätigt werden und weist darauf hin, dass Testtöne erst gehört werden, wenn sie sich aus dem internen Rauschen herausheben.

Die Untersuchungen von Buss et al. (2009) im Bereich der Wahrnehmungspsychologie zeigten, dass die Fähigkeit zur Unterscheidung von reinen Tönen unterschiedlicher Intensität bei Kinder herabgesetzt ist und zu geringeren Steigungen für die entsprechenden psychometrischen Funktionen führt.

Stollman et al. (2004) untersuchten die auditorische Verarbeitung von Kindern in einer Längsschnitt-Studie im Alter von 6, 7, 8, 10, und 12 Jahren im Vergleich zu jungen Erwachsenen. Dabei ergab sich eine Steigerung der auditorischen Verarbeitung bis zum Ende des Untersuchungszeitraums, also bis zum Alter von 12–13 Jahren. Nur die Untersuchungen zum Sprachverstehen im gleichzeitig angebotenen Störgeräusch ergab keine Steigerung der Hörfähigkeit.

Stuart (2005) untersuchte das zeitliche Auflösungsvermögens des Gehörs durch Wortverständnistests im Umgebungsgeräusch bei normal hörenden Schulkindern im Alter von 6–15 Jahren im Vergleich zu normal hörenden jungen Erwachsenen. Dabei wurden zwei unterschiedliche Maskierungsarten, einmal ein Dauergeräusch und dann ein unterbrochenes Geräusch gleichen Energieinhaltes angeboten. Bei Signal-Rauschabständen < 10 dB hatten die Erwachsenen und Kinder ab 11 Jahren eine bessere Erkennungsrate bei den unterbrochenen Störgeräuschen, während bei den jüngeren Kindern unter 8 Jahren keine Unterschiede gefunden wurden. Daraus wurde gefolgert, dass diese Unterschiede ebenfalls die Ausreifung des zentralen auditorischen Systems anzeigen.

Moore (2002) untersuchte die Entwicklung des auditorischen Cortex und unterscheidet 3 Entwicklungsperioden, die sich jeweils auf ein unterschiedliches axonales System beziehen. Die letzte Entwicklungsperiode liegt zwischen 5 und 12 Jahren, wo sich Verknüpfungen zwischen verschiedenen cortikalen Layern entwickeln, die miteinander interagieren. Insbesondere für die weitergehende Sprachentwicklung scheint dieser Reifungsprozess wichtig zu sein.

Im Bereich der Gehirnentwicklung des Menschen gibt es eine ganze Reihe von Untersuchungen zur Ableitung von Hirnströmen durch akustische Anregung, wo Unterschiede zwischen kindlichen und erwachsenen Wellenmustern gefunden wur-

den. Diese Hirnströme werden durch die Messung der Spannungsänderungen auf der Kopfhaut als akustisch evozierte Potentiale (AEP) bezeichnet, die je nach Ableitungsort und Latenzzeit in drei unterschiedliche Potentialarten eingeteilt werden: 1. die frühen (im Hirnstamm, Latenz < 10 ms), 2. die mittleren (im Mittelhirn, Latenz 10–50 ms) und 3. die späten evozierten Potentiale (im Cortex, Latenz 50–1000 ms). Die Ableitung der frühen Potentiale, auch BERA (brainstem evoked response audiometrie) oder Hirnstammaudiometrie genannt, dient heute der möglichst flächendeckenden Überprüfung Neugeborener auf Hörfähigkeit. Auf dem Gebiet des Neugeborenen-Screening gewinnt allerdings die Auslösung und Messung von otoakustischen Emissionen immer größere Bedeutung, da der technische Aufwand gegenüber der BERA etwas geringer ist. Bei Ableitung der Hirnströme werden die einzelnen Wellenabschnitte der frühen Potentiale mit den römischen Ziffern I–V durchnummeriert und lassen auf den Ort der Auslösung schließen. Die mittleren Potentiale, werden mit der Buchstabenkombination Na und Pa nach der Polarität negativ und positiv bezeichnet. Die späten Potentiale werden ebenfalls nach Polarität mit N und P bezeichnet, aber mit den arabischen Ziffern 1 und 2 als wichtigsten Komponenten nummeriert. Sehr späte Komponenten werden dann z. B. als P300 bezeichnet, wobei die Zahl die ungefähre Latenzzeit des Auftretens nach der Stimulation in Millisekunden angibt.

Die Änderungen in der Entwicklung der sensorisch evozierten Potentiale durch Hören, Fühlen und Sehen können nach Eggermont (1988) durch 3 exponentiell abklingende Funktionen beschrieben werden. Die Zeitkonstanten dieser Funktionen betragen 4 Wochen, 40 Wochen und 4 Jahre. Die Änderungen beziehen sich auf die Differenz der Hirnwellen-Amplituden von Kindern mit wachsendem Alter gegenüber den Erwachsenen. D. h. die Unterschiede verringern sich in gleichen Zeitabständen um den Faktor e (Eulersche Zahl $\approx 2,7$). Bei den späten akustisch evozierten Potentialen verläuft die Ausreifung der Wellenmuster entsprechend der längsten Zeitkonstanten von 4 Jahren, die aber auch bei der Entwicklung der frühen Potentiale noch eine gewisse Rolle spielt. Besonders die Ausprägung der N1-Welle entwickelt sich bis hinein ins Erwachsenenalter. Čeponienė et al. (2002) stellen aufgrund ihrer Untersuchungen einen Zusammenhang zwischen der Entwicklung der auditorischen Sensitivität und der Veränderungen der N1 Wellenkomponente fest.

Sharma et al. (1997) untersuchten die Entwicklung der altersgemäßen Ausprägung der Wellenformen bei späten akustisch evozierten Potentialen durch Anregung mit

Konsonant-Vokal-Silben. Betrachtet wurden das Maximum P1 und das Minimum N1. Die Latenzzeiten dieser lokalen Extremwerte der Hirnstromkurven verringern sich mit dem Alter. Die Latenzzeit vom Maximum P1 verringert sich von etwa 100 ms bei 7-Jährigen bis auf etwa 50 ms bei Erwachsenen. Die Latenzzeit des Minimums N1 verringert sich ebenfalls auf die Hälfte (von >200 ms auf >100 ms).

