

Mario Fresner

**Untersuchung von Messmethoden zur Bestimmung
eines einzelnen Lautheitswertes anhand realer
Audiodaten**

Diplomarbeit

durchgeführt am

Institut für Elektronische Musik und Akustik
der Universität für Musik und darstellende Kunst in Graz

in Zusammenarbeit mit dem

Mercedes-Benz Technologie Center in Sindelfingen
Abteilung
Entwicklung PKW Audio-/Video-/Navigations-Systeme

Betreuer: O.Univ-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich
Beurteiler : O.Univ-Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. Robert Höldrich

St. Michael, Oktober 2004

Zusammenfassung

Die Aufgabe dieser Diplomarbeit bestand darin, verschiedene Audioquellen, die Sprache oder Musik beinhalten können, bezüglich ihrer Lautheit zu vergleichen und selbst bei stark instationären Schallen einen repräsentativen Einzahl-Wert für die empfundene Lautheit abzuleiten. Durch eine Analyse der vorhandenen wissenschaftlichen Literatur wurde herausgefunden, welche Methoden zur Lautheitsberechnung vorliegen und inwieweit diese Eingang in Normen und Standards gefunden haben. Die Vorhersagen dieser Methoden wurden für reale Audioquellen (z.B. Radio, CD, etc.) mit den Ergebnissen eines psychoakustischen Hörversuchs, der im Innenraum eines Kraftfahrzeugs durchgeführt wurde, verglichen. Die besten Übereinstimmungen wurden mit dem Verfahren von Zwicker bei einer Auswertung des 95-ten Perzentilwertes erreicht. Sprachsignale werden von den Auswertungsverfahren im Vergleich zum psychoakustischen Hörversuch um durchschnittlich 15% zu niedrig bewertet.

Abstract

The aim of this thesis was to compare the loudness of different audio sources that contain language or music and to derive separately, with strongly intermittent sounds, a representative singular value for the loudness felt. The methods of loudness calculation in current scientific literature were investigated, taking into account the extent to which they have been used in norms and standards. The predicted results for real audio sources (e.g., radio, CD, etc.) were compared with the results of psychoacoustic hearing tests, which were accomplished in the interior of an automobile. The best agreements were obtained with Zwicker's method, using the 95-percentile value. In comparison with the psychoacoustic tests, the loudness calculation results of speech were on average 15% too low.

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung und Aufgabenstellung</i>	1
1.1	Einleitung	1
1.2	Aufgabenstellung	1
2	<i>Aufbau und Funktion des Gehörs</i>	2
2.1	Außenohr	2
2.2	Mittelohr	3
2.3	Innenohr	4
2.3.1	Aufbau	5
2.3.2	Funktionsweise	7
3	<i>Psychoakustische Begriffe</i>	9
3.1	Lautheit	9
3.1.1	Lautheit bei instationären Schallen	10
3.2	Kurven gleicher Lautstärkepegel (Phon Kurven)	10
3.3	Schallbewertungen	14
3.3.1	dB(A) Bewertung	15
3.3.2	dB(B) Bewertung	16
3.3.3	dB(C) Bewertung	16
3.3.4	dB(D) Bewertung	17
3.4	Frequenzgruppen	17
3.5	Kritische Bandbreite (CB)	19
3.6	Maskierung	20
3.7	Ruhehörschwelle	20
3.8	Hörfläche	20
3.9	Mithörschwelle	21
3.10	Binaurale Lautheit	21
3.11	Notched-Noise Methode	21
4	<i>Auswertungsverfahren</i>	23
4.1	MARK VI Loudnesslevel nach Stevens	23
4.2	Modifikation des MARK VI durch Robinson	27
4.3	Verfahren nach Zwicker	27
4.3.1	Grundlagen des Verfahrens	27
4.3.2	Graphische Auswertung des Verfahrens DIN 45631	28
4.3.3	Rechnerische Auswertung des Verfahrens	29
4.4	Eine Überarbeitung des Lautheits-Modells von Zwicker durch Glasberg und Moore	30
4.4.1	Einzelheiten des Modells	30
4.4.2	Aussagen des Modells	33
4.4.3	Weitere Verbesserungen dieses Modells durch Glasberg, Moore und Baer 1997	34
4.5	Andere Auswertungsverfahren	35
4.5.1	Perceived Noise Level nach Kryter	35
4.5.2	Verfahren nach Aures	35
4.5.3	Schallbewertung nach ISO 1996	35
5	<i>Messsignale</i>	37
5.1	Stationäre Messsignale	37

5.2	Instationäre Messsignale	37
6	Messungen	39
6.1	Binaurale Messung	41
6.1.1	Messequipment	41
6.2	Monaurale Messung	42
6.2.1	Messequipment	42
6.3	Messergebnisse der objektiven Messungen	43
7	Psychoakustischer Hörversuch	47
7.1	Grundlagen	47
7.2	Durchführung des Hörversuches	47
7.2.1	Einführung des Probanden in den Hörversuch.....	47
7.2.2	Ablauf des Hörversuches.....	48
7.2.3	Sitzpositionen.....	48
7.2.4	Vergleichspaare.....	49
7.3	Teilnehmerstatistik	50
7.4	Ergebnis des Hörversuchs	51
7.4.1	Besetzung von einer Sitzposition	52
7.4.2	Besetzung von vier Sitzposition	53
8	Vergleich der objektiven und subjektiven Ergebnisse	55
8.1	Nur der Fahrersitz besetzt	55
	• Vergleichspaar 1: Rosa Rauschen-Beethoven Symphonie Nr. 9 Presto.....	55
	• Vergleichspaar 2: Have you ever been in love – Neckermann.....	56
	• Vergleichspaar 3: Fahrzeuginnenraumgeräusch 60 km/h – My way.....	56
	• Vergleichspaar 4: Trompetenkonzert Nr. 1 Allegro von Molter – gezupfte Gitarre	56
	• Vergleichspaar 5: Rosa Rauschen – aus Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky	57
	• Vergleichspaar 6: Rosa Rauschen – Whenever Wherever	57
	• Vergleichspaar 7: Rosa Rauschen – Frauenstimme.....	57
	• Vergleichspaar 8: Rosa Rauschen – Every breath you take	59
	• Vergleichspaar 9: Rosa Rauschen – Per me per sempre.....	59
	• Vergleichspaar 10: Rosa Rauschen – Krainerhaus	60
	• Vergleichspaar 11: Rosa Rauschen – Vollastbeschleunigung aus dem 3. Gang	62
	• Vergleichspaar 12: Rosa Rauschen – Fahrzeuginnenraumgeräusch 120 km/h	63
	• Vergleichspaar 13: Rosa Rauschen – 3 Oktavbandrauschen.....	64
	• Vergleichspaar 14: Per me per sempre – Frauenstimme	65
	• Vergleichspaar 15: Krainerhaus – Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky	66
	• Vergleichspaar 16: Vollastbeschleunigung aus dem 3. Gang – Every breath you take	66
	• Vergleichspaar 17: Fahrzeuginnenraumgeräusch 120 km/h – Whenever Wherever.....	66
	• Vergleichspaar 18: 3 Oktavbandrauschen – Every breath you take	67
8.2	Alle vier Sitzpositionen besetzt	67
8.3	Andere Sitzpositionen	68
8.3.1	Beifahrersitz	68
8.3.2	Sitzposition hinten links	68
8.3.3	Sitzposition hinten rechts	68
8.4	Zusammenfassen der Ergebnisse	68
9	Diskussion	71
9.1	Erkenntnisse	71
9.2	Ausblick	72
9.3	Schlussfolgerungen	72
10	Literatur	74

11	Anhang	76
11.1	Fragebögen	76
11.2	Tabellen Hörversuch	78
11.3	Vergleichstabellen zwischen objektiven und subjektiven Ergebnissen	79

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anatomie des Gehörs [1]	2
Abb. 2: Gehörgang [2]	3
Abb. 3: Frequenzgang des Mittelohres [2]	4
Abb. 4: Aufbau des Innenohres [1]	5
Abb. 5: Scala vestibuli, Scala media, Scala tympani [3]	6
Abb. 6: Basilarmembran [2]	6
Abb. 7: Auslenkung der Basilarmembran bei unterschiedlichen Frequenzen [2]	7
Abb. 8: Cortisches Organ und Umgebung [2]	8
Abb. 9: Zur Verdopplung bzw. Halbierung der Lautheit notwendige Pegelerhöhung bzw. Pegelerniedrigung ΔL eines 1 kHz Tones in Abhängigkeit von seinem Pegel. [4]	9
Abb. 10: Kurven gleicher Lautstärke [23]	11
Abb. 11: Kurven gleicher Lautstärkepegel verschiedener Versuchsreihen [23]	12
Abb. 12: Parameter zur Berechnung der Normalkurven gleicher Lautstärkepegel [23]	13
Abb. 13: A-Bewertungskurve [12]	15
Abb. 14: gleiche dB(A) Bewertung von 2 unterschiedlichen Geräuschen [4]	16
Abb. 15: Die Bewertungskurve A, B, C, D [19]	17
Abb. 16: Breite der Frequenzgruppen als Funktion der Frequenz [4]	18
Abb. 17: Die Zahl $n_{\Delta f_G}$ der bis zur Frequenz f aneinander reihbaren Frequenzgruppen ergibt den Zusammenhang zwischen der Tonheit z und der Frequenz. [4]	18
Abb. 18: Zusammenhang zwischen der Tonheit z und Frequenz f , sowie zwischen Frequenzgruppenbreite Δf_G und der Mittenfrequenz f_m . Die zu den Mittenfrequenzen f_m gehörenden Tonheitswerte z sind ebenfalls angegeben. Die zu den Frequenzgruppenbreiten gehörenden Grenzfrequenzen f_u und f_o einander anschließender Frequenzgruppen entsprechen den in Spalte 2 angegebenen Werten [4]	19
Abb. 19: Zentralwert der Ruhehörschwelle LT von Versuchspersonen unter 25 Jahren [4]	20
Abb. 20: Hörfläche [4]	21
Abb. 21: Nomogramm der Lautheitsindizes [24]	24
Abb. 22: Lautheitsindex bei 1000 Hz [24]	25
Abb. 23: Beispiel einer graphischen Auswertung [8]	28
Abb. 24: Vergleich zwischen ISO 226 (Einzelpunkte) und dem Modell von Glasberg-Moore (Linien) [6]	33
Abb. 25: Noise Rating Curves [13]	36
Abb. 26: Messobjekt Mercedes E-Klasse T Modell	39
Abb. 27: Messkette	40
Abb. 28: Lautsprecher-Anordnung im Fahrzeug	41
Abb. 29: Messaufbau Kunstkopfmessung	42
Abb. 30: Messmikrofonaufbau	43
Abb. 31: Terzpegelspektrum von Kunstkopf und Messmikrofon bei Rosa Rauschen am Fahrersitz ...	44
Abb. 32: Differenz zwischen Kunstkopf und Messmikrofon bei Rosa Rauschen am Fahrersitz	44
Abb. 33: Spezifische Lautheit eines Kunstkopfmesssystems (links) und eines Messmikrofons (rechts) bei Rosa Rauschen	45
Abb. 34: Differenz zwischen vollbesetztem und mit einer Person besetztem Fahrzeug	45
Abb. 35: Ergebnis der Altersverteilung der Probanden	50
Abb. 36: Auswertung ob es den Probanden leicht gefallen ist den Hörversuch zu bewältigen	51
Abb. 37: Darstellung der Ergebnisse des Hörversuchs bei einer besetzten Sitzposition	53
Abb. 38: Darstellung der Ergebnisse des Hörversuchs bei vollbesetztem Fahrzeug	54
Abb. 39: Rechtssteile Verteilung der Hörversuchsergebnisse des Paarvergleiches 7	58
Abb. 40: Lautheit über die Zeit von der Frauenstimme	58
Abb. 41: Spezifische Lautheit über die Zeit der Frauenstimme	59
Abb. 42: Verteilung der Bewertung der Probanden des Paarvergleiches 9	60
Abb. 43: Lautheit über die Zeit von Krainerhaus	61
Abb. 44: Spezifische Lautheit über die Zeit von dem Werbespot Krainerhaus	61
Abb. 45: Lautheit über die Zeit von Vollastbeschleunigung	62
Abb. 46: Spezifische Lautheit über die Zeit bei einer Vollastbeschleunigung	63
Abb. 47: Terzpegelspektrum eines Fahrzeuginnenraumgeräusches bei 120 km/h	64
Abb. 48: Verteilung der Bewertung der Probanden des Paarvergleiches 13	65
Abb. 49: Spezifische Lautheit über die Zeit des Musiktitels "Per me per sempre"	65
Abb. 50: Spezifische Lautheit über die Zeit des Musiktitels "Whenever Wherever"	67

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schallpegeldifferenz zwischen freiem und diffusen Schallfeld bei gleicher Lautstärke [21]	14
Tabelle 2: Frequenzabhängige Änderung der Lauthheitsindizes [11].....	23
Tabelle 3: Umwandlungstabelle von phon in sone [11].....	26
Tabelle 4: Werte des Parameters k bei ausgewählten Mittenfrequenzen [6].....	32
Tabelle 5: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 1.....	55
Tabelle 6: Ergebnis des psychoakustischen Hörversuches Fahrersitz für eine Sitzposition	78
Tabelle 7: Ergebnis des psychoakustischen Hörversuches Fahrersitz für vollbesetztes Fahrzeug	78
Tabelle 8: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 2.....	79
Tabelle 9: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 3.....	79
Tabelle 10: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 4	79
Tabelle 11: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 5	80
Tabelle 12: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 6	80
Tabelle 13: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 7	80
Tabelle 14: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 8	80
Tabelle 15: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 9	81
Tabelle 16: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 10	81
Tabelle 17: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 11	81
Tabelle 18: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 12	81
Tabelle 19: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 13	82
Tabelle 20: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 14	82
Tabelle 21: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 15	82
Tabelle 22: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 16	82
Tabelle 23: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 17	83
Tabelle 24: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 18	83

1 Einleitung und Aufgabenstellung

1.1 Einleitung

Da die Fahrzeuginnenraumgeräusche immer leiser werden, wird in Zukunft das Audiosystem im Fahrzeug immer wichtiger. Die Audiodaten im Fahrzeug werden immer subjektiv beurteilt. Diese menschliche Schallbeurteilung nachzubilden gestaltet sich äußerst schwierig. Einer der Gesichtspunkte, wie verschiedene Schallsignale auf den Sitzpositionen miteinander verglichen werden können, ist die Lautheit. Die Auswertungsverfahren für die Lautheit berücksichtigen im Wesentlichen die Empfindungen des menschlichen Gehörs.

Die Problematik besteht darin, dass die meisten Signale, die im Fahrzeug vorkommen, instationärer Natur sind. Bisher gibt es noch nicht viele Erkenntnisse, welches Auswertungsverfahren für die Lautheit von zeitvarianten Schallsignalen einen repräsentativen Wert zurückgibt.

1.2 Aufgabenstellung

Oftmals sollen verschiedene Audioquellen, die Sprache oder Musik beinhalten können, bezüglich Ihrer Lautheit verglichen werden. Das Maß der Lautheit hängt von verschiedenen Faktoren wie: Frequenzen, die zeitliche Dauer der Messung, sowie hörpsychologische Faktoren ab.

Die Problematik besteht darin, aus der Reihe von Einzellautheitswerten bei zeitvarianten Signalen wie Sprache oder Musik einen einzigen repräsentativen Wert abzuleiten. Dieser ermittelte Wert soll das menschliche Lautheitsempfinden im betrachteten Zeitraum möglichst genau widerspiegeln.

Es soll durch eine ausführliche Literaturrecherche herausgefunden werden, welche Methoden zur Lautheitsberechnung in der wissenschaftlichen Literatur vorliegen und wie weit diese Eingang in Normen und Standards gefunden haben. Die Vorhersagen dieser Methoden sollen für reale Audioquellen (z.B. Radio, CD, etc.) mit den Ergebnissen eines psychoakustischen Hörversuchs, der im Innenraum eines Kraftfahrzeuges durchgeführt wird, verglichen werden. Ziel ist es, selbst bei stark instationären Schallen einen repräsentativen Einzahl-Wert für die empfundene Lautheit abzuleiten.

2 Aufbau und Funktion des Gehörs

Im folgenden Kapitel werden der Aufbau und die Funktionsweise des peripheren Gehörs, welches sich aus dem Außenohr, Mittelohr und Innenohr zusammensetzt, kurz beschrieben. Da es sich hauptsächlich um eine Zusammenfassung vorhandener Literatur handelt, wird auf eine Kennzeichnung von Zitaten verzichtet.