Ähnliche Ergebnisse fanden auch Takeshita et al. (2002), die akustisch evozierte Potentiale simultan mit akustisch evozierten Magnetfeldern bei Kindern von 6–14 Jahren im Vergleich mit Erwachsenen gemessen haben. Charakteristische Anteile in späten (kortikalen) Potentialen werden hier durch die Latenzzeit bezeichnet, also P100 und N200 etc. Bei den Magnetfeldern wird bei der Bezeichnung noch ein m angehängt, z. B. N250m. Die Latenzzeiten werden mit zunehmendem Alter der Schulkinder immer kürzer. Durch die Hinzunahme der magnetischen Felder konnten die Schaltzentren im Gehirn besser lokalisiert werden.

Wunderlich und Cone-Wesson (2006) fanden auch Verkürzungen aller Latenzzeiten von Hirnwellenkomponenten der späten akustisch evozierten Potentiale bei Erwachsenen gegenüber Kindern oder Neugeborenen. Die Komponenten P1 und N2 verringern dabei ihre Amplitude, die Komponenten N1 und P2 dagegen vergrößern diese.

Sussman et al. (2008) untersuchten späte kortikale Potentiale durch Reinton Stimulation mit relativ schnellen Stimulusraten bei Kindern von 8–11 Jahren und bei Heranwachsenden 16 Jährigen im Vergleich mit Erwachsenen von 22–40 Jahren. Während die Komponenten P1-N1-P2 bei den Heranwachsenden, denen der Erwachsenen vergleichbar sind, war bei ihnen die Komponente N2, die als charakteristisch für Kinder gilt, noch vorhanden. Daraus wird geschlossen, dass die Reifung des auditorischen Cortex bis ins späte Teenager Alter hineinreicht.

Tonnquist-Uhlen et al. (2003) untersuchten mit 30 EEG-Elektroden einen zeitlichen Ausschnitt (Latenz 70–160 ms) der späten Potentiale, den sie wegen der Anordnung der wichtigsten Elektroden am „temporal bone“ als T-Komplex bezeichneten. Die einzelnen Wellenkomponenten haben abweichende Bezeichnungen von den sonst üblichen, zeigen aber teilweise ausgeprägte Änderungen in der Amplitude und der Latenzzeit bei der Ausreifung in einem Altersbereich von 5–20 Jahren. Manche Komponenten verändern sich dabei nicht mit zunehmendem Alter. Das Besondere dieser neueren Methode ist, dass man späte Potentiale auch mit einfachen Klicksignalen stimulieren kann, wo sonst Reaktionen eher mit Sprachsignalen evoziert werden.

Aus der Fülle der Publikationen zur Gehirnentwicklung des Menschen sollten diese Beispiele ausgewählt werden, die demonstrieren, dass es bis ins Erwachsenenalter strukturelle Veränderungen des Gehirns und Veränderungen der Gehirnwellenmuster gibt, die in einem Zusammenhang mit der Entwicklung bzw. Reifung einzelner Fähigkeiten des Hörsystems stehen. Die Sensitivität an der Hörschwelle scheint am ehesten mit der Ausreifung der Wellenkomponente N1 der späten akustisch evozierten Potentiale zu korrespondieren. Bezüglich der Entwicklung der Hörschwelle gibt es vermutlich noch weitere Komponenten, die eine Rolle spielen. Das Hörsystem als Ganzes ist sehr komplex und bietet noch viel Raum für weitere Forschungen zum Verständnis der Zusammenhänge.

Kapitel 5

Zusammenfassung

Hörschäden sind nicht heilbar und können nur durch präventive Maßnahmen vermieden werden. Da Hörtests bei Schulkindern häufig schlechtere Ergebnisse zeigen als bei jungen Erwachsenen, werden daraus regelmäßig düstere Prognosen für die weitere Zukunft abgeleitet. Aber sind diese negativen Prognosen berechtigt? Dieser Frage wurde nachgegangen und in vergleichenden Feldstudien untersucht. In der ISO 7029 wird die Hörfähigkeit als Funktion des Alters beschrieben, berücksichtigt aber nicht Kinder und Jugendliche unter 18 Jahren. Die vorliegende Arbeit stellt einen Versuch dar, diese Lücke zu schließen.

197 otologisch unauffällige Schüler einer deutschen Grundschule (D) wurden mit Audiometern im Frequenzbereich von 125–16.000 Hz untersucht, nachdem eine standardisierte Befragung, ein Audiometrie-Training, eine Ohrinspektion und eine Tympanometrie vorangegangen waren. Dasselbe erfolgte im Rahmen einer Expedition in China mit 91 chinesischen Schulkindern (C). Die deutschen Kinder wurden in zwei: D1 (6–8 J., N=91) und D2 (9–12 J., N=106), die chinesischen in drei Altersgruppen: C1 (6–8 J., N=29), C2 (9–12. J., N=32) und C3 (13–16 J., N=30) aufgeteilt und miteinander verglichen.

Gruppe D2 zeigte ein signifikant besseres Hörvermögen als Gruppe D1. Die gemittelte Hörfähigkeit beträgt bei D1 7,1 dB HL und bei D2 3,6 dB HL. In einer anschließenden Längsschnittstudie mit den Erstklässlern (N=35 aus D1) wurden diese Verbesserungen 3 Jahre später bestätigt. Die gemittelte Hörfähigkeit von C1 ist 6,4 dB HL, von C2=4,7 dB HL und von C3=3,0 dB HL. Im ethnischen Vergleich zeigt sich die gleiche Tendenz mit etwas geringeren Verbesserungen bei chinesischen Kindern. Die Hörentwicklung scheint auch im Alter von 16 Jahren noch nicht ganz abgeschlossen zu sein.

Auffällig ist die bessere Hörfähigkeit der Kinder bei hohen Tönen verglichen mit tiefen Tönen. Zur Norm-Hörschwelle für Erwachsene (ISO 389-7) sind die kindlichen Hörkurven deutlich gekippt. Strukturgrößen wie das Ohrkanal-Volumen sind für diesen Verlauf mit verantwortlich, da aus kleineren Volumen höhere Resonanzfrequenzen resultieren. Bei den deutschen Kindern wurden gemittelte Ohrkanal-Volumina von 1,05 ml bei D1 gemessen und 1,18 ml bei D2. Die chinesischen Kinder haben in Altersgruppe C1 ein gemitteltes Volumen von 0,78 ml, bei C2=0,92 ml und bei C3=0,97 ml. Im Vergleich zu deutschen Kindern sind diese etwa 25% kleiner.

Neben der höheren Resonanzfrequenz des Gehörgangs, spielt auch das kleinere Mastoid-Volumen eine Rolle bei dem auffälligen Frequenzgang der kindlichen Hörschwelle.

Das Hörvermögen von Schulkindern erfährt bei allen Testfrequenzen eine deutliche Entwicklung im Altersverlauf, die mit der Ausreifung des Hörpfades und der Reizverarbeitung im Cortex in Zusammenhang stehen.

Bei der Beurteilung von kindlichen Audiogrammen sollte die Hörentwicklung durch eine Alterskorrektur berücksichtigt werden, um falsche Schlussfolgerungen aus schlechteren Testergebnissen zu vermeiden. Die klinische Relevanz einer solchen Alterskorrektur zeigt sich in einem nur geringen Verlust an Sensitivität von 3,8 % bei der Anwendung eines Schadenskriteriums von 20 dB. Dem steht aber ein deutlich größerer Gewinn von 12,7 % bei der Spezifität gegenüber, die bei Anwendung auf den vorliegenden Datensatz mit 250 deutschen Schülern auf über 85 % ansteigt.

Kapitel 6

Summary

Hearing impairments are preventable by effective precaution but not curable. Audiological test results of school children often are worse than found at young adults, frequently entailing a negative outlook on future developments. But are those bad predictions warranted? The ISO 7029 allows to calculate age-related decrease of hearing acuity up to 8 kHz. However, the effects of ageing on the development of children's hearing are not taken into consideration. Three field studies have been conducted in order to research this subject. The present paper is an attempt to close this gap.

197 otological normal children of a German primary school (D) were tested by audiometry in the frequency range of 125–16.000 Hz. This has been preceded by a questionnaire, otoscopic examination, tympanometric screening and audiometric training. The same procedure was performed in China with 91 otological normal school children (C). The German children were divided in two age groups: D1 (6–8 y., N=91) and D2 (9–12 y., N=106) and the Chinese children in three age groups: C1 (6–8 y., N=29), C2 (9–12. y., N=32) und C3 (13–16 y., N=30) and have been compared thereafter.

The age group D2 had a significant better hearing acuity than D1. The average threshold of D1 was 7.1 dB HL and of D2 3.6 dB HL (taking both ears into consideration). A subsequent study with 35 first graders of age group D1 confirmed this results three years later. The averaged threshold of C1 was 6.4 dB HL, of C2=4.7 dB HL and of C3=3.0 dB HL. The ethnical comparison shows the same tendencies, although the improvement of the hearing threshold with regard to the Chinese children was smaller. The development of the hearing acuity seems not to be finished at the age of 16 years.

One result is the fact that the hearing ability of children at high frequencies is better than at low frequencies. The audiograms of the children are tilted distinctly in relation to the adult reference zero line in ISO 389-7. Dimensions like the ear canal volume are also responsible for this finding since smaller volumes are inducing higher resonance frequencies. The averaged value of the ear canal volume of the younger German age group D1 was 1.05 ml and 1.18 ml at age group D2. For the Chinese children, age group C1 had an averaged value of 0,78 ml, at C2=0.92 ml and C3=0.97 ml. Compared to the Germans, these values are about 25 % lower.

Besides the higher resonance frequency of the ear canal, the smaller volume of the mastoid cell system is responsible for this noticeable frequency response of children at the hearing threshold.

The hearing ability of school children shows a remarkable age-dependent development at all test frequencies. This can be explained by the maturation of the primary auditory pathway as well as of the central (cortical) processing.

In order to evaluate children's audiograms, developmental changes should be considered by using age-related normal threshold values to avoid incorrect conclusions in the case of diminished test results. When a 20 dB hearing loss criterion is applied to the present data set of 250 German pupils, an age correction shows diagnostic relevance by an only slightly decreasing sensitivity of 3.8 % but a relevant increasing specificity of 12.7 % up to more than 85 %.

Literaturverzeichnis

- Ari-Even Roth, D.; Kishon-Rabin, L. und Hildesheimer, M. (2002): Auditory backward masking in normal hearing children. In: *Journal of basic and clinical physiology and pharmacology*, Band 13(2): S. 105–115. ISSN 0792-6855.
- Axelsson, A.; Aniansson, G. und Costa, O. (1987): Hearing loss in school children. A longitudinal study of sensorineural hearing impairment. In: *Scandinavian audiology*, Band 16(3): S. 137–143. ISSN 0105-0397.
- Axelsson, A; Dengerink, H; Hellström, P A und Mossberg, A M (1993): The sound world of the child. The relationship between daily activities and hearing acuity. In: *Scandinavian audiology*, Band 22(2): S. 117–124. ISSN 0105-0397.
- Böhme, G. und Welzl-Müller, K. (1998): *Audiometrie: Hörprüfungen im Erwachsenen- und Kindesalter; ein Lehrbuch*. Vierte Auflage. Verlag Hans Huber, Bern, Göttingen, Toronto u. Seattle. ISBN 3-456-82972-8.
- Boothroyd, A. (1997): Auditory development of the hearing child. In: *Scandinavian audiology. Supplementum*, Band 26(Suppl. 46): S. 9–16. ISSN 0107-8593.
- Brooks, D. N. (1969): The use of the electro-acoustic impedance bridge in the assessment of middle ear function. In: *International Journal of Audiology*, Band 8(4): S. 563–569. ISSN 1499-2027.
- Burén, M.; Solem, B. S. und Laukli, E. (1992): Threshold of hearing (0.125–20 kHz) in children and youngsters. In: *British journal of audiology*, Band 26(1): S. 23–31. ISSN 0300-5364.
- Buss, E.; Hall, J. W. und Grose, J. H. (2006): Development and the role of internal noise in detection and discrimination thresholds with narrow band stimuli. In:

- The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 120(5 Pt 1): S. 2777–2788. ISSN 0001-4966.
- Buss, E.; Hall, J. W. und Grose, J. H. (2009): Psychometric functions for pure tone intensity discrimination: slope differences in school-aged children and adults. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 125(2): S. 1050–1058. ISSN 0001-4966.
- Buss, E.; Hall, J. W.; Grose, J. H. und Dev, M. B. (2001): A comparison of threshold estimation methods in children 6-11 years of age. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 109(2): S. 727–731. ISSN 0001-4966.
- Dai, H. P.; Scharf, B. und Buus, S. (1991): Effective attenuation of signals in noise under focused attention. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 89(6): S. 2837–2842. ISSN 0001-4966.
- de Jonge, R. (1986): Normal tympanometric gradient: a comparison of three methods. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 25(4-5): S. 299–308. ISSN 0020-6091.
- Djupesland, G.; Nicklasson, B.; Helland, S. und Hemsén, E. (1982): Hearing threshold level and middle ear pressure in children with phonetic/phonemic disability. In: *Scandinavian audiology. Supplementum*, Band 17: S. 73–79. ISSN 0107-8593.
- Eagles, E. L.; Wishik, S. M.; Doerfler, L. G.; Melnick, W. und S., Levine H. (1963): *Hearing sensitivity and related factors in children*. Univ. of Pittsburgh, Graduate School of Public Health, Pittsburgh.
- Eby, T. L. und Nadol, J. B. (1986): Postnatal growth of the human temporal bone. Implications for cochlear implants in children. In: *The Annals of otology, rhinology, and laryngology*, Band 95(4 Pt 1): S. 356–364. ISSN 0003-4894.
- Eggermont, J. J. (1988): On the rate of maturation of sensory evoked potentials. In: *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, Band 70(4): S. 293–305. ISSN 0013-4694.
- Eiber, A. (1999): Mechanical modeling and dynamical behavior of the human middle ear. In: *Audiology & neuro-otology*, Band 4(3-4): S. 170–177. ISSN 1420-3030.

- Eiber, A. (2008): Mechanical problems in human hearing. In: *Studies in health technology and informatics*, Band 133: S. 83–94. ISSN 0926-9630.
- Eiber, A.; Freitag, H. G.; Burkhardt, C.; Hemmert, W.; Maassen, M.; Rodriguez Jorge, J. und Zenner, H. P. (1999): Dynamics of middle ear prostheses - simulations and measurements. In: *Audiology & neuro-otology*, Band 4(3-4): S. 178–184. ISSN 1420-3030.
- Eiber, A.; Haag, F. und Lauxmann, M. (2008): Einfluss des Mastoids auf die Übertragungseigenschaften des Mittelohrs. In: *Institut für Technische und Numerische Mechanik, Universität Stuttgart*, Band IB-44: S. 1–18.
- Elliott, L. L. und Katz, D. R. (1980): Children's pure-tone detection. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 67(1): S. 343–344. ISSN 0001-4966.
- Fleischer, G. (1978): *Evolutionary principles of the mammalian middle ear*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 3-540-09140-8.
- Fleischer, G.; Hoffmann, E.; Lang, R. und Müller, R. (1999): Dokumentation der Auswirkungen von Kinderknallpistolen. In: *HNO*, Band 47(6): S. 535–540. ISSN 0017-6192.
- Fleischer, G.; Hoffmann, E.; Müller, R. und Lang, R. (1998): Kinderknallpistolen und ihre Wirkung auf das Gehör. In: *HNO*, Band 46(9): S. 815–820. ISSN 0017-6192.
- Fleischer, G. und Müller, R. (2007): Auditory group curves – a powerful tool for analysis and prevention. In: *Proceedings Noise at work 2007; First European forum on effective solutions for managing occupational noise (Lille, France)*.
- Gerhardt, K. J.; Rodriguez, G. P.; Hepler, E. L. und Moul, M. L. (1987): Ear canal volume and variability in the patterns of temporary threshold shifts. In: *Ear and hearing*, Band 8(6): S. 316–321. ISSN 0196-0202.
- Glorig, A.; Quiggle, R.; Wheeler, D. E. und Grings, W. (1956): Determination of the normal hearing reference zero. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 28(6): S. 1110–1113. ISSN 0001-4966.
- Haapaniemi, J. J. (1996a): The hearing threshold levels of children at school age. In: *Ear and hearing*, Band 17(6): S. 469–477. ISSN 0196-0202.