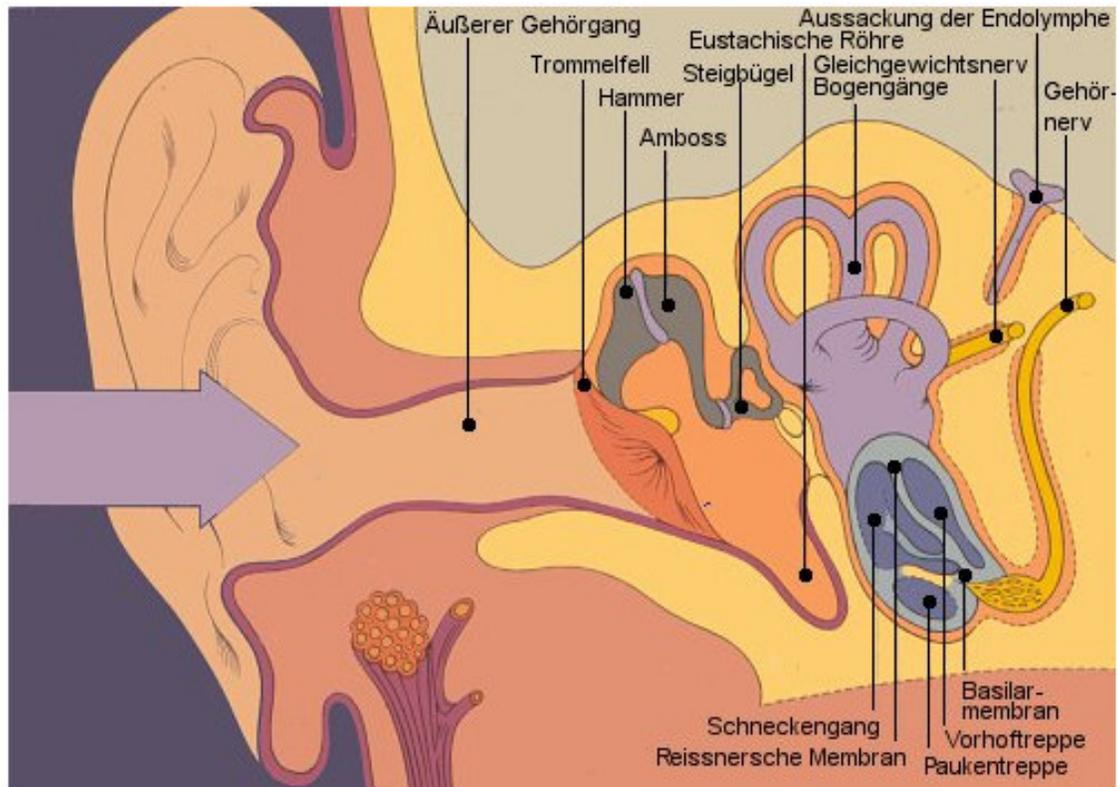


Abb. 1: Anatomie des Gehörs [1]

2.1 Außenohr

Das Außenohr besteht aus der Ohrmuschel, welche auch 'pinna' genannt wird und dem Gehörgang. Die Ohrmuschel und der Gehörgang bilden zusammen einen Schalltrichter. Der Schall, welcher aus verschiedenen Richtungen kommt, wird von der Ohrmuschel aufgefangen. Danach gelangt der Schall über den Gehörgang zum Trommelfell. Eine weitere Aufgabe des Gehörgangs ist, dass er das Trommelfell vor Verletzungen schützt. Der Gehörgang verkürzt weiters auch den Abstand zwischen Innenohr und Gehirn damit eine schnelle und effektive Informationsübertragung gesichert ist. Das ist mit ein Grund warum das Innenohr klein gehalten werden kann. Zusätzlich wirkt der Gehörgang wie ein $\lambda/4$ Resonator. Die Resonanzen liegen bei $\lambda/4$, $3\lambda/4$, $5\lambda/4$ etc. .

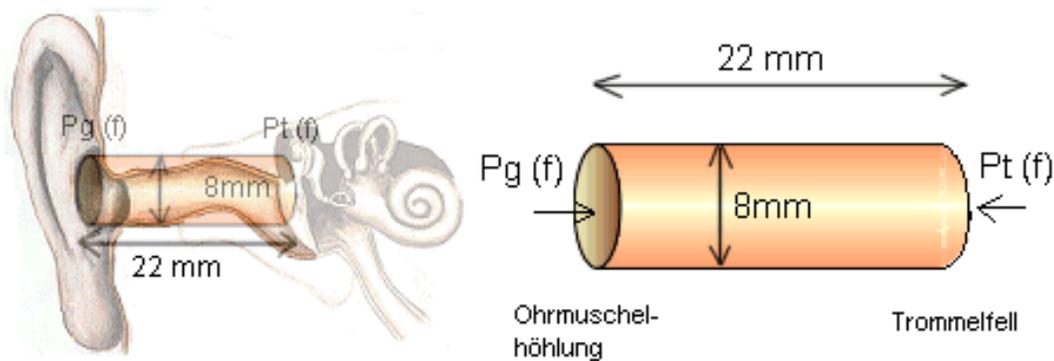


Abb. 2: Gehörgang [2]

$$\frac{\lambda}{4} = 0.022 \cdot m \quad (1)$$

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{340}{4 \cdot 0.022} = 3.863 \cdot kHz \quad (2)$$

Dadurch, dass der Gehörgang im Durchschnitt ca. 22 mm lang ist ergibt sich daraus bei einer Schallgeschwindigkeit c von 340 m pro Sekunde, die erste Resonanz bei 3.86 kHz und die dritte Resonanz bei 11.6 kHz. Die Bestätigung findet sich in den Kurven gleicher Lautstärke wieder, welche eine erhöhte Empfindlichkeit bei 3.5 kHz und 12 kHz zeigen. Der Gehörgang wird durch das Trommelfell abgeschlossen. Das Trommelfell ist auf der Seite zum Außenohr hin mit Haut und auf der Seite zum Mittelohr mit Schleimhaut überzogen. Die Spannung des Trommelfells kann durch Muskeln verändert werden. Je mehr Spannung durch diese Muskeln erzeugt wird, desto mehr Schallanteile werden am Trommelfell reflektiert und nicht über das Mittelohr zum Innenohr weitergeleitet. Ein Schallereignis, welches jedoch impulsartig auftritt, wird leider durch diesen Mechanismus nicht begrenzt. Die Folge daraus ist, dass bleibende Hörschäden im Innenohr auftreten können.

2.2 Mittelohr

Das Bindeglied zwischen Außenohr und Innenohr ist das Mittelohr. Es besteht aus den Gehörknöchelchen Hammer, Amboss und Steigbügel wie in Abbildung 1 schön zu sehen ist. Hammer und Amboss führen die Bewegung eines Winkelhebels und der Steigbügel eine Kippbewegung durch. Die luftgefüllten Paukenhöhle ist über die Eustachische Röhre mit dem

Rachenraum verbunden. Die Aufgabe des Mittelohres ist es, den Luftschall, welcher über das Außenohr aufgenommen wird, in Flüssigkeitsschall zu transformieren. Diese Impedanzanpassung zwischen den Schallwellenimpedanzen von Luft im Gehörgang und der Lymphflüssigkeit im Innenohr wird durch die Gehörknöchelchen (Hebelübersetzung) und der Flächentransformation (Trommelfell – ovales Fenster) realisiert. Durch die Flächentransformation können Schalldrücke um das 22-fache verstärkt werden. Im Frequenzbereich um 1 kHz ist das Trommelfell genau an die Schallwellenimpedanz der Luft angepasst. Das Mittelohr wirkt als Tiefpassfilter, da ab einer Frequenz von 2 kHz die Massen der Gehörknöchelchen, sowie die Elastizitäten und Schwingungseigenschaften des Trommelfells eine Rolle spielen.

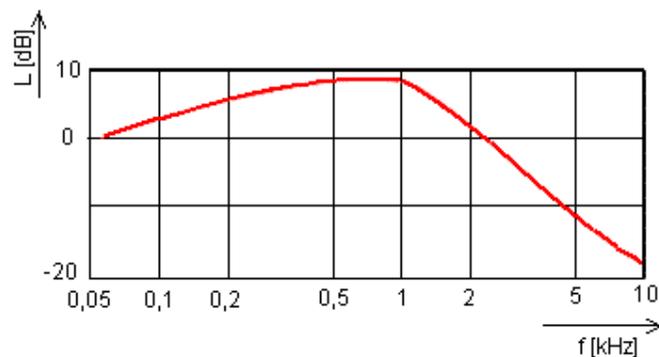


Abb. 3: Frequenzgang des Mittelohres [2]

Dies wirkt sich in einer Verschlechterung der Übertragungsfähigkeit aus. Beim Schlucken öffnet sich die Eustachische Röhre für einen kurzen Augenblick. Dies hat einen Druckausgleich zwischen dem Mittelohr und dem Gehörgang zur Folge.

2.3 Innenohr

Das Innenohr ist in das Felsenbein eingebettet und besteht aus zwei Teilen, dem Gleichgewichtsorgan und dem schneckenförmigen Gang, welcher auch Cochlea genannt wird.

2.3.1 Aufbau

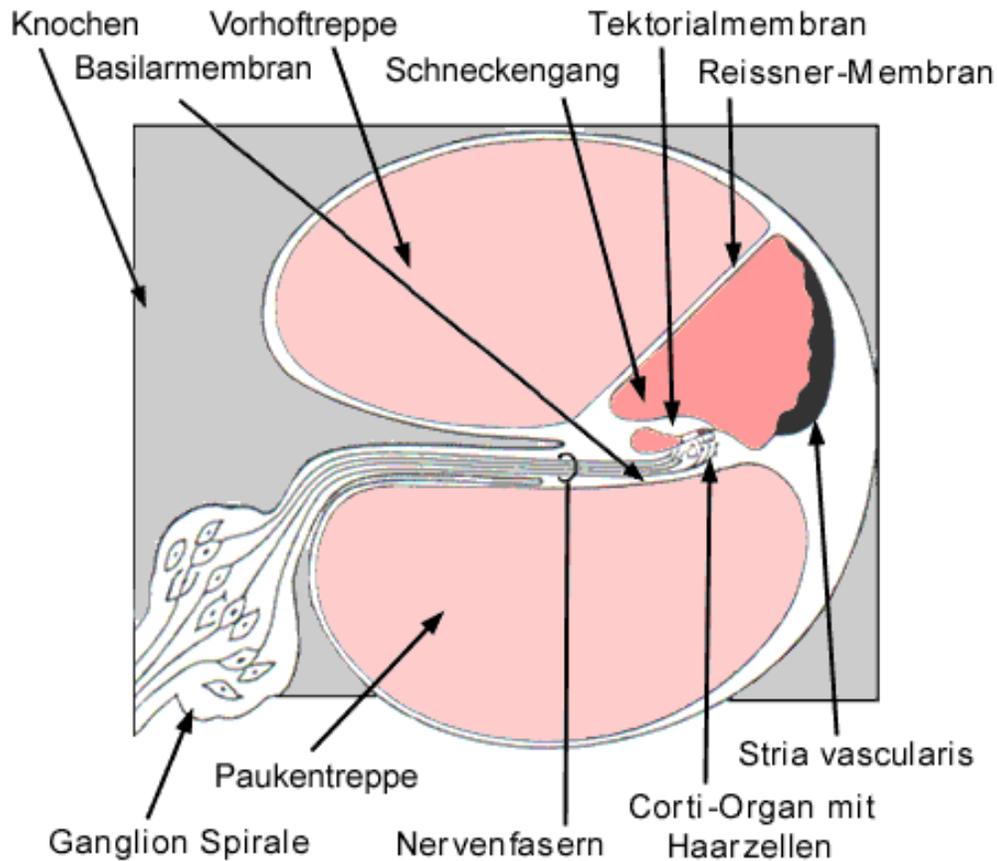


Abb. 4: Aufbau des Innenohres [1]

Das Gleichgewichtsorgan besteht aus drei senkrecht zueinander stehenden Bogengängen und ist mit einer inkompressiblen Lympflüssigkeit gefüllt.

Die Cochlea besteht aus $2\frac{1}{2}$ Windungen und setzt sich aus 3 Kanälen zusammen, welche parallel angeordnet sind. Diese Kanäle sind die Scala vestibuli (Vorhoftrappe), Scala media (Schneckengang), Scala tympani (Paukentreppe). Die Scala vestibuli und Scala tympani enthalten Perilympflüssigkeiten. Die Scala media ist mit Endolymphflüssigkeit gefüllt.

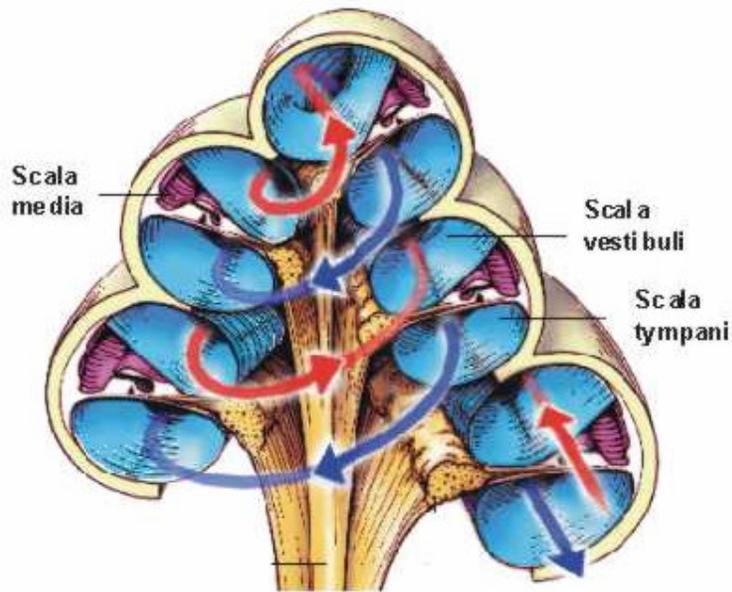


Abb. 5: Scala vestibuli, Scala media, Scala tympani [3]

Die Scala vestibuli ist von der Scala media durch das so genannte Reissner Membran getrennt. Die Basilmembran grenzt an die Scala tympani. Das Helicotrema ist die Verbindung an der Schneckenspitze zwischen der Scala tympani und der Scala vestibuli. Das Cortische Organ liegt auf der Basilmembran.

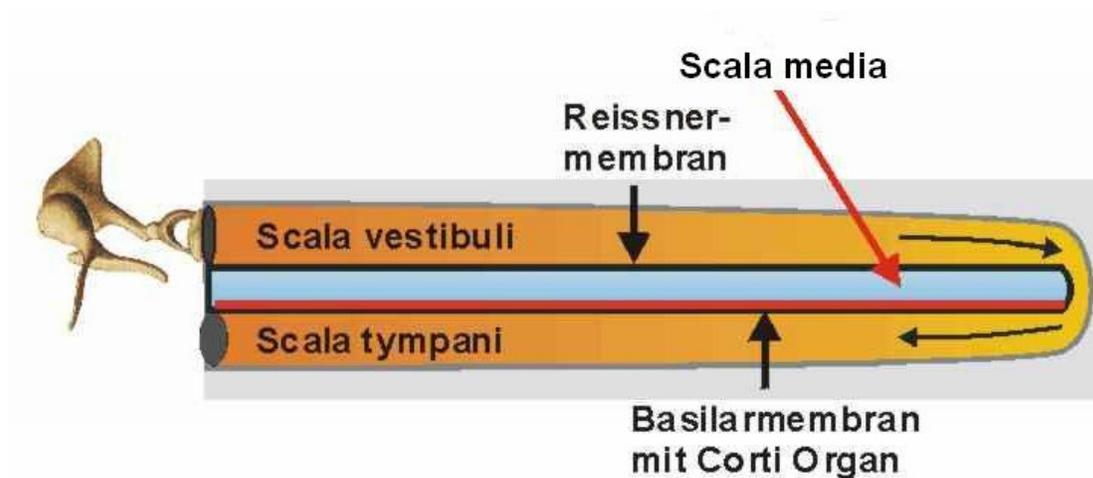


Abb. 6: Basilmembran [2]

Die Sinneszellen setzen sich aus inneren und äußeren Haarzellen zusammen und befinden sich im Cortischen Organ. Es gibt drei bis fünf Reihen äußere Haarzellen und eine Reihe innere Haarzellen. Die Anzahl der inneren Haarzellen beträgt ca. 3500 und die Anzahl der

äußeren Haarzellen beträgt ca. 12000. Der Hörnerv besteht aus ca. 30000 afferenten Fasern und 2000 efferenten Fasern. Die efferenten Fasern sind jene, die vom Gehirn weglaufen und die afferenten Fasern leiten zum Gehirn hin. Die Tektorialmembran deckt sich über das Cortische Organ. An der Außenseite der Scala media befindet sich die Stria vascularis. Sie ist für die Energieversorgung der Cochlea und die Zusammensetzung der Endolymphe wichtig.

2.3.2 Funktionsweise

Die Funktion des Innenohres ist von der Funktionsweise des Mittelohres im Wesentlichen unabhängig. Durch den Steigbügel im Mittelohr wird das ovale Fenster in Schwingung versetzt. Das wiederum führt zu einer Verschiebung des Volumens der inkompressiblen Flüssigkeit (Perilymphe) und hat eine Auslenkung des runden Fensters zur Folge. Dadurch bilden sich Wanderwellen auf der Basilarmembran aus. Je höher die anregende Frequenz ist, desto näher liegt die maximale Auslenkung in Richtung ovalem Fenster. Tiefe Frequenzen erzeugen Wanderwellen die weiter in die Cochlea vordringen als hohe Frequenzen, wie in Abbildung 7 dargestellt.

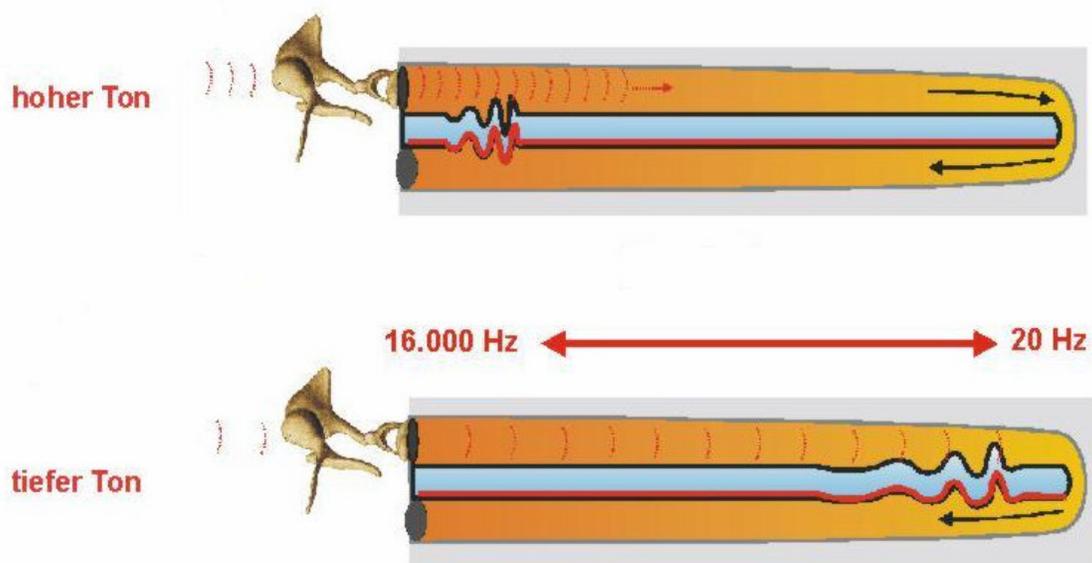


Abb. 7: Auslenkung der Basilarmembran bei unterschiedlichen Frequenzen [2]

In der Basilarmembran sind als Auslenkungssensoren die inneren und äußeren Haarzellen angelegt. Bei Auslenkung der Basilarmembran durch eine Wanderwelle werden die ausgelösten Aktionspotentiale über die zugehörigen Nervenfasern an das Gehirn weitergeleitet. Die Information über die Lautstärke ist vor allem in der Zahl der

Nervenimpulse verschlüsselt enthalten. Die Haarzellen sind auch im Kontakt mit der Tektorialmembran, die wie ein Deckel auf den Haarzellen sitzt.