- Haapaniemi, J. J. (1996b): Immittance findings in school-aged children. In: *Ear and hearing*, Band 17(1): S. 19–27. ISSN 0196-0202.
- Hanks, W. D. und Rose, K. J. (1993): Middle ear resonance and acoustic immittance measures in children. In: *Journal of speech and hearing research*, Band 36(1): S. 218–222. ISSN 0022-4685.
- Harrison, R. V. (2001): Age-related tonotopic map plasticity in the central auditory pathways. In: *Scandinavian audiology. Supplementum*, Band 30(53): S. 8–14. ISSN 0107-8593.
- Hartley, D. E. H.; Wright, B. A.; Hogan, S. C. und Moore, D. R. (2000): Age-related improvements in auditory backward and simultaneous masking in 6- to 10-year-old children. In: *J Speech Lang Hear Res*, Band 43(6): S. 1402–1415. ISSN 1092-4388.
- Hayes, D. und Northern, J. L. (1996): *Infants and hearing*. Singular Publ. Group, San Diego , London. ISBN 1-56593-191-2.
- Hoffmann, E. und Ulrich, J. (2006): *Das Ohr: Anatomie Physiologie und Pathologie*. Erste Auflage. DOZ-Verlag, Heidelberg. ISBN 3-922269-74-5.
- Höhmann, D. (1997): *Praxis der Neuroaudiologie: Akustisch evozierte Potentiale, otoakustische Emissionen, intraoperatives Monitoring*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. ISBN 3-13-101811-9.
- Holmes, A. E.; Niskar, A. S.; Kieszak, S. M.; Rubin, C. und Brody, D. J. (2004): Mean and median hearing thresholds among children 6 to 19 years of age: the Third National Health And Nutrition Examination Survey, 1988 to 1994, United States. In: *Ear and hearing*, Band 25(4): S. 397–402. ISSN 0196-0202.
- Jerger, J.; Chmiel, R.; Allen, J. und Wilson, A. (1994): Effects of age and gender on dichotic sentence identification. In: *Ear and hearing*, Band 15(4): S. 274–286. ISSN 0196-0202.
- Keefe, D. H.; Bulen, J. C.; Arehart, K. H. und Burns, E. M. (1993): Ear-canal impedance and reflection coefficient in human infants and adults. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 94(5): S. 2617–2638. ISSN 0001-4966.

- Keefe, D. H.; Bulen, J. C.; Campbell, S. L. und Burns, E. M. (1994): Pressure transfer function and absorption cross section from the diffuse field to the human infant ear canal. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 95(1): S. 355–371. ISSN 0001-4966.
- Keefe, D. H. und Levi, E. (1996): Maturation of the middle and external ears: acoustic power-based responses and reflectance tympanometry. In: *Ear and hearing*, Band 17(5): S. 361–373. ISSN 0196-0202.
- Kennedy, H. (1957): Maturation of hearing acuity. In: *The Laryngoscope*, Band 67(8): S. 756–762. ISSN 0023-852X.
- Kiessling, J. (2000): Audiology on the way into the next millennium. In: *Folia phoniatica et logopaedica : official organ of the International Association of Logopedics and Phoniatics (IALP)*, Band 52(1-3): S. 83–92. ISSN 1021-7762.
- Lavigne-Rebillard, M. und Pujol, R. (1990): Auditory hair cells in human fetuses: synaptogenesis and ciliogenesis. In: *Journal of electron microscopy technique*, Band 15(2): S. 115–122. ISSN 0741-0581.
- Lee, D. H.; Jun, B. C.; Kim, D. G.; Jung, M. K. und Yeo, S. W. (2005): Volume variation of mastoid pneumatization in different age groups: a study by three-dimensional reconstruction based on computed tomography images. In: *Surgical and radiologic anatomy : SRA*, Band 27(1): S. 37–42. ISSN 0930-1038.
- Lehnhardt, E. (1996): *Praxis der Audiometrie*. 7. Auflage. Thieme, Stuttgart, New York. ISBN 3-13-369007-8.
- Li, X.; Bu, X. und Driscoll, C. (2006): Tympanometric norms for chinese school-children. In: *International journal of audiology*, Band 45(1): S. 55–59. ISSN 1499-2027.
- Lins, O. G.; Picton, T. W.; Boucher, B. L.; Durieux-Smith, A.; Champagne, S. C.; Moran, L. M.; Perez-Abalo, M. C.; Martin, V. und Savio, G. (1996): Frequency-specific audiometry using steady-state responses. In: *Ear and hearing*, Band 17(2): S. 81–96. ISSN 0196-0202.

- Liu, T. C. und Chen, Y. S. (2000): Aging and external ear resonance. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 39(5): S. 235–237. ISSN 0020-6091.
- Lutman, M. E.; Davis, A. C.; Fortnum, H. M. und Wood, S. (1997): Field sensitivity of targeted neonatal hearing screening by transient-evoked otoacoustic emissions. In: *Ear and hearing*, Band 18(4): S. 265–276. ISSN 0196-0202.
- Lynch, T. J.; Nedzelnitsky, V. und Peake, W. T. (1982): Input impedance of the cochlea in cat. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 72(1): S. 108–130. ISSN 0001-4966.
- Margolis, R. H. und Heller, J. W. (1987): Screening tympanometry: criteria for medical referral. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 26(4): S. 197–208. ISSN 0020-6091.
- McGill, R.; Tukey J. W. und Larsen W. A. (1978): Variations of box plots. In: *The American Statistician*, Band 32(1): S. 12–16.
- Moore, Jean K. (2002): Maturation of human auditory cortex: implications for speech perception. In: *The Annals of otology, rhinology & laryngology. Supplement*, Band 189: S. 7–10. ISSN 0096-8056.
- Mrowinski, Dieter (Hg.) (2006): *Audiometrie: Eine Anleitung für die praktische Hörprüfung*. Dritte Auflage. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. ISBN 978-3-13-118003-2.
- Mühler, R. (2004): Auditory Steady-State Response: An der Schwelle zur klinischen Nutzung? In: *HNO*, Band 52(9): S. 779–782. ISSN 0017-6192.
- Mühler, R. und Rahne, T. (2009): Hörschwellenbestimmungen mittels Auditory Steady-State Responses: Einfluss von EEG-Amplitude und Messzeit auf die Qualität. In: *HNO*, Band 57(1): S. 44–50. ISSN 0017-6192.
- Murphy, K. P. (1969): The psychophysiological maturation of auditory function. In: *International Audiology*, Band 8(1): S. 46–51. ISSN 0538-4915.
- Niskar, A. S.; Kieszak, S. M.; Holmes, A. E.; Esteban, E.; Rubin, C. und Brody, D. J. (2001): Estimated prevalence of noise-induced hearing threshold shifts

- among children 6 to 19 years of age: the Third National Health and Nutrition Examination Survey, 1988-1994, United States. In: *Pediatrics*, Band 108(1): S. 40–43. ISSN 1098-4275.
- Nozza, R. J.; Bluestone, C. D.; Kardatzke, D. und Bachman, R. (1992): Towards the validation of aural acoustic immittance measures for diagnosis of middle ear effusion in children. In: *Ear and hearing*, Band 13(6): S. 442–453. ISSN 0196-0202.
- Nozza, R. J.; Bluestone, C. D.; Kardatzke, D. und Bachman, R. (1994): Identification of middle ear effusion by aural acoustic admittance and otoscopy. In: *Ear and hearing*, Band 15(4): S. 310–323. ISSN 0196-0202.
- Osterhammel, D. (1978): High-frequency thresholds using a quasi-free-field technique. In: *Scandinavian audiology*, Band 7(1): S. 27–30. ISSN 0105-0397.
- Paradise, J. L.; Smith, C. G. und Bluestone, C. D. (1976): Tympanometric detection of middle ear effusion in infants and young children. In: *Pediatrics*, Band 58(2): S. 198–210. ISSN 1098-4275.
- Perez-Abalo, M. C.; Savio, G.; Torres, A.; Martín, V.; Rodríguez, E. und Galán, L. (2001): Steady state responses to multiple amplitude-modulated tones: an optimized method to test frequency-specific thresholds in hearing-impaired children and normal-hearing subjects. In: *Ear and hearing*, Band 22(3): S. 200–211. ISSN 0196-0202.
- Pirilä, T.; Jounio-Ervasti, K. und Sorri, M. (1992): Left-right asymmetries in hearing threshold levels in three age groups of a random population. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 31(3): S. 150–161. ISSN 0020-6091.
- Ponton, C. W.; Don, M.; Eggermont, J. J.; Waring, M. D. und Masuda, A. (1996a): Maturation of human cortical auditory function: differences between normal-hearing children and children with cochlear implants. In: *Ear and hearing*, Band 17(5): S. 430–437. ISSN 0196-0202.
- Ponton, C. W.; Moore, J. K. und Eggermont, J. J. (1996b): Auditory brain stem response generation by parallel pathways: differential maturation of axonal con-

- duction time and synaptic transmission. In: *Ear and hearing*, Band 17(5): S. 402–410. ISSN 0196-0202.
- Price, G. R. und Kalb, J. T. (1991): Insights into hazard from intense impulses from a mathematical model of the ear. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 90(1): S. 219–227. ISSN 0001-4966.
- Ptok, M.; Blachnik, P. und Schönweiler, R. (2004): Altersabhängigkeit später auditorischer Potenziale (NC-ERP) bei Kindern. In: *HNO*, Band 52(3): S. 270–274. ISSN 0017-6192.
- Quaranta, A.; Salonna, I. und Bellomo, F. (1992): Psychoacoustical performance in children. In: *Scandinavian audiology*, Band 21(4): S. 265–267. ISSN 0105-0397.
- Reuter, W.; Schönfeld, U.; Fischer, R. und Gross, M. (1997): Höruntersuchungen im erweiterten Hochtonbereich bei Kindern im Vorschulalter. Erste Ergebnisse. In: *HNO*, Band 45(3): S. 147–152. ISSN 0017-6192.
- Reuter, W.; Schönfeld, U.; Mansmann, U.; Fischer, R. und Gross, M. (1998): Extended high frequency audiometry in pre-school children. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 37(5): S. 285–294. ISSN 0020-6091.
- Richardson, K.; Peckham, C. S. und Goldstein, H. (1976): Hearing levels of children tested at 7 and 11 years: A national study. In: *British Journal of Audiology*, Band 10(4): S. 117–121. ISSN 0300-5364.
- Roberts, J. (1972): Hearing levels of children by demographiac and socioeconomic characteristics: United states. In: *Vital and health statistics. Series 11, Data from the national health survey*, Band 11(111): S. 1–47. ISSN 0083-1980.
- Robinson, D. W. (1991): Relation between hearing threshold level and its component parts. In: *British journal of audiology*, Band 25(2): S. 93–103. ISSN 0300-5364.
- Roche, A. F.; Mukherjee, D.; Chumlea, W. C. und Champney, T. F. (1983): Examination effects in audiometric testing of children. In: *Scandinavian audiology*, Band 12(4): S. 251–256. ISSN 0105-0397.

- Roche, A. F.; Siervogel, R. M.; Himes, J. H. und Johnson, D. L. (1978): Longitudinal study of hearing in children: baseline data concerning auditory thresholds, noise exposure, and biological factors. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 64(6): S. 1593–1616. ISSN 0001-4966.
- Roeser, R. J.; Valente, M. und Hosford-Dunn, H. (2007): *Audiology - Diagnosis*. Zweite Auflage. Georg Thieme Verlag, New York, Stuttgart. ISBN 978-3-13-116432-2.
- Rosen, S.; Bergmann, M.; Plester, D.; El-Mofty, A. und Satti, M. H. (1962): Presbycusis study of a relatively noise-free population in the sudan. In: *The Annals of otology, rhinology, and laryngology*, Band 71: S. 727–743. ISSN 0003-4894.
- Rosen, S.; Plester, D.; El-Mofty, A. und Rosen, H. V. (1964): High frequency audiometry in presbycusis. In: *Archives of otolaryngology*, Band 79(1): S. 18–32. ISSN 0003-9977.
- Roup, C. M.; Wiley, T. L.; Safady, S. H. und Stoppenbach, D. T. (1998): Tympanometric screening norms for adults. In: *American journal of audiology*, Band 7(2): S. 55–60. ISSN 1059-0889.
- Schechter, M. A.; Fausti, S. A.; Rappaport, B. Z. und Frey, R. H. (1986): Age categorization of high-frequency auditory threshold data. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 79(3): S. 767–771. ISSN 0001-4966.
- Schmuziger, N.; Probst, R. und Smurzynski, J. (2004): Test-retest reliability of pure-tone thresholds from 0.5 to 16 kHz using Sennheiser HDA 200 and Etymotic Research ER-2 earphones. In: *Ear and hearing*, Band 25(2): S. 127–132. ISSN 0196-0202.
- Schneider, B. A.; Trehub, S. E.; Morrongiello, B. A. und Thorpe, L. A. (1986): Auditory sensitivity in preschool children. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 79(2): S. 447–452. ISSN 0001-4966.
- Shahnaz, N. und Davies, D. (2006): Standard and multifrequency tympanometric norms for caucasian and chinese young adults. In: *Ear and hearing*, Band 27(1): S. 75–90. ISSN 0196-0202.