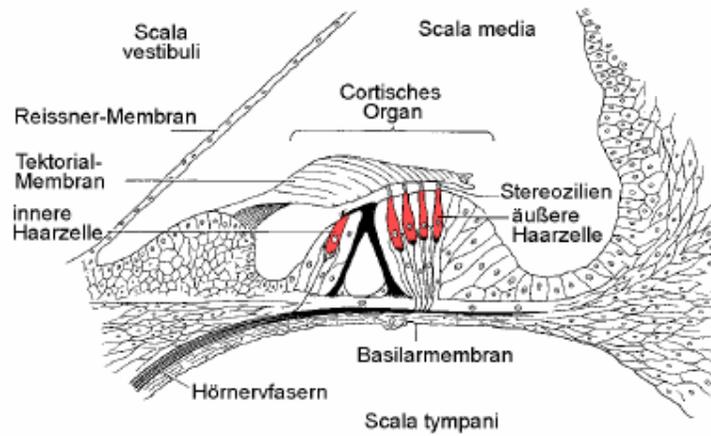


Abb. 8: Cortisches Organ und Umgebung [2]

Die hohe Empfindlichkeit des Gehörs ist nur durch einen aktiven Prozess (Dämpfung bzw. Verstärkung) zu erklären, der im Bereich Haarzelle-Tektorialmembran zu suchen sein dürfte.

3 Psychoakustische Begriffe

In diesem Kapitel werden einige psychoakustische Begriffe erklärt, auf die in den nächsten Kapiteln zurückgegriffen wird.

3.1 Lautheit

Die Lautheit ist ein Maß für die Empfindung der Lautstärke. Die Einheit der Lautheit N ist das sone. Einem Sinussignal mit einer Frequenz von 1 kHz und 40 dB absoluten Schalldruckpegel wird eine Lautheit von $N=1$ sone zugeordnet. Für Schallpegel, die über 40 dB liegen, bewirkt ein Pegelanstieg von 10 dB die Empfindung von doppelter Lautheit und bedeutet einen Anstieg der Schallleistung um das 10-fache. Die Lautheit ist wesentlich von der Bandbreite des Schallsignals abhängig. Bei gleichem Schallpegel von breitbandigem Rauschen und eines 1 kHz Tones wird das breitbandige Schallsignal erheblich lauter wahrgenommen.

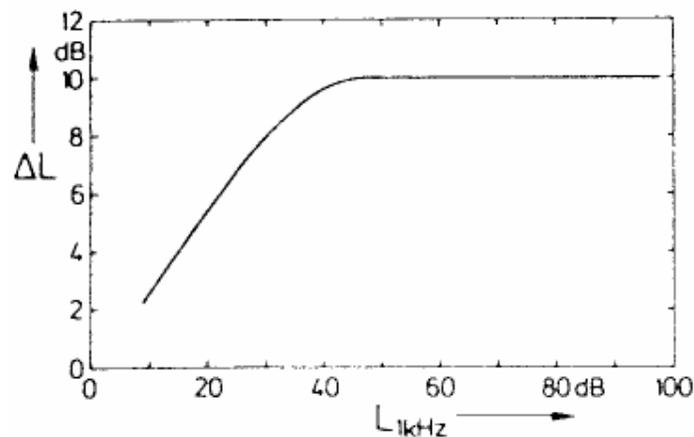


Abb. 9: Zur Verdopplung bzw. Halbierung der Lautheit notwendige Pegelerhöhung bzw. Pegelerniedrigung ΔL eines 1 kHz Tones in Abhängigkeit von seinem Pegel. [4]

Die Lautheitsskala wurde durch psychoakustische Messungen bestimmt. Bei den Messungen wurde den Probanden jeweils die Frage gestellt, um wie viel man ein Schallsignal verändern muss, damit ein bestimmtes Verhältnis, wie zum Beispiel doppelte Lautheit, erreicht wird. Dadurch, dass die Lautheit näher an das Empfinden des menschlichen Gehörs herankommt als die Lautstärke, ist es natürlich sinnvoller diesen Parameter zu verwenden.

Es ist bekannt, dass bei sich ändernder Bandbreite eines Geräusches und konstanter Intensität die Lautheit konstant bleibt, solange die Bandbreite kleiner als ein bestimmter Wert ist, welcher die kritische Bandbreite genannt wird.

Die Gesamtlautheit entsteht aus dem Integral der spezifischen Lautheit über die Tonheit. Diese Verteilung ist zwar mit der spektralen Verteilung des Schalles verknüpft, zu ihrer Entwicklung muss jedoch die Frequenzselektivität des Gehörs mitberücksichtigt werden. [4]

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N' dz \quad (3)$$

N' ist die spezifische Lautheit. Die Einheit der spezifischen Lautstärke ist sone/Bark

3.1.1 Lautheit bei instationären Schallen

Die Frage nach welchem Kriterium die Lautheit von Sprache, im Vergleich zur Lautheit eines stationären Geräusches, wie Rosa Rauschen oder ein Fahrzeuginnenraumgeräusch, beurteilt wird, kann nur von Versuchspersonen beantwortet werden. Messungen mit Rauschen, das die gleiche spektrale Verteilung besitzt wie langzeitgemittelte Sprache, ergaben, dass die Lautheitsspitzen der Sprache für die Empfindung maßgebend sind. [1]

3.2 Kurven gleicher Lautstärkepegel (Phon Kurven)

In den 20er und 30er Jahren wurden die Kurven gleicher Lautstärke entwickelt. Maßgebend daran beteiligt war eine deutsche Gruppe um Heinrich Barkhausen und einer amerikanischen Gruppe um Fletcher und Munson. Die ersten Kurven gleicher Lautstärke wurden 1933 veröffentlicht. Der Datensatz, welcher in der ISO 226 genormt wurde, stammt von Robinson und Dadson aus dem Jahr 1956.

Die Kurven gleicher Lautstärke wurden folgendermaßen ermittelt. Den Versuchspersonen wurde ein Standardreiz bei 1000 Hz geboten. Anschließend hörten die Versuchspersonen einen Vergleichsreiz, bei dem sie den Pegel so einzustellen hatten, dass dieser gleich laut empfunden wurde als der Standardreiz. Dieser Versuch wurde über den gesamten Hörbereich durchgeführt. Weiters wurde bei einer Amplitude von 0 dB begonnen und in Schritten von 10 dB bis 120 dB erhöht. Aktuelle Versuche, die diesen Versuch wiederholen, weisen große Streuungen auf, wobei die Ruhehörschwelle bei fast allen Versuchen, außer bei Fletcher Munson, das gleiche Ergebnis liefert. Die Kurven gleicher Lautstärke hängen von der Schallart (reiner Ton, Rauschen über eine gewisse Bandbreite), von der Übertragung des

Schalls (freies Feld, diffuses Feld oder Kopfhörer) und natürlich auch vom Alter der Versuchspersonen ab. Die Hörschwelle entspricht einem Lautstärkepegel von 4 phon. Die Kurven gleicher Lautstärke beziehen sich auf normalhörende Personen im Alter zwischen 18 und 25 Jahren.

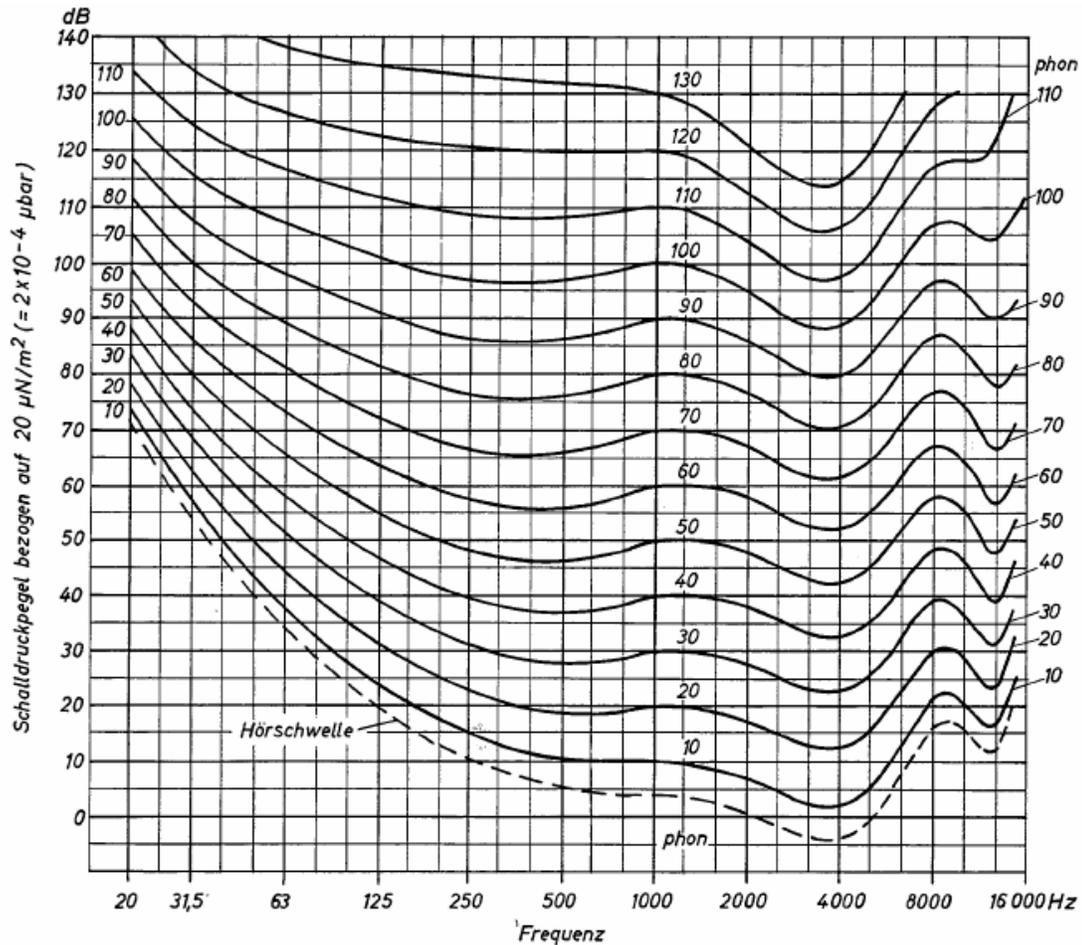


Abb. 10: Kurven gleicher Lautstärke [23]

Wie man in Abbildung 11 sieht, sind die Unterschiede der verschiedenen Versuchsreihen speziell im Bereich bis 1 kHz sehr groß. Gerade der Bereich unter 1 kHz ist in Bezug auf die Lautheit einer der wichtigsten Bereiche. Genau in diesem Frequenzbereich gibt es die meisten Informationen (Leistung). Es wurde auch noch zu späteren Zeitpunkten Untersuchungen durchgeführt wie z.B. Suzuki (1996), Lydolf und Möller (1997), Bellman (1999), Takeshima (1997, 2001) [ISO 226].

- ▽ Kirk(1983)PF △ Möller(1984)PF ● Betke(1989) ○ Suzuki(1989)
 ■ Fastl(1990) ● Watanabe(1990) ▲ Poulsen(1994) ◇ Suzuki(1996)
 ▼ Lydolf(1997) ◀ Lydolf(1997)PF □ Takeshima(1997) ▷ Bellmann(1999)
 △ Bellmann(1999)PF ⊗ Takeshima(2001) + Robinson-Dadson (1956)HT × Brinkmann(1973)HT
 * Vorländer(1991)HT * Poulsen(2000)HT (1956)HT
- PF: Gemessen im Druckfeld HT: Nur Hörschwelle

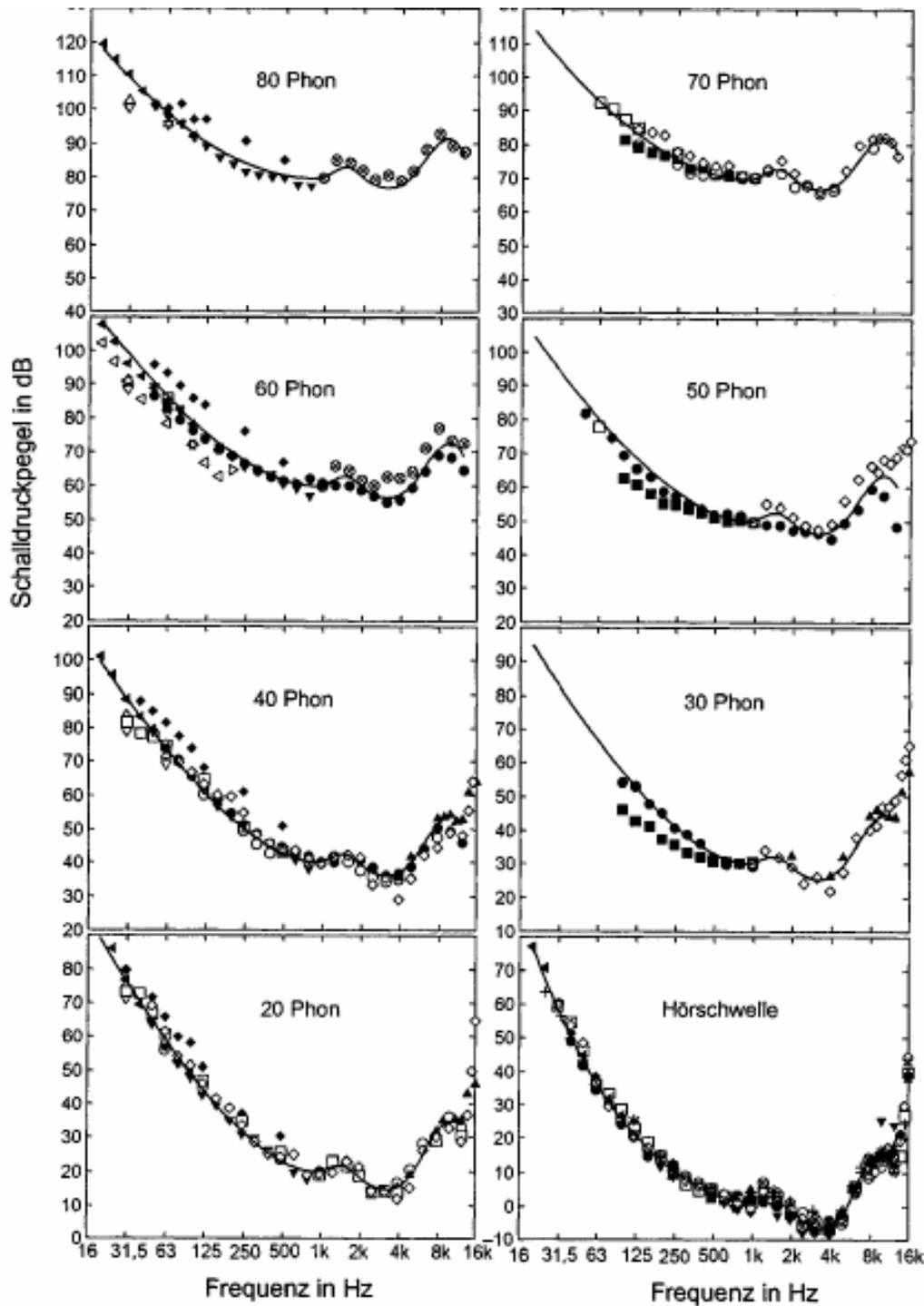


Abb. 11: Kurven gleicher Lautstärkepegel verschiedener Versuchsreihen [23]

Für die rechnerische Ermittlung der Kurven gleicher Lautstärke wird die folgende Funktionsgleichung verwendet.

$$Lu = 20 \cdot \lg(U_f) \quad [23] \quad (4)$$

$$B_f = \left[0,4 \cdot 10^{\frac{Lp+Lu-9}{10}} \right] - \left[0,4 \cdot 10^{\frac{Tf+Lu-9}{10}} \right] + 0,005076 \quad [23] \quad (5)$$

$$L_N = (40 \cdot \lg B_f) Phon + 94 Phon \quad [23] \quad (6)$$

Variablenerklärung:

- LN..... Lautstärkepegel eines reinen Tones in Phon
- LP..... Schalldruckpegel in dB
- Tf Hörschwelle des Sinus
- af frequenzabhängiger Exponent für reine Töne
- Uf auf 1000 Hz normierte Größe der Übertragungsfunktion

Frequenz f Hz	α_f	L_U dB	T_f dB
20	0,556	-30,4	76,6
25	0,525	-26,5	67,3
31,5	0,495	-22,7	58,4
40	0,465	-19,2	50,2
50	0,439	-16,1	43,2
63	0,414	-13,3	36,7
80	0,389	-10,6	30,7
100	0,368	-8,4	25,7
125	0,349	-6,4	21,3
160	0,329	-4,5	17,0
200	0,313	-3,1	13,6
250	0,299	-1,9	10,7
315	0,286	-0,9	8,0
400	0,275	-0,2	5,7
500	0,266	0,3	3,9
630	0,258	0,5	2,5
800	0,253	0,5	1,9
1.000	0,250	0,0	2,2
1.250	0,247	-2,2	3,2
1.600	0,246	-3,0	1,8
2.000	0,246	-0,2	-1,2
2.500	0,246	2,2	-4,3
3.150	0,246	3,1	-6,3
4.000	0,246	2,0	-6,0
5.000	0,246	-1,0	-2,5
6.300	0,248	-5,9	5,4
8.000	0,256	-10,1	13,4
10.000	0,270	-10,2	15,0
12.500	0,295	-3,7	15,6

Abb. 12: Parameter zur Berechnung der Normalkurven gleicher Lautstärkepegel [23]

Der Schallpegel im freien Schallfeld und im diffusen Schallfeld ist nicht gleich groß. Der Grund ist darin zu suchen, dass im ebenen freien Schallfeld die Einfallsrichtung des Schalls von vorne kommt. Beim diffusen Schallfeld trifft der Schall aus allen Richtungen ein.

Frequenz Hz	Differenz ΔL_p dB	Frequenz Hz	Differenz ΔL_p dB
50	0	800	2,8
63	0	1000	3,0
80	0	1250	2,0
100	0	1600	0,0
125	0	2000	-1,4
160	0	2500	-2,0
200	0,3	3150	-1,9
250	0,6	4000	-1,0
315	0,9	5000	0,5
400	1,2	6300	3,0
500	1,6	8000	4,0
630	2,3	10000	4,3

Tabelle 1: Schallpegeldifferenz zwischen freiem und diffusen Schallfeld bei gleicher Lautstärke [21]

$$\Delta L_p = L_{pf} - L_{pd} \quad (7)$$

Die obige Tabelle gibt an um wie viel sich bei gleichem Lautstärkepegel der Schalldruckpegel im freien Schallfeld (L_{pf}) vom Schalldruckpegel im diffusen Schallfeld (L_{pd}) unterscheidet. [21]

3.3 Schallbewertungen

Die A-, B-, und C-Bewertung nach DIN IEC 651 unterscheiden sich vor allem durch ihr Verhalten bei tiefen Frequenzen. [10]

3.3.1 dB(A) Bewertung

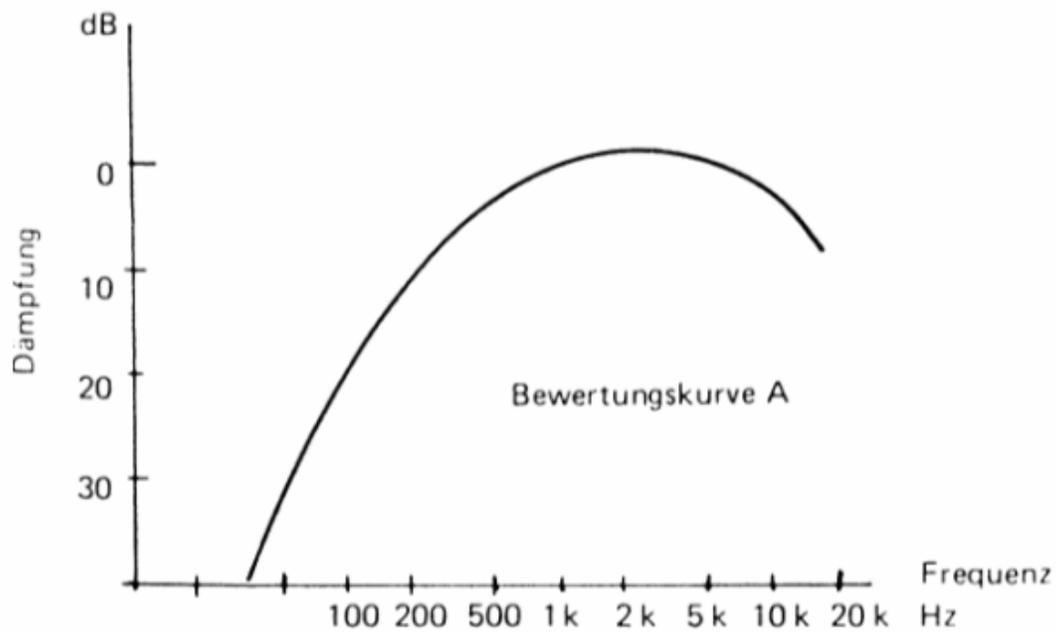


Abb. 13: A-Bewertungskurve [12]

Die A-Bewertungskurve entspricht ungefähr der inversen 40-phon-Kurve. Die einzelnen Frequenzen werden in der dB(A) Bewertung einer bestimmten Gewichtung unterzogen. Ein Nachteil der A-Bewertung ist, dass sie nur für 40 phon gültig ist und daher bei lauten Schallereignissen andere phon Kurven herangezogen werden müssen. Weiters werden tieffrequente Schallanteile nicht ausreichend berücksichtigt. Die phon-Kurven wurden durch reine Sinustöne (bzw. Schmalbandrauschen) ermittelt, deswegen ist die A-Bewertung streng genommen nur für solche Signale gültig. In der folgenden Abbildung ist ein Nachteil der dB(A) Bewertung zu sehen. Ein breitbandiger Schall mit spezieller spektraler Zusammensetzung ist trotz gleichen Wertes der dB(A) Bewertung um den Faktor 3.5 lauter als der schmalbandige Schall.

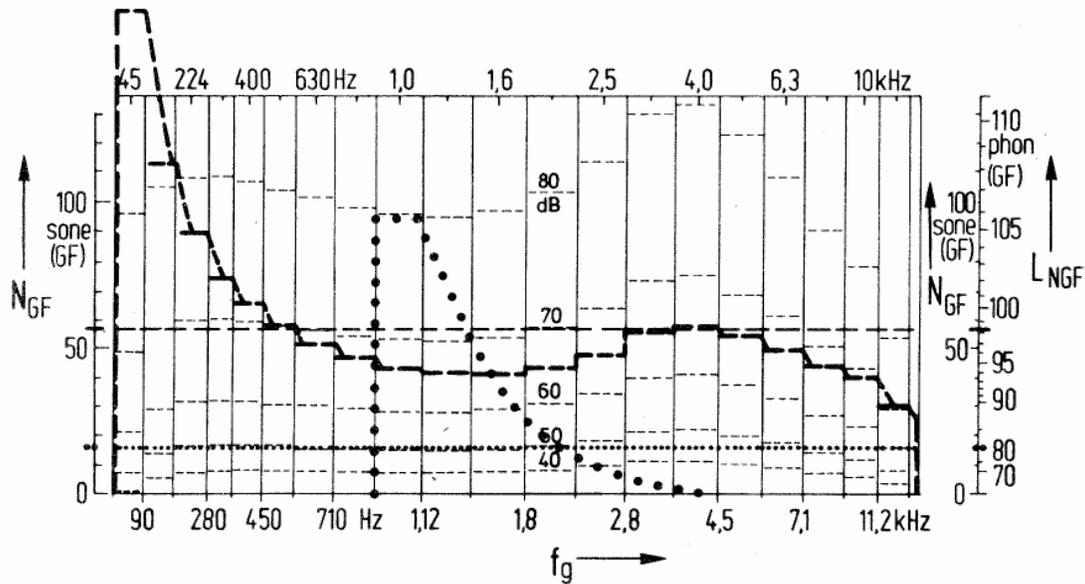


Abb. 14: gleiche dB(A) Bewertung von 2 unterschiedlichen Geräuschen [4]

Die A-Bewertung hat sich trotz dieser Nachteile auf der ganzen Welt durchgesetzt. Aus diesem Grund gibt es sehr viele Vergleichswerte. Die Realisierung und Anwendung der dB(A) Bewertung ist sehr einfach zu handhaben. Die dB(A) Bewertung wird z.B. bei der Beurteilung von Geräuschen im Immissionsschutz verwendet.

3.3.2 dB(B) Bewertung

Die dB(B) Bewertungskurve entspricht der inversen 60-phon-Kurve. Die B-Bewertungskurve stellt so wie die A-Bewertungskurve nur eine sehr grobe Annäherung dar. Die dB(B) Bewertung wird gelegentlich ergänzend bei der Messung von Fahrzeuginnenraumgeräuschen verwendet.

3.3.3 dB(C) Bewertung

Die dB(C) Bewertungskurve ist die inverse 80-phon-Kurve. Diese Bewertung kann auch als Bandpass gesehen werden. Die untere Grenzfrequenz ist 31,5 Hz und die obere Grenzfrequenz ist 8 kHz. Die dB(C) Bewertung findet Anwendung bei der Beurteilung von tieffrequenten Geräuschimmissionen.

3.3.4 dB(D) Bewertung

Diese Bewertung wurde hauptsächlich zur Erfassung von Fluglärm eingeführt. Bei der D-Bewertungskurve wird versucht, nicht nur die Lautstärke, sondern auch die Lästigkeit zu bewerten.

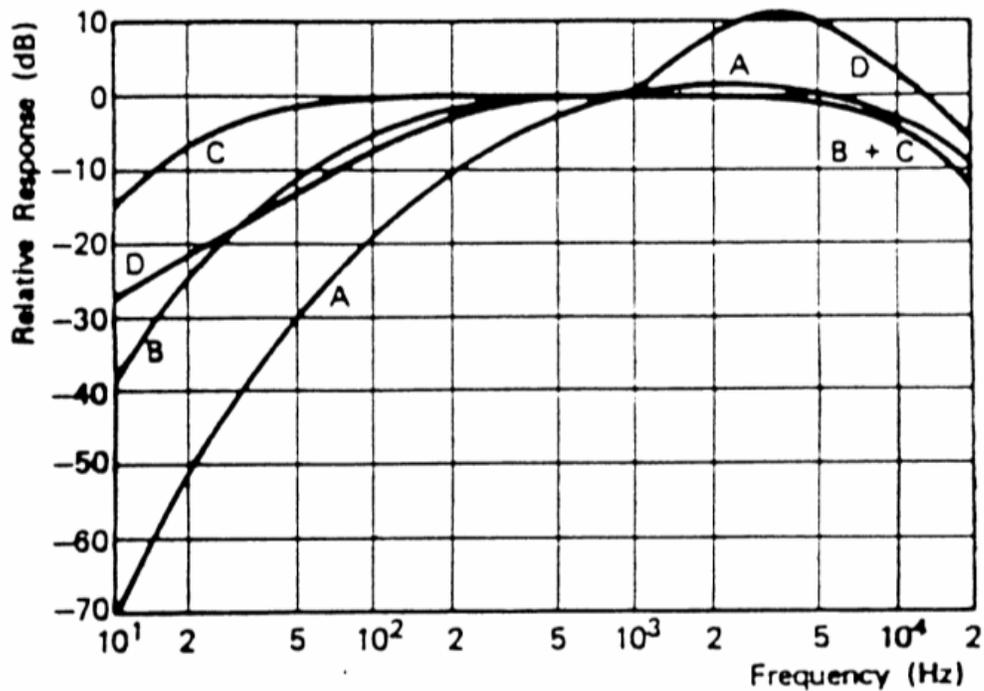


Abb. 15: Die Bewertungskurve A, B, C, D [19]

3.4 Frequenzgruppen

Eine sehr große Rolle bei der Lautstärkeempfindung spielen die Frequenzgruppen. Die Breite dieser Frequenzgruppen ist nicht über den gesamten Hörbereich gleich groß. Um herauszufinden wie groß diese Frequenzgruppen annähernd sein können, wurden viele Messergebnisse gesammelt. Man versucht also mit diesen Frequenzgruppen die spektrale Auflösung der menschlichen Schallwahrnehmung zu beschreiben.

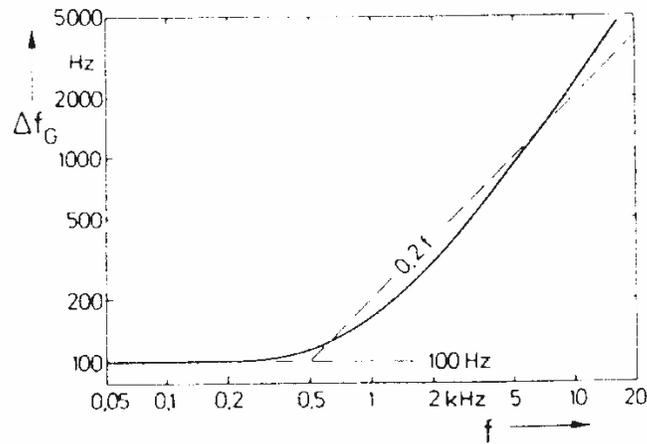


Abb. 16: Breite der Frequenzgruppen als Funktion der Frequenz [4]

Die Frequenzgruppe hat bei tiefen Frequenzen einen Wert von 100 Hz. Dieser Wert steigt ab einer Frequenz von 500 Hz proportional und dann zum Schluss hin etwas überproportional mit der Frequenz an. Die Frequenzgruppe spielt bei der Beschreibung von Hörwahrnehmungen eine so wichtige Rolle, dass sie als Einheit zum Aufbau einer so genannten Frequenzgruppenskale benützt wird. Dieser Skale liegt der Gedanke zugrunde, dass das Gehör ein breitbandiges Spektrum in Anteilen analysiert, die der Breite von Frequenzgruppen entsprechen. Die Frequenzgruppen entstehen dadurch, dass eine Frequenzgruppe an die andere gereiht wird, sodass jeweils die obere Grenze der unteren Frequenzgruppe mit der unteren Grenze der nächst höheren Frequenzgruppe übereinstimmt. Es können etwa 24 aneinander gereimte Frequenzgruppen im Hörbereich bis 16000 Hz untergebracht werden. Diese Skale ist als Tonheit z bezeichnet worden. Die Einheit ist Bark. [4]

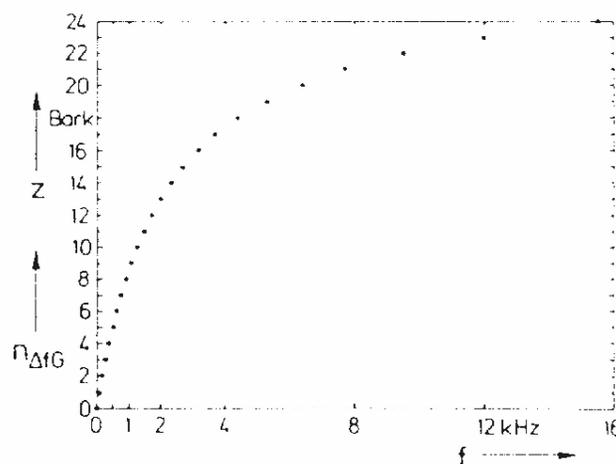


Abb. 17: Die Zahl $n_{\Delta fG}$ der bis zur Frequenz f aneinander reihbaren Frequenzgruppen ergibt den Zusammenhang zwischen der Tonheit z und der Frequenz. [4]

Genauere Werte der einzelnen Frequenzgruppen sind in der nachfolgenden Tabelle ersichtlich.

z Bark	f_u, f_o Hz	f_m Hz	z Bark	Δf_G Hz	z Bark	f_u, f_o Hz	f_m Hz	z Bark	Δf_G Hz
0	0	50	0,5	100	12	1720	1850	12,5	280
1	100	150	1,5	100	13	2000	2150	13,5	320
2	200	250	2,5	100	14	2320	2500	14,5	380
3	300	350	3,5	100	15	2700	2900	15,5	450
4	400	450	4,5	110	16	3150	3400	16,5	550
5	510	570	5,5	120	17	3700	4000	17,5	700
6	630	700	6,5	140	18	4400	4800	18,5	900
7	770	840	7,5	150	19	5300	5800	19,5	1100
8	920	1000	8,5	160	20	6400	7000	20,5	1300
9	1080	1170	9,5	190	21	7700	8500	21,5	1800
10	1270	1370	10,5	210	22	9500	10500	22,5	2500
11	1480	1600	11,5	240	23	12000	13500	23,5	3500
12	1720	1850	12,5	280	24	15500			

Abb. 18: Zusammenhang zwischen der Tonheit z und Frequenz f , sowie zwischen Frequenzgruppenbreite Δf_G und der Mittenfrequenz f_m . Die zu den Mittenfrequenzen f_m gehörenden Tonheitswerte z sind ebenfalls angegeben. Die zu den Frequenzgruppenbreiten gehörenden Grenzfrequenzen f_u und f_o einander anschließender Frequenzgruppen entsprechen den in Spalte 2 angegebenen Werten [4]

Die Transformation von Hertz in Bark geschieht folgendermaßen:

$$z = \left[13 \cdot \arctan\left(\frac{0.76 \cdot f}{1000}\right) + 3.5 \arctan\left(\frac{f}{7500}\right)^2 \right] [8] \quad (8)$$

3.5 Kritische Bandbreite (CB)

Die kritische Bandbreite ist jene Breite des Frequenzbandes, für das die Lautstärke bei einem gegebenen Schalldruckpegel konstant bleibt, unabhängig davon, welche Frequenzen innerhalb dieses Bandes dargeboten werden.

3.6 Maskierung

Die Maskierung spielt in der Psychoakustik eine wichtige Rolle. Unter Maskierung versteht man jenen Effekt, dass ein Schallereignis (z.B. Sprache, Musik) bei gleichzeitigem Vorhandensein eines Störschallereignisses (Straßenlärm, Fahrzeuginnenraumgeräusch), dieses Schallereignis gar nicht oder nur mit verminderter Lautstärke wahrgenommen werden kann. Wird das eigentliche Schallsignal vollständig verdeckt, so spricht man von vollständiger Verdeckung bzw. Maskierung. Ansonsten wird von unvollständiger Maskierung gesprochen. Das Störschallereignis wird sehr oft auch als Maskierer bezeichnet.

3.7 Ruhehörschwelle

Dies ist jener Schalldruckpegel, der bei den jeweiligen Frequenzen vorhanden sein muss, damit diese Frequenzen überhaupt wahrgenommen werden können. Die Ruhehörschwelle wird auch als absolute Hörschwelle bezeichnet. Die Ruhehörschwelle wird üblicherweise mit der Methode des pendelnden Einregelns bestimmt. [4]

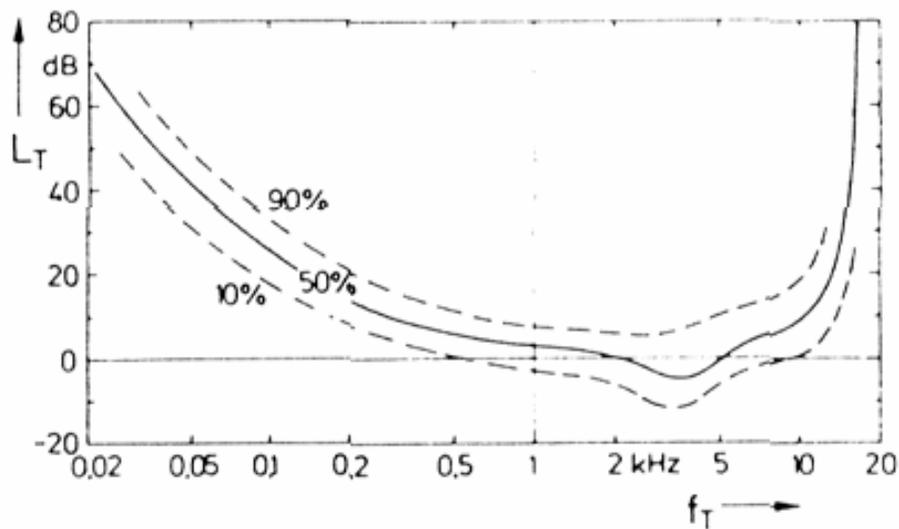


Abb. 19: Zentralwert der Ruhehörschwelle L_T von Versuchspersonen unter 25 Jahren [4]

3.8 Hörfläche

Das Gebiet zwischen der Ruhehörschwelle und der Schmerzgrenze wird Hörfläche genannt. In der folgenden Abbildung macht der große Bereich deutlich, innerhalb dessen das Gehör arbeiten kann. [4] Der Grenzwert der Gefährdung gilt für eine Beschallung von 8 Stunden pro Tag.