- Shanks, J. E. (1984): Tympanometry. In: *Ear and hearing*, Band 5(5): S. 268–280. ISSN 0196-0202.
- Shanks, J. E. und Lilly, D. J. (1981): An evaluation of tympanometric estimates of ear canal volume. In: *Journal of speech and hearing research*, Band 24(4): S. 557–566. ISSN 0022-4685.
- Sharma, A.; Gilley, P. M.; Dorman, M. F. und Baldwin, R. (2007): Deprivation-induced cortical reorganization in children with cochlear implants. In: *International Journal of Audiology*, Band 46(9): S. 494–499. ISSN 1499-2027.
- Sharma, A.; Kraus, N.; McGee, T. J. und Nicol, T. G. (1997): Developmental changes in P1 and N1 central auditory responses elicited by consonant-vowel syllables. In: *Electroencephalography and clinical neurophysiology*, Band 104(6): S. 540–545. ISSN 0013-4694.
- Siegenthaler, B. M. (1969): Maturation of auditory abilities in children. In: *International Audiology*, Band 8(1): S. 59–71. ISSN 0538-4915.
- Silman, S.; Silverman, C. A. und Arick, D. S. (1992): Acoustic-immittance screening for detection of middle-ear effusion in children. In: *Journal of the American Academy of Audiology*, Band 3(4): S. 262–268. ISSN 1050-0545.
- Sininger, Y. S. und Abdala, C. (1996): Hearing threshold as measured by auditory brain stem response in human neonates. In: *Ear and hearing*, Band 17(5): S. 395–401. ISSN 0196-0202.
- Stollman, M. H.; van Velzen, E. C.; Simkens, H. M.; Snik, A. F. und van den Broek, P. (2004): Development of auditory processing in 6-12-year-old children: a longitudinal study. In: *International journal of audiology*, Band 43(1): S. 34–44. ISSN 1499-2027.
- Stuart, A. (2005): Development of auditory temporal resolution in school-age children revealed by word recognition in continuous and interrupted noise. In: *Ear and hearing*, Band 26(1): S. 78–88. ISSN 0196-0202.
- Sussman, E.; Steinschneider, M.; Gumenyuk, V.; Grushko, J. und Lawson, K. (2008): The maturation of human evoked brain potentials to sounds presented at dif-

- ferent stimulus rates. In: *Hearing research*, Band 236(1-2): S. 61–79. ISSN 0378-5955.
- Takeshita, K.; Nagamine, T.; Thuy, D. H. D.; Satow, T.; Matsushashi, M.; Yamamoto, J.; Takayama, M.; Fujiwara, N. und Shibasaki, H. (2002): Maturation of parallel auditory processing in school-aged children revealed by simultaneous recording of magnetic and electric cortical responses. In: *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, Band 113(9): S. 1470–1484. ISSN 1388-2457.
- Tonnquist-Uhlen, I.; Ponton, C. W.; Eggermont, J. J.; Kwong, B. und Don, M. (2003): Maturation of human central auditory system activity: the T-complex. In: *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, Band 114(4): S. 685–701. ISSN 1388-2457.
- Trehub, S. E.; Schneider, B. A.; Morrongiello, B. A. und Thorpe, L. A. (1988): Auditory sensitivity in school-age children. In: *J exp Child Psychol (Journal of experimental child psychology)*, Band 46(2): S. 273–285.
- Trehub, S. E.; Schneider, B. A.; Morrongiello, B. A. und Thorpe, L. A. (1989): Developmental changes in high-frequency sensitivity. In: *Audiology : official organ of the International Society of Audiology*, Band 28(5): S. 241–249. ISSN 0020-6091.
- Ulrich, J. und Hoffmann, E. (2007): *Hörakustik: Theorie und Praxis*. Erste Auflage. DOZ-Verlag, Heidelberg. ISBN 3-922269-80-X.
- Čeponienė, R.; Rinne, T. und Näätänen, R. (2002): Maturation of cortical sound processing as indexed by event-related potentials. In: *Clinical neurophysiology : official journal of the International Federation of Clinical Neurophysiology*, Band 113(6): S. 870–882. ISSN 1388-2457.
- Voss, S. E. und Herrmann, B. S. (2005): How does the sound pressure generated by circumaural, supra-aural, and insert earphones differ for adult and infant ears? In: *Ear and hearing*, Band 26(6): S. 636–650. ISSN 0196-0202.
- Wan, I. K. K. und Wong, L. L. N. (2002): Tympanometric norms for chinese young adults. In: *Ear and hearing*, Band 23(5): S. 416–421. ISSN 0196-0202.

- Werner, L. A. (1996): The development of auditory behavior (or what the anatomists and physiologists have to explain). In: *Ear and hearing*, Band 17(5): S. 438–446. ISSN 0196-0202.
- Wunderlich, J. L. und Cone-Wesson, B. K. (2006): Maturation of CAEP in infants and children: a review. In: *Hearing research*, Band 212(1-2): S. 212–223. ISSN 0378-5955.
- Yoneshige, Y. und Elliott, L. L. (1981): Pure-tone sensitivity and ear canal pressure at threshold in children and adults. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 70(5): S. 1272–1276. ISSN 0001-4966.
- Zenner, H.-P. (1994): *Hören: Physiologie Biochemie Zell- und Neurobiologie*. Georg Thieme Verlag, Stuttgart, New York. ISBN 3-13-139001-8.
- Zollner, M. und Zwicker, E. (1993): *Elektroakustik*. Dritte Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. ISBN 3-540-56600-7.
- Zwislocki, J. J. (1962): Analysis of the middle-ear function. Part I: Input impedance. In: *The Journal of the Acoustical Society of America*, Band 34(9b): S. 1514–1523. ISSN 0001-4966.