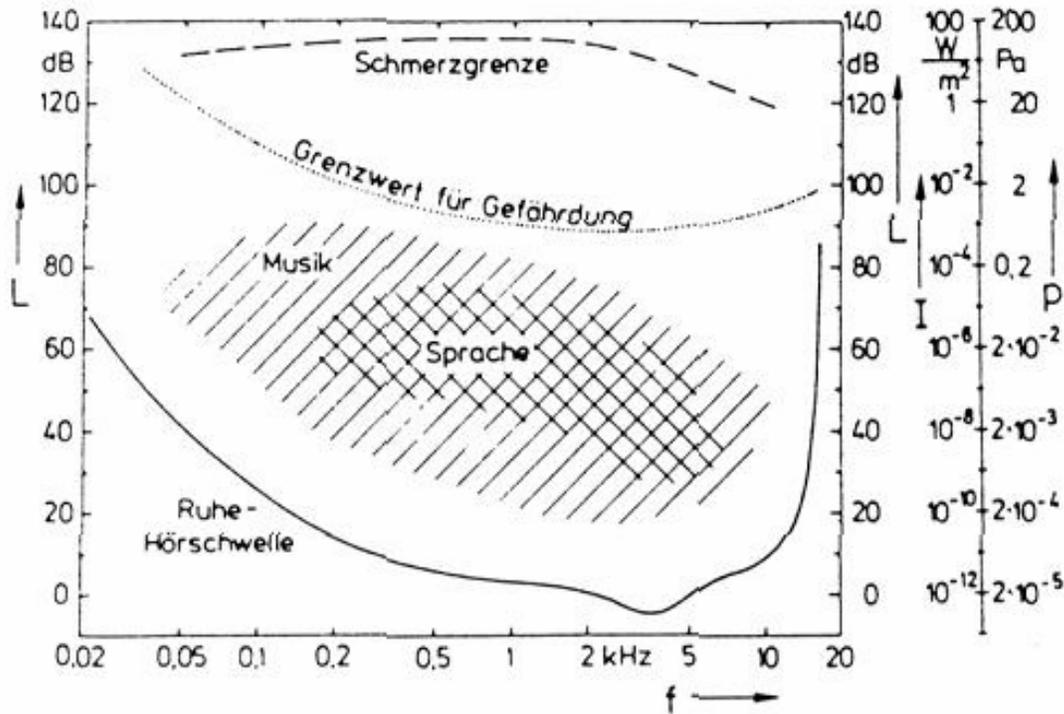


Abb. 20: Hörfläche [4]

3.9 Mithörschwelle

Die Mithörschwelle ist jener Schalldruckpegel des Testschalls (z.B. Musik, Sprache), welcher das Schallereignis haben muss, damit er neben dem Störschall gerade noch wahrnehmbar ist. Die Mithörschwelle liegt immer über der Ruhehörschwelle. Bei einigen Szenarien kann die Mithörschwelle auch in die Ruhehörschwelle übergehen.

3.10 Binaurale Lautheit

Die Erhöhung von binauraler Lautheit im Vergleich zu monauraler Lautheit hängt mit dem Schalldruck zusammen. Für kleine Lautstärken (20 dB SPL) steigt der Unterschied der wahrgenommenen Lautheit zwischen monauraler und binauraler Lautheit um den Faktor 2. Bei größeren Lautstärken (80 dB SPL) ist dieser Faktor nur mehr 1.4. Das bedeutet, dass bei niedrigen Lautstärken die Erhöhung von monauraler Lautheit zu binauraler Lautheit 8 dB beträgt. Bei größeren Lautstärken beträgt der Unterschied 6 dB. [5]

3.11 Notched-Noise Methode

Die so genannte Notched-Noise Methode zur Untersuchung der Form der auditiven Filter soll Off-Frequency-Listening ausschließen. Dabei wird als Maskierer ein Rauschen verwendet,

das eine Aussparung im Frequenzgang hat. Die Mittenfrequenz der Lücke entspricht der Frequenz des Testtones. Die Breite der Aussparung wird variiert und dabei die Wahrnehmungsschwelle für das Testsignal gemessen. Das optimale Verhältnis von Signal zu Maskierungsgeräusch wird bei dieser Methode ausschließlich mit dem auditiven Filter erreicht, deren Mittenfrequenz der Signalfrequenz entspricht. Diese Methode ist allerdings nicht dazu geeignet, Asymmetrien in der Filterform aufzuzeigen. Jedoch legen die psychoakustischen Frequenz-Tuningkurven (PTC) nahe, dass die auditiven Filter zumindest im Bereich der Spitze weitgehend symmetrisch sind, sodass die Notched-Noise Methode eine brauchbare Annäherung liefert. [25, 26]

4 Auswertungsverfahren

Um die gemessenen Werte zu beurteilen, müssen die Messdaten ausgewertet werden. Die nachfolgenden Verfahren dienen zur Auswertung der Lautheit aus den Messergebnissen. Am Ende soll herausgefunden werden, welches von diesen Messverfahren, im Vergleich mit dem psychoakustischen Hörversuch, die besten Übereinstimmungen liefert.

4.1 MARK VI Loudnesslevel nach Stevens

Am Anfang werden für alle Oktavpegel, welche in dB gemessen wurden, die Lautheitsindizes gerechnet. Es gibt nun 2 Wege wie man aus den Oktavpegeln diese Lautheitsindizes bekommt. [11]

- I. Man geht in das Nomogramm (siehe Abb. 21). Der Schnittpunkt der horizontal vom gemessenen Lautstärkepegel in dB gezogenen Linie mit der vertikalen Linie der gewünschten Frequenz spiegelt den Lautheitsindex wieder. In den meisten Fällen muss diese Größe geschätzt werden.
- II. Die 2. Methode zum Erreichen des Lautheitsindizes ist, die gemessenen dB Werte, entsprechend der in Tabelle 2 dargestellten Abweichungen, zu korrigieren. Danach wird der Lautheitsindex mit Hilfe der Tabelle ermittelt (siehe Abb. 22: Lautheitsindex bei 1000 Hz).

Frequenz in Hz	Abweichung von der Tabelle für 1000 Hz
31,5	- 21 dB
63	- 18 dB
125	- 12 dB
250	- 6 dB
500	- 3 dB
1000	0 dB
2000	+ 3 dB
4000	+ 6 dB
8000	+ 9 dB
16000	+ 12 dB

Tabelle 2: Frequenzabhängige Änderung der Lautheitsindizes [11]

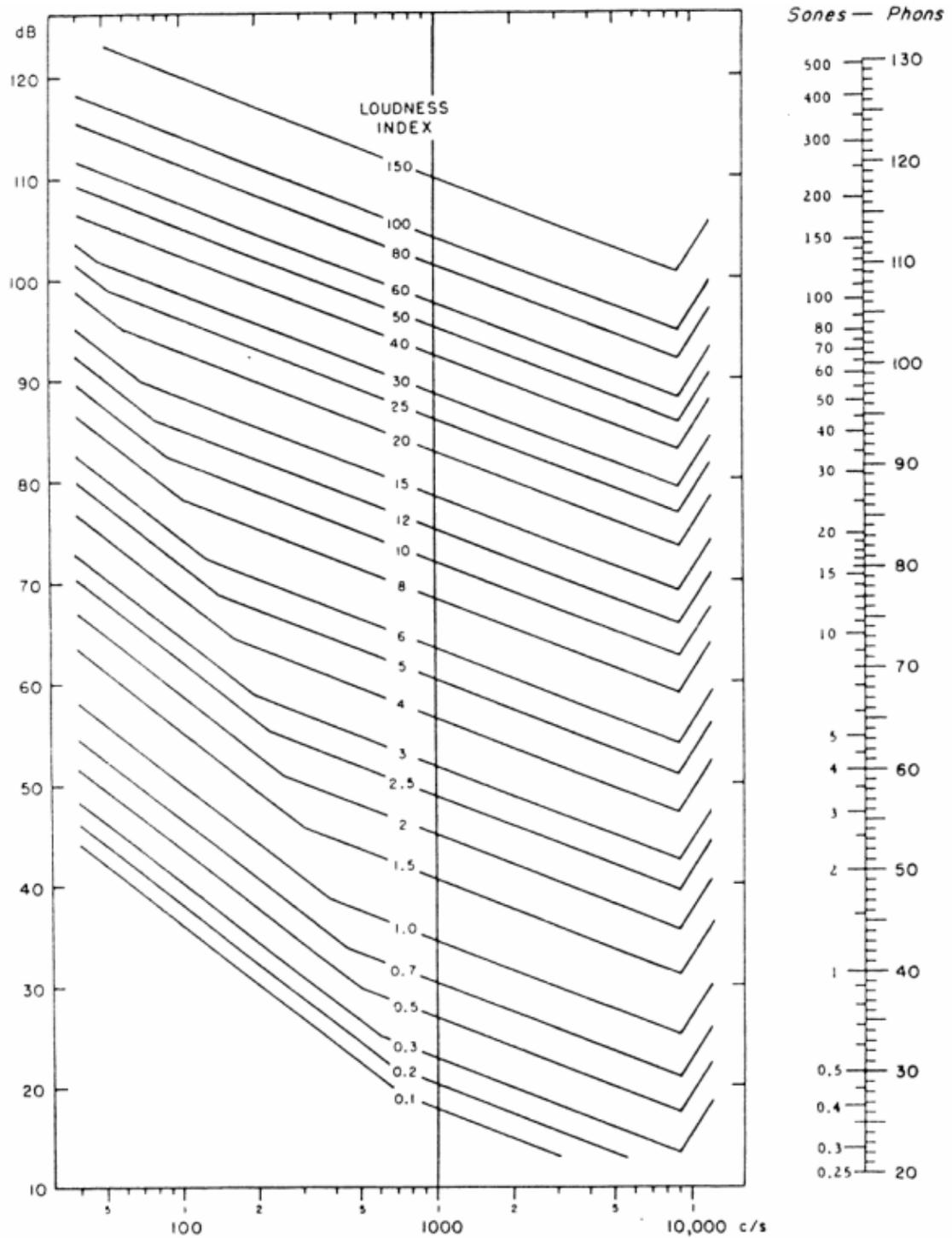


Abb. 21: Nomogramm der Lautheitsindizes [24]

Band pressure level dB	Loudness index	Band pressure level dB	Loudness index	Band pressure level dB	Loudness index
15		50	2,68	85	23,0
16		51	2,84	86	24,7
17		52	3,0	87	26,5
18	0,10	53	3,2	88	28,5
19	0,14	54	3,4	89	30,5
20	0,18	55	3,6	90	33,0
21	0,22	56	3,8	91	35,3
22	0,26	57	4,1	92	38,0
23	0,30	58	4,3	93	41,0
24	0,35	59	4,6	94	44,0
25	0,40	60	4,9	95	48
26	0,45	61	5,2	96	52
27	0,50	62	5,5	97	56
28	0,55	63	5,8	98	61
29	0,61	64	6,2	99	66
30	0,67	65	6,6	100	71
31	0,73	66	7,0	101	77
32	0,80	67	7,4	102	83
33	0,87	68	7,8	103	90
34	0,94	69	8,3	104	97
35	1,02	70	8,8	105	105
36	1,10	71	9,3	106	113
37	1,18	72	9,9	107	121
38	1,27	73	10,5	108	130
39	1,35	74	11,1	109	139
40	1,44	75	11,8	110	149
41	1,54	76	12,6	111	160
42	1,64	77	13,5	112	171
43	1,75	78	14,4	113	184
44	1,87	79	15,3	114	197
45	1,99	80	16,4	115	211
46	2,11	81	17,5	116	226
47	2,24	82	18,7	117	242
48	2,38	83	20,0	118	260
49	2,53	84	21,4	119	278
				120	298

Abb. 22: Lautheitsindex bei 1000 Hz [24]

Aus den erhaltenen sone-Werten wird nun die Summenlautheit folgendermaßen berechnet:

- Der höchste sone-Wert geht mit 100% in die Addition ein.
- Die anderen Werte werden nur mit 30% gewichtet.

$$\text{sone}_{\text{total}} = \text{sone}_{\text{OD}} = S_{\text{max}} + F(S - S_{\text{max}}) \quad (9)$$

Die Variable S_{max} ist der höchste Pegelwert des Spektrums, die Variable F ist der Gewichtungsfaktor und beträgt bei Oktaven 0.3, bei halben Oktaven 0.2 und bei großen Terzen 0.15. Die Variable S ist die Summe aller Pegel. Der errechnete Gesamtwert sone_{OD} muss wieder mit Hilfe des folgenden Nomogramms in phon_{OD} zurück transformiert werden. (→ ISO R 131-1959-E) Die Bezeichnung sone_{OD} setzt sich so zusammen, dass das O für Oktavpegel und das D für Diffusfeld steht. [11]

phon	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
20	0,250	0,268	0,287	0,308	0,330	0,354	0,379	0,406	0,435	0,467
30	0,500	0,536	0,574	0,616	0,660	0,707	0,758	0,812	0,871	0,933
40	1,00	1,07	1,15	1,23	1,32	1,41	1,52	1,62	1,74	1,87
50	2,00	2,14	2,30	2,46	2,64	2,83	3,03	3,25	3,48	3,73
60	4,00	4,29	4,59	4,92	5,28	5,66	6,06	6,50	6,96	7,46
70	8,00	8,57	9,19	9,85	10,6	11,3	12,1	13,0	13,9	14,9
80	16,0	17,1	18,4	19,7	21,1	22,6	24,3	26,0	27,9	29,9
90	32,0	34,3	36,8	39,4	42,2	45,3	48,5	52,0	55,7	59,7
100	64,0	68,6	73,5	78,8	84,4	90,5	97,0	104	111	119
110	128	137	147	158	169	181	194	208	223	239
120	256									

Tabelle 3: Umwandlungstabelle von phon in sone [11]

Der Nachteil des Stevens Verfahrens ist, dass es nur im diffusen Schallfeld angewendet werden kann. Des Weiteren liefert das Verfahren nur dann brauchbare Werte, wenn das dazugehörige Frequenzspektrum relativ glatt ist und es keine herausragenden schmalbandigen Anteile enthält. Das Verfahren ist an den Frequenzgang des Ohres angepasst und berücksichtigt den Verdeckungseffekt und die Addition der Teillautheiten. [14]

4.2 Modifikation des MARK VI durch Robinson

Robinson erkannte, dass beim MARK VI die asymmetrische Verdeckung nicht berücksichtigt wurde und versuchte, dies durch seine Modifikation zu ändern. Man errechnet die Teillautheiten des Signals gleich wie beim MARK VI von Stevens. Der Unterschied liegt nun in der Gewichtung der Teillautheiten. Es wird der sone-Wert des untersten Frequenzbandes festgehalten. Danach geht man zum nächstgelegenen Frequenzband und prüft, ob der Teillautheitswert größergleich oder kleiner ist. Falls der Wert gleich oder größer ist, so geht er mit 100% in die Berechnung ein. Ist der Wert kleiner als jener Wert des vorigen Frequenzbandes, so fließt er nur mit 30% in die Berechnung ein. Die Robinson Korrektur wird bei steigendem Spektrum nicht wirksam, deshalb werden Schallsignale mit einem Spektrum, welches ansteigt, lauter beurteilt, als jene, mit einem fallenden Spektrum. [11]

4.3 Verfahren nach Zwicker

Das Verfahren nach Zwicker ist jenes Verfahren, welches als Norm im Bereich für konstante Schallereignisse gilt. Das Verfahren ist als DIN 45631 (Berechnung des Lautstärkepegels aus dem Geräuschkpektrum; Verfahren nach E.Zwicker, Oktober 1967) und als ISO R 532 (Acoustics – Method for calculating loudness level, 1975) genormt.

4.3.1 Grundlagen des Verfahrens

Das von Zwicker entwickelte Verfahren versucht die Hörvorgänge unmittelbar nachzubilden. Die Hörvorgänge wurden in psychoakustischen Versuchen herausgefunden. Das Verfahren geht von dem Frequenzgruppenkonzept aus. Der Hörbereich wird in 24 Frequenzgruppen eingeteilt. Jede dieser 24 Frequenzgruppen hat eine konstante Breite von einem Bark. Aus praktischen Gründen werden als Näherung Terzbänder bzw. eine Zusammenfassung von Terzbändern benutzt. Oberhalb von 280 Hz werden die Frequenzgruppen durch Terzbänder angenähert. Unterhalb von 280 Hz werden die Terzbänder folgendermaßen zusammengefasst. Der erste Bereich umfasst die bewerteten Terzpegel der Mittenfrequenzen von 20 – 80 Hz. Der zweite Bereich umfasst die Frequenzen von 100 bis 160 Hz. Im dritten Bereich werden die Frequenzen von 200 Hz und 250 Hz zusammengefasst.

4.3.2 Graphische Auswertung des Verfahrens DIN 45631

- Messung der Lautstärkepegel auf Basis von Terzen.
- Jedem Terzband wird der entsprechende dB-Wert zugeordnet.
- Ermittlung des höchsten dB-Wertes des Datensatzes
- Es stehen 5 verschiedene Schablonen für diffuses und freies Schallfeld zur Verfügung.
- Jene Schablone auswählen, bei welcher der größte ermittelte dB-Wert so nahe wie möglich am obersten Rand liegt.
- Alle ermittelten dB-Werte in die ausgewählte Schablone eintragen.
- Die eingetragenen Werte werden verbunden.
- Anstiege der Messwerte werden als senkrechte Linien gezeichnet.
- Abfallende Teile werden parallel zu den eingezeichneten Kurven gezeichnet. Man setzt am rechten Ende der horizontalen Strecke bei der oberen Grenzfrequenz an und hält sich dann an die gestrichelten Kurven.
- Die stark umrandete Fläche, welche man danach erhält, entspricht der Gesamtlautheit.
- Die umrandete Fläche wird mittels Augenmaß integriert. (Die umrandete Fläche soll in ein Rechteck, welches sich über die ganze Schablonenbreite erstreckt, untergebracht werden.)
- Der durchschnittliche Lautheitswert wird an der Seite des Umrechnungsnomogrammes abgelesen.

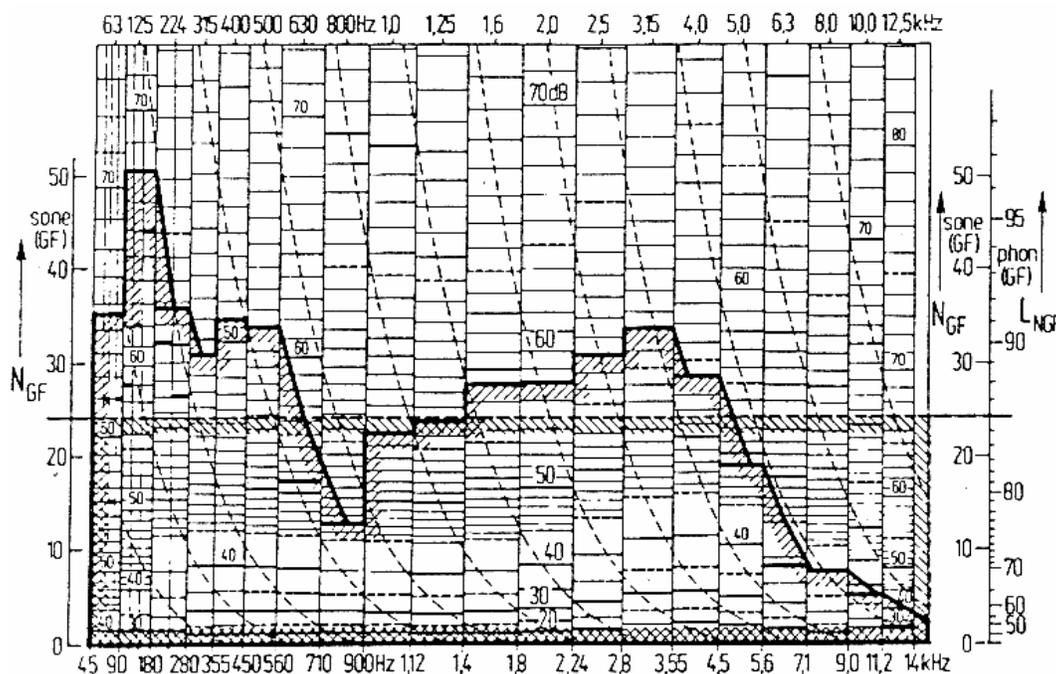


Abb. 23: Beispiel einer graphischen Auswertung [8]

4.3.3 Rechnerische Auswertung des Verfahrens

Es folgt eine kurze Erklärung der für die rechnerische Auswertung des Verfahrens nach Zwicker notwendigen Begriffe. Die Kernerregung und die Flankenerregung ergeben den Erregungspegel E . Die Flankenerregung verläuft entsprechend den Mithörschwellen. Nach einem Potenzgesetz wird das Tonheitsmuster des Erregungspegels in das Tonheitsmuster für die spezifische Lautheit transformiert.

Es wird dabei angenommen, dass die relative spezifische Lautheitsänderung proportional der relativen Erregungsänderung ist. [8]

$$\frac{\Delta N'}{N' + N'_{gr}} = k \cdot \frac{\Delta E}{E + E_{gr}} \quad \text{wobei} \quad E_{gr} \cdot s = E_{RHS} \quad (10)$$

Variablenerklärung :	N'	spezifische Lautheit
	N'_{gr}	spezifische Grundlautheit
	k	Proportionalitätskonstante
	E	Erregung
	E_{gr}	Grunderregung
	E_{RHS}	Erregung an der Ruhehörschwelle
	s	Schwellenfaktor

Unter der Voraussetzung, dass für $E=0$ auch $N'=0$ gilt, lautet die Lösung dieser Differenzgleichung:

$$N' = N'_{gr} \cdot \left[\left(1 + s \cdot \frac{E}{E_{RHS}} \right)^k - 1 \right] \quad (11)$$

Die folgenden Konstanten ergeben sich für eine Frequenz um 1 kHz:

$$k = 0.23$$

$$s = 0.5$$

(Diese Werte der Konstanten ergeben sich aus der Überlegung, dass bei 1 kHz mit 40 dB die spezifische Lautheit 1 sone ergeben muss). Da die spezifische Lautheit N' für kleine Werte von E gegen Null streben soll, muss der Ausdruck innerhalb der runden Klammer $1-s$ betragen.

Der Schwellenfaktor $s = E_{\text{Testton}}/E_{\text{Maskierer}}$ ist jenes Verhältnis, aus der wahrnehmbaren Erregung eines Testtones zur Erregung eines Stör- oder Maskierungsrauschens innerhalb einer kritischen Bandbreite [9]. Dieses Verhältnis hängt von der Frequenz und vom Pegel ab.

$$N' = 0.08 \cdot \left(\frac{ERHS}{E_0} \right)^{0.23} \cdot \left[\left(0.5 + 0.5 \cdot \frac{E}{ERHS} \right)^{0.23} - 1 \right] \frac{\text{sone } G}{\text{Bark}} \quad (12)$$

Variablenerklärung : E_0 Erregung, die der I_0 entspricht
 soneG .. die Lautheit wurde mit Hilfe von
 Frequenzgruppen berechnet

Die Gesamtlautheit N in sone wird nun aus dem Integral der spezifischen Lautheit über die Frequenz (Bark-Skala) gebildet. [4]

$$N = \int_0^{24\text{Bark}} N' dz \quad (13)$$

4.4 Eine Überarbeitung des Lautheits-Modells von Zwicker durch Glasberg und Moore

Die Überarbeitung des Modells berücksichtigt genauer die Kurven gleicher Lautstärke, welche ja vom Lautstärkepegel abhängig sind. Das Verfahren hat den Vorteil, dass die Reizwerte analytisch berechnet und nicht aus Tabellen oder Nomogrammen herausgelesen werden. Durch diese Berechnung sollen Unstetigkeiten bei den berechneten Lautheitswerten vermieden werden.

4.4.1 Einzelheiten des Modells

Bei diesem Modell wird nur von 2 Fällen ausgegangen. Der erste Fall ist ein frontal einfallendes Geräusch und der zweite Fall ist ein Geräusch über Kopfhörer. Es wird angenommen [7], dass die Übertragung durch Außenohr und Mittelohr bei Frequenzen unterhalb von 1000 Hz ungefähr der invertierten Form der Kurve gleicher Lautstärke bei 100 phon entspricht. Bei Frequenzen über 1000 Hz wird davon ausgegangen, dass die Übertragung durch Außen- und Mittelohr durch die Form der minimalen Reizschwellenkurve abbildbar ist. Dadurch, dass die minimale Reizschwelle bei niedrigen Frequenzen steiler ansteigt als die 100 Phon Kurve gleicher Lautstärke, wird angenommen, dass ein internes

Geräusch bei niedrigen Frequenzen existiert. Diese Annahme hat auch Zwicker gemacht. Der Reizwert $LE(thr)$ an der Reizschwelle wird wie folgt berechnet.

$$LE(thr) = MAF(f) - ELC(f) + 100 \quad (14)$$

$ELC(f)$ (Equal Loudness Contour) ist die 100 Phon Kurve gleicher Lautstärke. MAF (Minimal Audible Field) ist die Reizschwelle. Oberhalb einer Frequenz von 1000 Hz verläuft die 100 Phon Kurve gleicher Lautstärke beinahe parallel zur Reizschwellenkurve, jedoch um 96 dB getrennt. Der Reizwert an der Reizschwelle wird mit einem konstanten Wert von 4 dB angenommen. Unterhalb von 1000 Hz wird angenommen, dass der Reizwert der Reizschwelle durch das interne Geräusch mit der Frequenz steigt. Die Reizwerte werden beim Modell von Glasberg und Moore aus Hörfilterformen berechnet. Diese Hörfilterformen wurden bei verschiedenen Mittenfrequenzen und Pegeln mit Hilfe der Notched-Noise-Methode in zahlreichen Studien gemessen. Die äquivalente Rechteck-Bandbreite ERB (Equivalent Rectangular Bandwidth) des Hörfilters wird wie folgt berechnet.

$$ERB = 24.7 \cdot (4.37 + F) \quad (15)$$

Diese Funktion ist bei mittleren und hohen Frequenzen ähnlich der traditionellen CB-Funktion (Frequenzgruppenfunktion). Bei Mittenfrequenzen unterhalb von 500 Hz ergibt die ERB Funktion niedrigere Werte als die CB-Funktion. ERB wird in Hz angegeben und die Mittenfrequenz F in kHz. Bei dieser Methode wird der Reizwert für ein gegebenes Geräusch als Ausgabewert der Hörfilter, die auf dieses Geräusch reagieren, definiert. Als nächstes muss die Frequenzskala dieses Reizwertes in eine Form umgewandelt werden, die dem Hörsystem entspricht. Bei dieser Methode verknüpft die entsprechende Skala die Anzahl der $ERBs$ mit der Frequenz F .

$$AnzahlERBs = 21.4 \cdot \log_{10} \cdot (4.37 \cdot F + 1) \quad (16)$$

Diese Skala unterscheidet sich im Bezug auf die Bark Skala nach Zwicker bei tiefen Frequenzen. Die spezifische Lautheit N' wird über der ERB Skala abgebildet. Nachfolgende Gleichung ist jene, die den Zusammenhang zwischen E_{SIG} und N' für ein Signal in ruhiger Umgebung beschreibt.

$$N' = c \cdot \left[\left(\frac{E_{SIG}}{E_0} \right)^\alpha - \left(\frac{E_{THRQ}}{E_0} \right)^\alpha \right] \quad (17)$$

Variablenerklärung :	N'	spezifische Lautheit
	c	Konstante
	E_{SIG}	Reiz durch das Signal
	E_0	bei einem Geräusch von 0 dB SPL erzeugter Reiz
	E_{THRQ} ...	Signal an der minimalen Reizschwelle
	α	Konstante

Die Variablen c und α sind konstant, wobei $\alpha < 1$ ist. Es wird angenommen, dass die spezifische Lautheit nicht negativ sein kann.

Die folgende Gleichung beschreibt die spezifische Lautheit eines partiell maskierten Signals.

$$N'_{SIG} = c \cdot \left(1 - \frac{k \cdot E_{NOISE}}{E_{SIG}} \right) \cdot \left[\left(\frac{E_{SIG}}{E_0} \right)^\alpha - \left(\frac{E_{THRQ}}{E_0} \right)^\alpha \right] \quad (18)$$

Variablenerklärung :	N'_{SIG}	Reiz durch das Signal
	c	Konstante
	k	Parameter
	E_{NOISE} ...	Reiz durch das Geräusch alleine
	E_{SIG}	Reiz durch das Signal alleine
	E_0	bei einem Geräusch von 0 dB SPL erzeugter Reiz
	E_{THRQ} ...	Signal an der minimalen Reizschwelle
	α	Konstante

Frequenz [kHz]	0.1	0.4	0.5	0.8	1.0	2.0	4.0	8.0	10.0	20.0
k, linear	4.7	1.9	0.62	0.56	0.50	0.58	0.58	0.83	2.4	2.4
k, dB	6.7	2.9	-2.1	-2.5	-3.0	-2.4	-2.4	-0.8	3.8	3.8

Tabelle 4: Werte des Parameters k bei ausgewählten Mittenfrequenzen [6]

Der Wert für den Parameter k wird aus der obigen Tabelle entnommen. Bei Zwischenfrequenzen wird der Wert von k durch lineare Interpolation ermittelt. Die Werte für den Parameter k in der Tabelle wurden aus einer großen Menge von Daten abgeleitet, die durch die Notched-Noise-Methode gewonnen wurden. Der Wert von k hängt jedoch vom Hörenden, der Signaldauer, der eingesetzten Messmethode und der Definition der Reizschwelle ab. Die Konstante c wird so gewählt, dass die Lautheit eines sinusförmigen 1 kHz Signals bei 40 dB Schalldruck genau 1 sone beträgt. Der Wert von c beträgt 0.0806. Die Konstante α ist 0.2106.

4.4.2 Aussagen des Modells

Dieses Modell kann die Lautheit partiell maskierter Signale ohne Korrekturfaktoren erklären. Das überarbeitete Modell kann den Verlauf der Kurven gleicher Lautstärke als Funktion des Pegels genau vorhersagen. Oberhalb der Frequenz von 1 kHz sind die Kurven nach dem Modell ungefähr parallel zur minimalen Reizschwellen-Kurve. In Abbildung 24 werden die gerechneten Werte mit den Werten aus der ISO 226 für Frequenzen unterhalb von 1000 Hz verglichen.

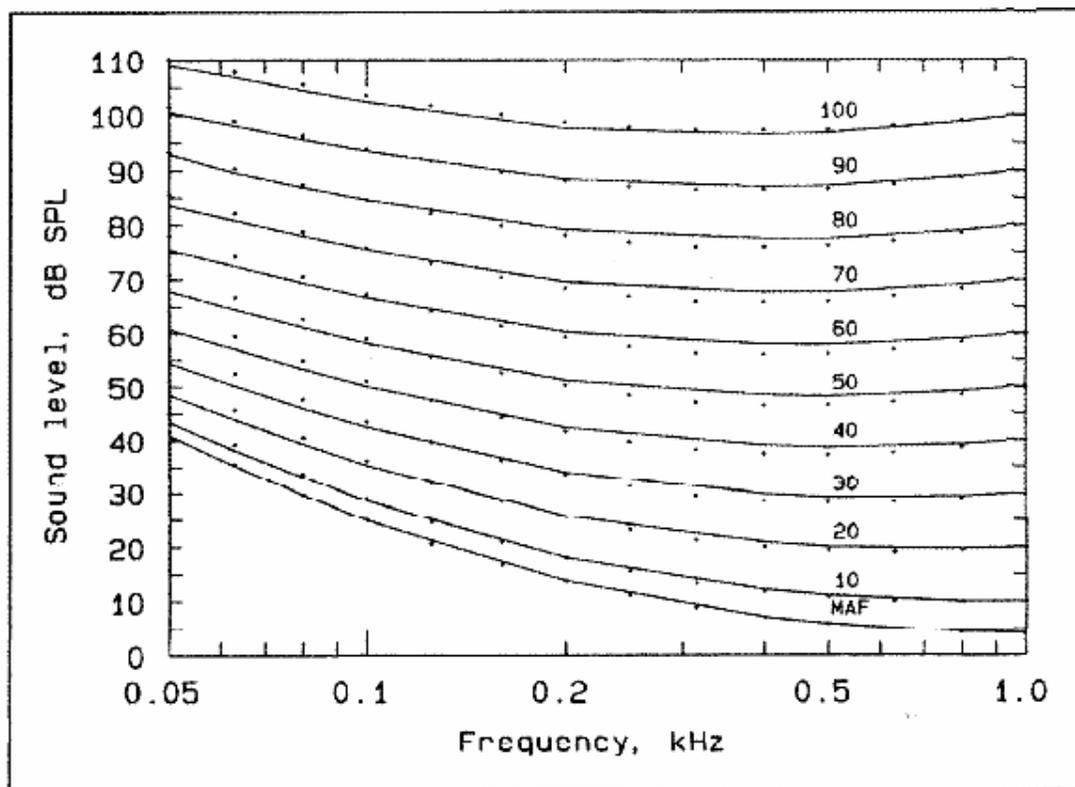


Abb. 24: Vergleich zwischen ISO 226 (Einzelpunkte) und dem Modell von Glasberg-Moore (Linien) [6]

Die Abweichungen dieses Modells sind gering und weichen selten über 2 dB von der ISO 226 Norm ab.

Bei diesem Modell wurden weder Hörfilterformen für Frequenzen unter 100 Hz bzw. über 10 kHz noch bei sehr hohen Signalpegeln (über 90 dB) gemessen.

4.4.3 Weitere Verbesserungen diese Modells durch Glasberg, Moore und Baer 1997

Eine Erweiterung zum vorigen Modell ist, dass man nicht nur binaurale Lautheit, sondern auch monaurale Lautheit berechnen kann. Dieses Modell berechnet die Lautheit für jedes Ohr separat. Für eine binaurale Präsentation wird der Gesamtpegel durch einfache Signalsummierung der Lautstärke an den zwei Ohren errechnet. (Dies stimmt mit vielen empirischen Daten überein, die in Studien ermittelt wurden. Diese Studien haben vorgeschlagen, dass die Lautheit etwas weniger als doppelt so groß ist als bei monauralem Hören [5, 17, 18])

Das Modell basiert auf den durchschnittlichen Resultaten vieler normal hörender Personen und hat folgende Auswahlmöglichkeiten:

- Freies Feld
- Diffuses Feld
- Kopfhörer
- Monaural
- Binaural

In weiter Folge kann man aus folgenden Eingabemethoden auswählen:

- Komplexe Töne
- Geräuschband
- Gemischtes Signal
- Terzbänder

Durch die Eingabemöglichkeiten von Terzbändern sind die Eingabedaten ähnlich der ISO 532B Norm. Genauere Aussagen können jedoch für Töne mit getrennten sinusförmigen Komponenten gemacht werden.

Zum Berechnen der Ergebnisse dieser Methode aus den Terzpegeln wurde mir von Herrn Brian Glasberg ein auf MS-DOS basierendes Programm zur Verfügung gestellt.

4.5 Andere Auswertungsverfahren

4.5.1 Perceived Noise Level nach Kryter

Dieses Verfahren ist keine reine Lautheitsbewertung. Kryter wollte die Lästigkeit des Schalls auch in seine Auswertungen einfließen lassen. Dadurch entstanden die Kurven gleicher Lästigkeit, welche auch noy-Kurven genannt werden. Die Berechnung erfolgt gleich wie bei Stevens MARK VI, der Unterschied ist jedoch, dass die Lautheit eben durch die Lästigkeit ersetzt wird. Kryter bewertete bevorzugt Flugzeuglärm.

4.5.2 Verfahren nach Aures

Das Verfahren nach Herrn Wilhelm Aures setzt sich mit dem Wohlklang des Schallsignals auseinander. In diesem Verfahren wird nicht nur auf die Lautheit sondern auch auf die Schärfe, die Klanghaftigkeit und die Rauigkeit eingegangen. Die Lautheit in diesem Verfahren wird ebenfalls nach Zwicker berechnet.

4.5.3 Schallbewertung nach ISO 1996

In dieser Norm wird das zu bewertende Geräusch in Oktavbänder (31.5 Hz, 62.5 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1000 Hz, 2000 Hz, 4000 Hz, 8000 Hz) zerlegt. Die Werte des Oktavpegeldiagramms werden anschließend in das Diagramm der Noise Rating Curves eingezeichnet. Der Spektralanteil, der die Kurve mit dem höchsten Wert schneidet, bestimmt den Lautstärkewert.