Normen, Richtlinien und Verordnungen

- ISO 389-1 (2000): Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment - Part 1: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and supra-aural earphones. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.
- ISO 389-5 (1999): Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 5: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones in the frequency range 8 kHz to 16 kHz. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.
- ISO 389-7 (2005): Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 7: Reference threshold of hearing under free-field and diffuse-field listening conditions. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.
- ISO 389-8 (2004): Acoustics – Reference zero for the calibration of audiometric equipment – Part 8: Reference equivalent threshold sound pressure levels for pure tones and circumaural earphones. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.
- ISO 1999 (1990): Acoustics – Determination of occupational noise exposure and estimation of noise-induced hearing impairment, 2nd Edition. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.
- ISO 7029 (1984): Acoustics – Threshold of hearing by air conduction as a function of age and sex for otologically normal persons. *International Organisation for Standardization*, Geneva: ISO.

RICHTLINIE 2003/10/EG (6. Februar 2003) über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (Lärm). *DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT UND DER RAT DER EUROPÄISCHEN UNION*, Brüssel.

Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007 (BGBl. I S. 261).

Diplomarbeiten

Bell, J. (2004): Entwicklung einer adaptierbaren Software zur Datenerhebung in der Hörforschung. *Diplomarbeit an der Fachhochschule Giessen Friedberg, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik*

Fidorra, U. (2001): Die akustischen Gegebenheiten in Kindergärten und Grundschulen in Abhängigkeit von Umgebung und Tätigkeiten. *Diplomarbeit an der Justus-Liebig-Universität Giessen, Fachbereich Biologie*

Kudra, P. (2006): Standardisierung von Audiometrien zum Zwecke der Qualitätssicherung. *Diplomarbeit an der Fachhochschule Giessen Friedberg, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik*

Raiber, J. (2005): Erweiterung der Software Otogramm unter den Aspekten der Auswertung und Automatisierung von Höruntersuchungen. *Diplomarbeit an der Fachhochschule Giessen Friedberg, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften und Informatik*

Anhang A

Danksagung

Mein Dank gilt an erster Stelle Herrn Prof. Dr. Gerald Fleischer für die langjährige wissenschaftliche Förderung zum Verständnis der Komplexität und der Leistungsfähigkeit des menschlichen Gehörs, aber auch der Gefahren, die dieses bedrohen. Die vielen fruchtbaren Diskussionen führten schließlich zur Anfertigung der vorliegenden Dissertation.

Herrn Prof. Dr. Joachim Schneider, als dem komm. Leiter des Instituts und der Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin, möchte ich besonders für die intensive Betreuung und Förderung meiner Arbeit in der Zeit danken, in der Prof. Fleischer bereits im Ruhestand war. Seine Anregungen haben die Arbeit auch inhaltlich wesentlich vorangebracht.

Viele Personen waren bei den Datenerhebungen in China und Deutschland beteiligt. Sie haben dadurch erst die Voraussetzungen für diese wissenschaftliche Arbeit geschaffen.

Für die Zusammenarbeit in China danke ich besonders Herrn Prof. Dr. Xia Gao, Chefarzt des Department of ENT der Universität Nanjing, und seinen Mitarbeitern. Als deutschen Begleitern in China danke ich dem Mediziner Thomas Bache und dem technischen Mitarbeiter Mathias Wilhelm von der Firma Maico. Beim Audiometrieren und der Kalibrierung der Audiometer sorgte letzterer mit seinem typischen Berliner Humor für das Zustandekommen korrekter Messergebnisse.

Mein Dank gilt auch dem ehemaligen Schulleiter der Ludwig-Uhland-Schule, Herrn Helmut Werner und seiner Sekretärin Frau Ursula Lotz, die unser Vorhaben mit großem Interesse begleitet haben. Ebenso danke ich auch dem jetzigen Schul-

leiter Herrn Dr. Jan-Hendrik Schneider, der die 2. Phase der Longitudinal-Studie unterstützte.

Herrn Dr. Albrecht Eiber und seinen Mitarbeitern, Herrn Dipl.-Ing. Michael Lauxmann und Herrn cand. mach. F. Haag vom Institut für Technische und Numerische Mechanik der Universität Stuttgart, möchte ich danken, dass sie den Einfluss des Mastoidvolumens auf die Übertragungseigenschaften des Mittelohres am Modell berechnet haben.

Ebenso danke ich allen Kollegen und Mitarbeitern des Instituts und der Poliklinik für Arbeits- und Sozialmedizin für das stets offene Ohr und die Anregungen, die sie mir gaben.

Bei Herrn Wolfgang Pabst vom Institut für Medizinische Informatik bedanke ich mich für die Unterstützung bei den statistischen Auswertungen.

Für das Engagement und den Fleiß bei den Studien in Deutschland bedanke ich mich bei den ehemaligen Studenten und heutigen Medizinern: Ute Vogelsang, Dr. med. Christian Tanislav, Christian Skari, Robert Lange, Inka Burkhardt, Enrico Koch, Anika Walter, Florian Ohliger und Xenia Zöllner.

Für ihre einfühlsame Art bei der Befragung, die in den Kindern Zutrauen weckte, danke ich besonders Frau Hannelore Fleischer und Frau Ursula Haibel-Schwarz.

Mein großer Dank gilt auch meiner ganzen Familie für die Geduld und Unterstützung während der Anfertigung dieser Arbeit.

Anhang B

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre: Ich habe die vorgelegte Dissertation selbständig, ohne unerlaubte fremde Hilfe und nur mit den Hilfen angefertigt, die ich in der Dissertation angegeben habe. Alle Textstellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Schriften entnommen sind, und alle Angaben, die auf mündlichen Auskünften beruhen, sind als solche kenntlich gemacht. Bei den von mir durchgeführten und in der Dissertation erwähnten Untersuchungen habe ich die Grundsätze guter wissenschaftlicher Praxis, wie sie in der „Satzung der Justus-Liebig-Universität Gießen zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“ niedergelegt sind, eingehalten.

Gießen, den 20. Jan. 2011