Die Form der Noise Rating Curves erinnert an die Kurven gleicher Lautstärke, wobei diese Kurven im Frequenzbereich um 4000 und 12000 Hz nicht auf die durch den Gehörgang entstandene höhere Empfindlichkeit des Ohres eingehen. Das Gehör bewertet die Schallereignisse nicht in Oktaven sondern in Frequenzgruppen. Es wäre daher sinnvoll das Spektrum in Terzpegel zu zerlegen. Ein weiterer Nachteil dieses Verfahrens ist, dass aus jedem Schallereignis, welches bewertet wird, nur ein Bereich herausgenommen wird und die anderen Spektren unberücksichtigt bleiben. Daher ist dieses Verfahren von den psychoakustischen Erkenntnissen her nicht auf dem neuesten Stand.

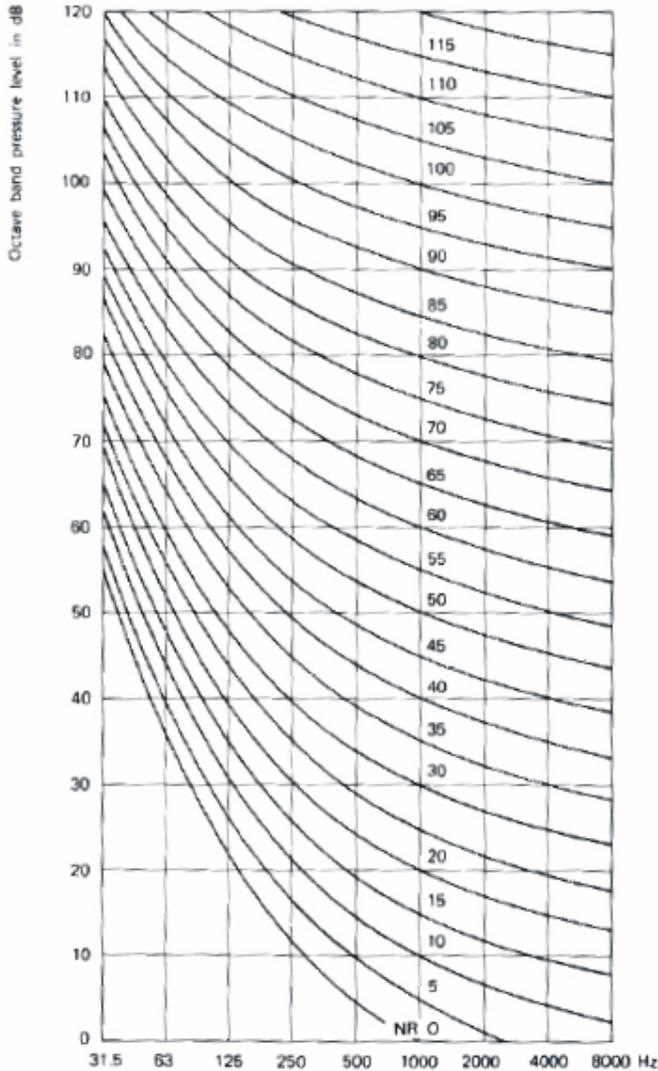


Abb. 25: Noise Rating Curves [13]

5 Messsignale

Eine wichtige Rolle bei den Messungen und dem psychoakustischen Hörversuch spielen natürlich die Messsignale selbst. Es sollten Geräusche sein, welche im normalen Leben im Auto vorkommen. So ein Geräusch kann z.B. ein Nachrichtensprecher, ein Musikstück, ein Fahrzeuginnenraumgeräusch oder ähnliches sein. Diese Geräusche besitzen in den durchgeführten Versuchen jeweils eine maximale Dauer von 10 Sekunden.

5.1 Stationäre Messsignale

Dadurch, dass es eine Vielzahl von Möglichkeiten stationärer Signale gibt, gerade im Fahrzeug, ist es natürlich nicht leicht die richtigen auszuwählen. Die stationären Messsignale sind demnach:

- Rosa Rauschen
- 3 Oktavbandrauschen von 200 Hz bis 1600 Hz
- ein Fahrzeuginnenraumgeräusch aufgenommen bei einer Fahrgeschwindigkeit des Autos von 120 km/h
- ein Fahrzeuginnenraumgeräusch bei 60 km/h Fahrgeschwindigkeit

Da sich ein Fahrzeug meist im fahrenden Zustand befindet, wurde auf das Leerlaufgeräusch verzichtet.

5.2 Instationäre Messsignale

Die größere Problematik liegt aber darin, geeignete instationäre Signale zu finden. Es wurden solche Signale ausgesucht, welche auch real von Rundfunkanstalten übertragen werden. Die ausgesuchten Werbespots wurden im österreichischen Rundfunk gespielt. Es wurde außerdem eine Vollastbeschleunigung aus dem 3.Gang als geeignetes Messsignal qualifiziert. Folgende instationäre Messsignale wurden ausgewählt:

- Der Musiktitel "Per me per sempre" von Eros Ramazotti
- Der Musiktitel "Every breath you take" von Police
- Eine Vollastbeschleunigung aus dem 3.Gang
- Ein Werbespot über das Krainerhaus
- Eine Frauenstimme
- Ein Ausschnitt aus "Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky"
- Der Musiktitel "Whenever Wherever" von Shakira

-
- Ein Ausschnitt eines Trompetenkonzertes “Nr. 1 Allegro“ von Molter
 - Ein Ausschnitt einer Variation einer gezupften Gitarre
 - Der Musiktitel “Have you ever been in love” von Celine Dion
 - Ein Werbespot von Neckermann
 - Das Musikstück “My way” von Frank Sinatra
 - Ein Ausschnitt aus der Symphonie Nr. 9 d-Moll op.125 “Presto“ von Beethoven

Es wurden bewusst bekannte Musiksignale ausgewählt, sodass die Wahrscheinlichkeit größer ist, diese im Fahrzeug zu hören, als bei nicht so bekannten Künstlern.

6 Messungen

Die Messungen gliederten sich in monaurale und binaurale Messungen. Das Messobjekt war immer ein und dasselbe Fahrzeug. Ein E-Klasse T-Modell mit Soundsystem. Bei allen Messungen wurde das Automobil in einem abgeschlossenen Raum gestellt, um die Störeinflüsse von außen so gering wie möglich zu halten. Die Messungen fanden bei stehendem Fahrzeug statt. Um eine Beeinflussung des Motor-Leerlaufgeräusches auf die Messsignale zu verhindern, wurde der Pkw nicht gestartet.



Abb. 26: Messobjekt Mercedes E-Klasse T Modell

Bei den Messungen war der Lautstärkepegel im Innenraum des Autos bei Stille 35 dB(A).

Versuchsspezifikationen für das Fahrzeug:

- Lüftung auf Null
- Standard Einstellung für das Sound Setting in der Head Unit
- Regler für Höhen und Bässe auf Null
- Die Balance für das ganze Fahrzeug war in der Mitte eingestellt

Damit bei monauralen und binauralen Messungen immer die gleichen Lautstärkeverhältnisse herrschen, wurde das Messsignal Rosa Rauschen mit Hilfe eines Schallpegelmessgerätes auf einen Pegel von ca. 72 dB(A) am Fahrersitz eingestellt. Das Messgerät war eines der Firma

Voltcraft 100432 IEC 651 Type 2. Die gleiche Lautstärke des Rosa Rauschens wurde mit Hilfe eines Schallpegelmessgerätes auch bei dem psychoakustischen Hörversuch eingestellt.

Die Messsignale wurden über die Soundanlage in den Fahrzeuginnenraum eingespielt und entweder monaural oder binaural gemessen. Die Daten wurden auf einem Laptop gespeichert und danach mit dem Programm 'Artemis' ausgewertet.

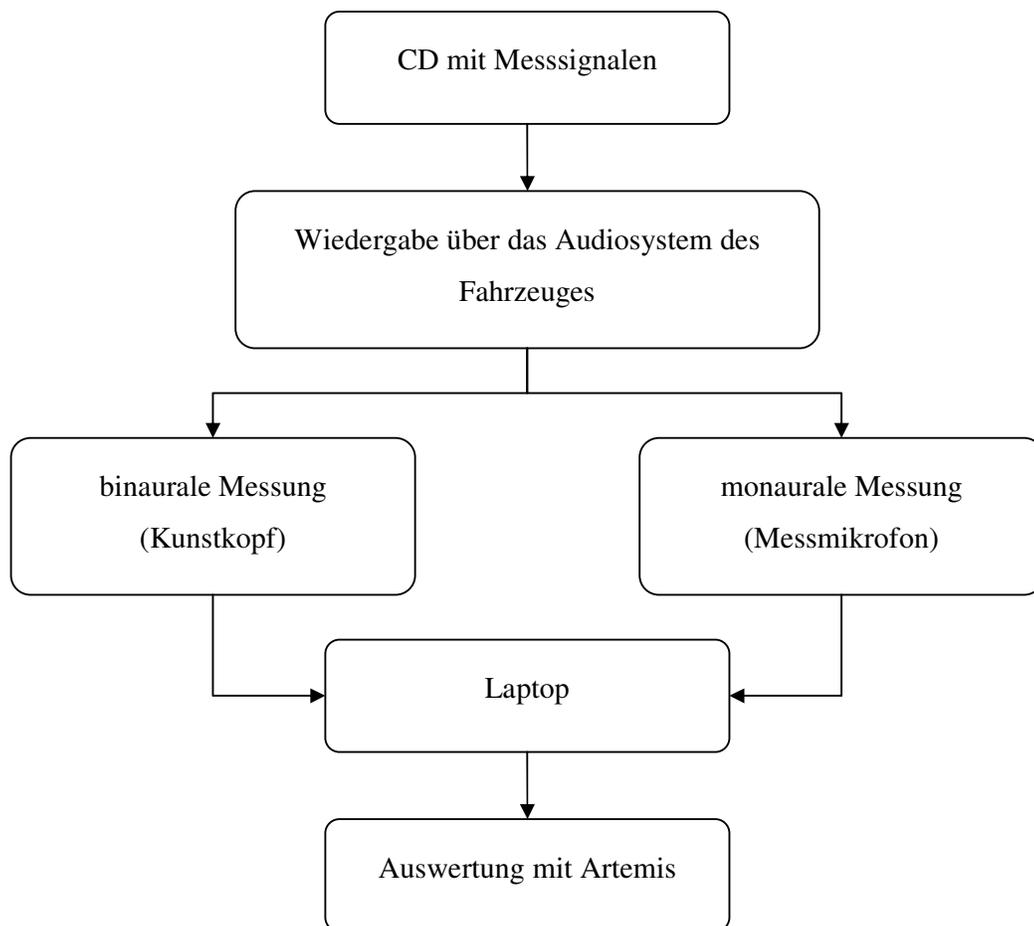


Abb. 27: Messkette

Die folgende Abbildung bietet einen kleinen Überblick über die Position der Lautsprecher im verwendeten Messfahrzeug.

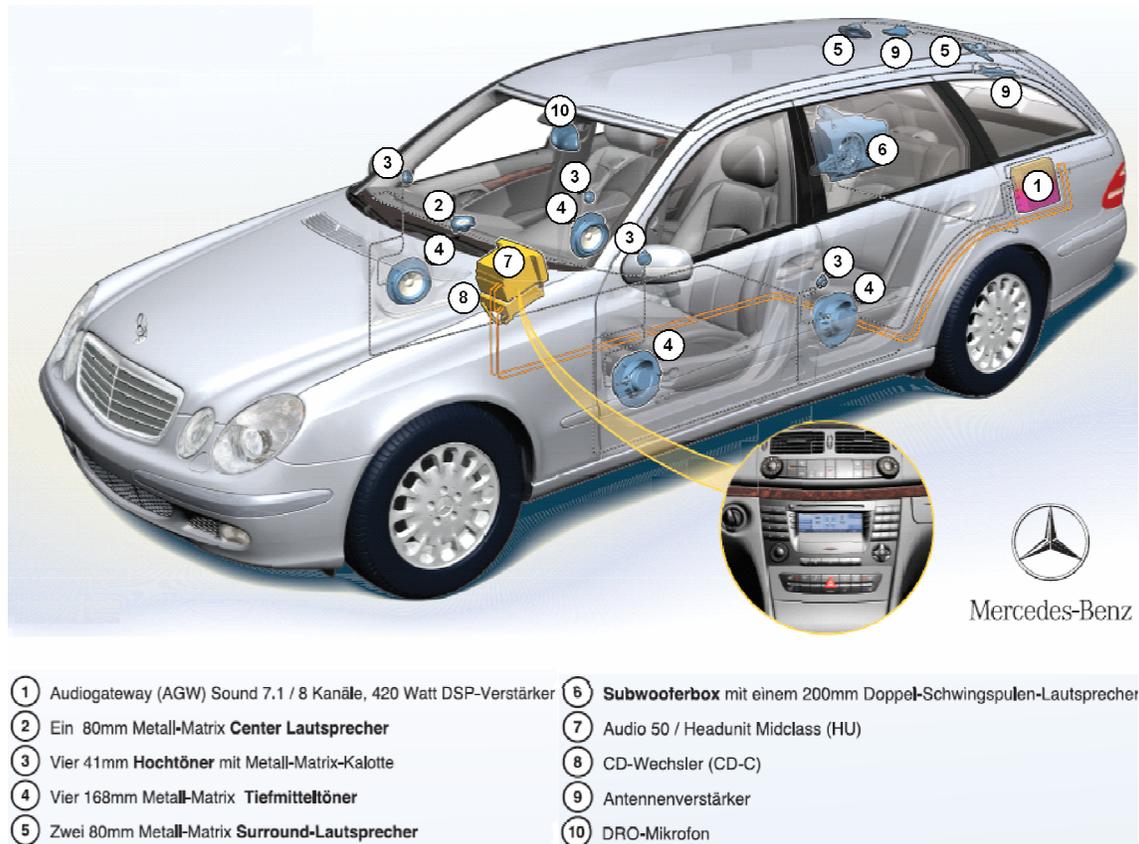


Abb. 28: Lautsprecher-Anordnung im Fahrzeug

6.1 Binaurale Messung

Die binauralen Messungen wurden mit einem Kunstkopf an 4 Sitzpositionen durchgeführt.

6.1.1 Messequipment

Bei den binauralen Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

- HMS III von der Firma Head Acoustics
- Head ASM IV Stativ
- Laptop
- Auswertungssoftware Artemis 5.1



Abb. 29: Messaufbau Kunstkopfmessung

6.2 Monaurale Messung

Die monauralen Messungen wurden auch an allen 4 Sitzpositionen durchgeführt.

6.2.1 Messequipment

Bei den monauralen Messungen wurden folgende Geräte verwendet:

- Messmikrofon G.R.A.S. 40AR (1/2 Zoll)
- Mikrofonvorverstärker G.R.A.S. Type 26 AJ No 29416
- Speiseeinheit BEQ II.1 von Head Acoustic
- verstellbare Halterung
- Laptop
- Auswertesoftware Artemis 5.1



Abb. 30: Messmikrofonaufbau

6.3 Messergebnisse der objektiven Messungen

Bei der binauralen Messung war der Pegel des Rosa Rauschens 74 dB(A) am linken Kunstkopfohr und 73 dB(A) am rechten Kunstkopfohr. Bei der monauralen Messung betrug dieses Rosa Rauschen 71 dB(A). Die Unterschiede zwischen linkem und rechtem Ohr resultieren aus der Position der Lautsprecher. Direkt in der Nähe des linken Ohres oder rechten Ohres, je nach Sitzposition, befindet sich auch die Fensterscheibe, wodurch bei einem Ohr mehr Druck als beim anderen Ohr entsteht, das ist mit ein Grund das Unterschiede zwischen den beiden Ohren auftreten

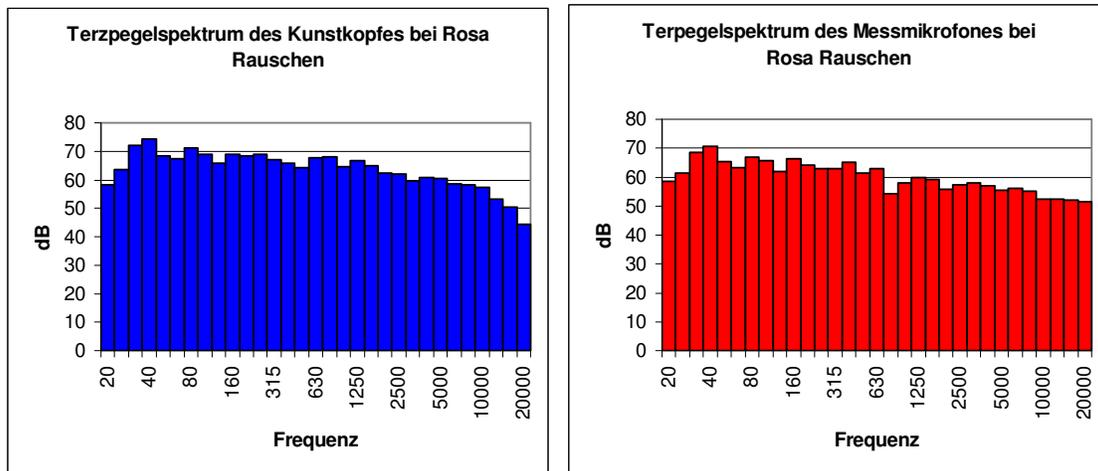


Abb. 31: Terzpegelspektrum von Kunstkopf und Messmikrofon bei Rosa Rauschen am Fahrersitz

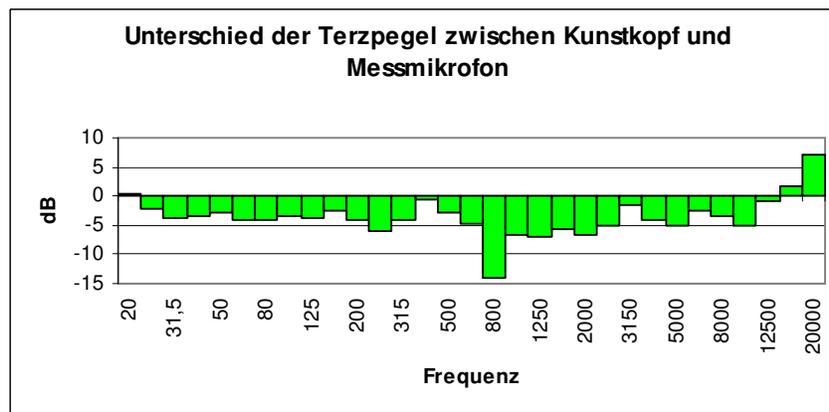


Abb. 32: Differenz zwischen Kunstkopf und Messmikrofon bei Rosa Rauschen am Fahrersitz

Es ist ersichtlich, dass die Differenz zwischen dem Kunstkopfmesssystem und dem Messmikrofon sich zwischen 3 und 5 dB einpendelt. Die Ausnahme auf der Position des Fahrersitzes stellt die Frequenz bei 800 Hz dar. Bei dieser Frequenz ist der Unterschied fast 14 dB.

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{340}{800} = 0.425 \cdot m \quad (19)$$

Die Wellenlänge λ beträgt für eine Frequenz von 800 Hz 42.5 cm. Dieser Einbruch könnte durch die Position des Messmikrofons entstanden sein. Am wahrscheinlichsten ist dieser Einbruch am Fahrersitz jedoch durch einen statistischen Messfehler zu erklären.

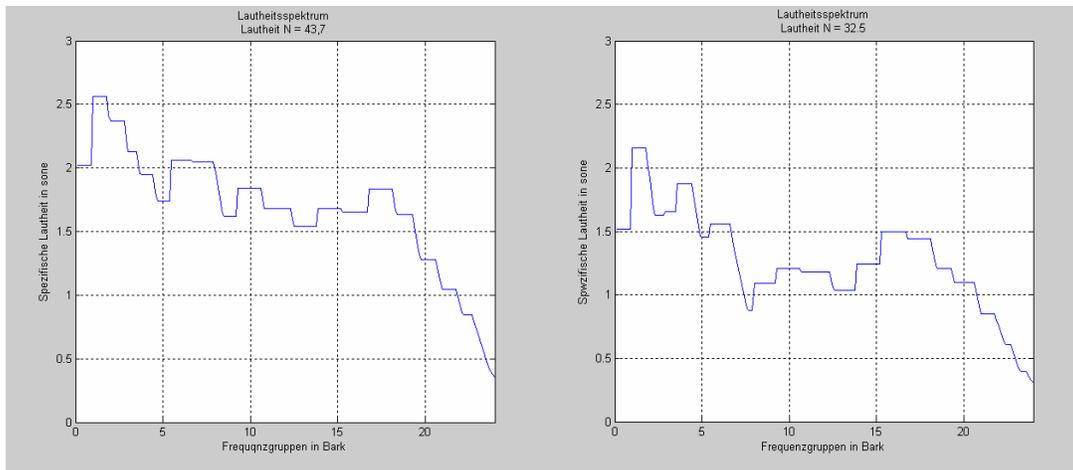


Abb. 33: Spezifische Lautheit eines Kunstkopfmesssystems (links) und eines Messmikrofons (rechts) bei Rosa Rauschen

Dadurch, dass es Unterschiede im Spektrum zwischen dem Kunstkopf und dem Messmikrofon bei Rosa Rauschen gibt, ist die spezifische Lautheit auch unterschiedlich. Es ist ersichtlich, dass der im Durchschnitt um 4 dB niedrigere Pegel und der Einbruch bei 800 Hz eine niedrigere Lautheit N des Messmikrofons zufolge hat.

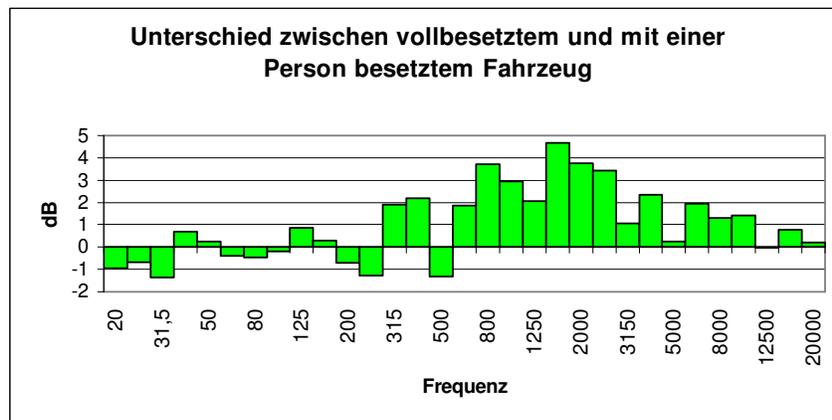


Abb. 34: Differenz zwischen vollbesetztem und mit einer Person besetztem Fahrzeug

Der Unterschied zwischen einem vollbesetztem Fahrzeug und einem Fahrzeug, bei dem nur eine Sitzposition besetzt ist, ist bei Frequenzen zwischen 315 Hz und 6000 Hz deutlich erkennbar. Diese Differenz kommt dadurch zustande, dass bei vollbesetztem Fahrzeug nicht so viele Reflexionen zustande kommen wie wenn nur eine Sitzposition besetzt ist. Je mehr Personen im Fahrzeug sitzen, desto mehr Schall wird absorbiert.

Da das Gehör aber nicht arithmetisch über die Zeit mittelt, sondern sich an dem höchsten Lautheitswert orientiert, ist es sinnvoll, eine Auswertung nach dem 95-ten Perzentil durchzuführen. Das 95-te Perzentil sagt aus, dass mindestens 95% der Messwerte kleiner gleich und 5% der Messwerte größer gleich der Zahl sein müssen.

Die Messung bei vollbesetztem Fahrzeug wurde nur mit dem Kunstkopf-Messsystem durchgeführt. Die Auswertung aller Verfahren wurde einmal nach dem arithmetischen Mittelwert und einmal nach dem 95-ten Perzentil durchgeführt. Die Ergebnisse werden im Kapitel 8 dargestellt.

7 Psychoakustischer Hörversuch

Um die verschiedenen Auswertungsverfahren richtig einschätzen zu können, müssen natürlich dieselben Geräusche auch subjektiv bewertet werden. Der psychoakustische Hörversuch wird nach der Methode der Größenschätzung (magnitude estimation) durchgeführt. Eine andere Methode wäre jene gewesen, bei der der Proband die Lautstärke des Audiosystems so einstellt, dass er bei einem Geräusch einen Höreindruck bekommt, der doppelt so laut ist wie ein Referenzgeräusch. Dies ist aber im Fahrzeug nicht möglich, weil die Versuchsperson zwischen den Signalen vergleichen muss. Das wiederum setzt voraus, dass das Referenzsignal eine konstante Lautstärke besitzt. Diese Lautstärke wird jedoch beim Einstellen des Geräusches auf doppelte Lautstärke in Bezug auf das Referenzgeräusch verändert.

7.1 Grundlagen

Der Hörversuch dient dazu, dass ein Eindruck gewonnen werden kann, wie das menschliche Ohr das Verhältnis von zwei Geräuschen bezogen auf ihre Lautheit empfindet. Die Ergebnisse dieses Hörversuchs geben Aufschluss darüber, welche Auswertungsverfahren die Lautheit für stationäre und instationäre Signale richtig bewerten.

7.2 Durchführung des Hörversuches

Die Probanden des psychoakustischen Hörversuches stammen alle von Daimler Chrysler aus dem MTC (Mercedes-Benz Technologie Center) Entwicklungsbereich. Bei den Versuchspersonen handelte es sich nicht nur um Spezialisten aus dem Audio- oder Akustikbereich, sondern auch um Personen, die sich nicht auf die Themen Audio oder Akustik spezialisiert haben. Der Hörversuch wurde immer unter gleichen Bedingungen durchgeführt.

7.2.1 Einführung des Probanden in den Hörversuch

Bevor der Hörversuch gestartet wurde, wurde dem Probanden die Aufgabenstellung dieser Diplomarbeit erklärt. Wichtig war es als Versuchsleiter dem Probanden klar zu machen, dass es sich bei dem folgenden Experiment nicht um einen Gehörtest handelte, sondern um einen Hörversuch. Der Proband sollte sein Empfinden wiedergeben, so wie er es in dem jeweiligen Moment empfand. Diese Information war deshalb wichtig für den Probanden, damit er nicht den Wert niederschreibt der geglaubt wird richtig zu sein, sondern den tatsächlich empfundenen Wert.

7.2.2 Ablauf des Hörversuches

Die Probanden erhielten 2 Geräusche zu Auswahl. Das erste Geräusch war das Referenzgeräusch und das zweite Geräusch war das zu beurteilende Geräusch. Ein Geräusch konnte in diesem Fall ein Sprachsignal, Rauschen oder Musik sein. Es sollte die Lautstärke des zweiten Geräusches im Verhältnis zum Referenzgeräusch in Prozent angegeben werden. Das Referenzgeräusch hatte dabei immer die Wertung 100. Wenn das zweite Geräusch nun als doppelt so laut empfunden wurde als das Referenzgeräusch, dann sollte dieses Geräusch mit 200 bewertet werden. Falls das Geräusch 3-mal so laut empfunden wurde, mit 300 und bei 4-mal so laut mit 400 bewertet werden. Wird jedoch das zweite Geräusch als nur halb so laut empfunden, so sollte mit 50 bewertet werden. Bei einer Empfindung, bei der das Signal als 4-mal so leise empfunden wird, sollte mit 25 bewertet werden. Bei den Bewertungen waren Zwischenschritte erlaubt. Wenn zum Beispiel das zweite Geräusch gegenüber dem Referenzgeräusch, als gerade nicht doppelt so laut empfunden wurde, sollte man z.B. mit 180 oder 190 bewerten. Der Hörversuch umfasste 18 Vergleichspaare. Jedes Geräusch dauerte ungefähr 10 Sekunden. Nach jedem Vergleichspaar hatte man 2 Sekunden Zeit zu entscheiden. Diese kurze Zeitspanne wurde deshalb gewählt, damit man sich einfach spontan entscheidet und nicht lange überlegt. Keines dieser Vergleichspaare sollte wiederholt werden. Der Hörversuch wurde an 4 Sitzpositionen durchgeführt. Wie bei den durchgeführten monauralen und binauralen Messungen, wurde die Audioanlage auf 72 dB(A) bei Rosa Rauschen eingestellt. Der Testbogen für diesen Hörversuch ist im Anhang abgebildet. Bei der ersten Sitzposition wurde dem Probanden anhand des Vergleichspaares 1 der Ablauf des Hörversuches noch einmal verdeutlicht. Der Hörversuch lief vollkommen automatisch ab, der Proband hatte nur den Testbogen auszufüllen. Damit man feststellen konnte, ob es einen Unterschied zwischen vollbesetzten Fahrzeug und leerem Fahrzeug gibt, wurde mit einigen Probanden der gleiche Hörversuch auch im vollbesetzten Fahrzeug durchgeführt.

7.2.3 Sitzpositionen

Die Reihenfolge der Sitzpositionen war folgendermaßen:

- Beifahrersitz
- Hinten rechts
- Fahrersitz
- Hinten links

Die Reihenfolge ist bewusst so gewählt worden, da unter anderem so der Versuchsleiter beim Erklären des Hörversuchs neben dem Probanden sitzen konnte. Nach den ersten zwei

Sitzpositionen ist jedes Mal eine kleine Pause gemacht worden, damit sich das Ohr ein bisschen erholen konnte. Um die mögliche Nervosität der Probanden abzubauen, gab es bei dieser kurzen Unterbrechung auch Getränke und Süßigkeiten. Nach dieser Pause wurde der Fahrersitz beurteilt. In der Automobilindustrie wird gezielt darauf geachtet, dass man auf der Fahrerposition das beste Hörerlebnis hat. Zum Schluss wurde die Position hinten links beurteilt. Die Dauer eines Hörversuchs betrug pro Sitzposition 7 Minuten und 13 Sekunden.

7.2.4 Vergleichspaare

Es wurden folgende Vergleichspaare für den Hörversuch zusammengestellt.

- Vergleichspaar 1: Rosa Rauschen – Beethoven Symphonie Nr. 9 “Presto“
- Vergleichspaar 2: “Have you ever been in love” – Neckermann
- Vergleichspaar 3: Fahrzeuginnenraumgeräusch 60 km/h – “my way“
- Vergleichspaar 4: Trompetenkonzert “Allegro“ von Molter – gezupften Gitarre
- Vergleichspaar 5: Rosa Rauschen – “Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky“
- Vergleichspaar 6: Rosa Rauschen – “Whenever Wherever“
- Vergleichspaar 7: Rosa Rauschen – Frauenstimme
- Vergleichspaar 8: Rosa Rauschen – “Every breath you take“
- Vergleichspaar 9: Rosa Rauschen – “Per me per sempre“
- Vergleichspaar 10: Rosa Rauschen – Krainerhaus
- Vergleichspaar 11: Rosa Rauschen – Vollastbeschleunigung aus dem 3 Gang
- Vergleichspaar 12: Rosa Rauschen – Fahrzeuginnenraumgeräusch 120 km/h
- Vergleichspaar 13: Rosa Rauschen – 3 Oktavbandrauschen
- Vergleichspaar 14: “Per me per sempre“ – Frauenstimme
- Vergleichspaar 15: Krainerhaus – Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky
- Vergleichspaar 16: Vollastbeschleunigung 3 Gang – “Every breath you take“
- Vergleichspaar 17: Fahrzeuginnenraumgeräusch 120 km/h – „Whenever Wherever“
- Vergleichspaar 18: 3 Oktavbandrauschen – “Every breath you take“

Die ersten 4 Vergleichspaare dienten zur Einstimmung auf die Sitzposition. Diese 4 Titel werden auch in die Auswertung mit aufgenommen. Ab Vergleichspaar 5 wurden alle Signale zuerst mit Rosa Rauschen verglichen. Danach wurde jedes Geräusch zumindest einmal mit einem anderen Geräusch verglichen, um so leichter abzuschätzen, ob ein Proband eventuell geraten hat.

7.3 Teilnehmerstatistik

Um eine bessere statistische Auswertung durchführen zu können, wurde nach dem absolvieren des psychoakustischen Hörversuchs den Teilnehmern ein Fragebogen gegeben, welchen sie ausfüllen sollten. Dieser Fragebogen ist im Anhang abgebildet.

Bei diesem psychoakustischen Hörversuch nahmen 33 Personen teil. Davon waren 27 Teilnehmer männlich und 6 Teilnehmerinnen weiblich. Dies entspricht einem Anteil von 18,2%. Der höhere männliche Anteil der Versuchspersonen lässt sich darauf zurückführen, dass ein geringerer weiblicher Anteil in diesem Entwicklungs-Bereich beschäftigt ist.

Eine weitere Frage aus dem Fragebogen gibt Auskunft über die Altersverteilung der Versuchspersonen.

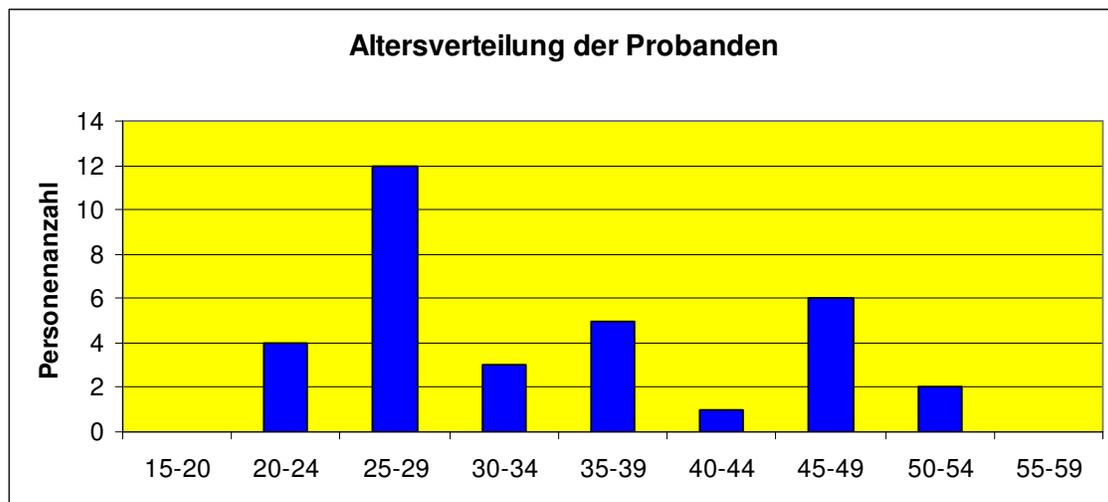


Abb. 35: Ergebnis der Altersverteilung der Probanden

Die nächste Frage bezog sich darauf, ob die Versuchsperson einen Führerschein besitzt. Der Proband sollte auch die Frage nach einem eigenen Fahrzeug beantworten. Alle 33 Teilnehmer des psychoakustischen Hörversuches besitzen einen Führerschein und auch ein Fahrzeug. Diese Frage wurde deswegen in den Fragebogen aufgenommen, um herauszufinden, ob die Probanden mit der Situation eines Fahrzeuginnenraumes bzw. eines Fahrzeuges vertraut sind.

Eine weitere wichtige Frage war, ob jemand der Versuchspersonen schon einmal an einem psychoakustischen Hörversuch teilgenommen hat. Daraus kann man schließen, dass die Versuchsperson so eine Situation schon erlebt hat und es demnach keine neue

75%-Quantil sagt aus, dass 25% der Werte gleich oder größer sind. Damit wird ein Toleranzbereich geschaffen in dem 50% der Ergebnisse liegen. Eine weitere Aussage über die Bewertung der Paarvergleiche kann getroffen werden, indem eine Verteilung rechtssteil, linkssteil oder symmetrisch ist.

7.4.1 Besetzung von einer Sitzposition

Die nachfolgende Auswertung bezieht sich auf jenen Hörversuch, bei welchem nur eine Sitzposition im Fahrzeug besetzt war. Dieser Hörversuch wurde mit 33 Probanden durchgeführt.

Da einige Musikstücke beim psychoakustischen Hörversuch 2-mal vorkommen, kann man eine Aussage treffen, ob ein Proband geraten hat oder nicht. Die Probanden, welche bei den Stücken geraten haben, werden nicht in den Auswertungen berücksichtigt.

Die Anzahl der Probanden, die bei verschiedenen Vergleichspaaren geraten haben, beträgt bei

- Vergleichspaar 9, 7, 14 : 4 Personen
- Vergleichspaar 10, 5, 15 : 3 Personen
- Vergleichspaar 11, 8, 16 : 3 Personen
- Vergleichspaar 12, 6, 17 : 6 Personen
- Vergleichspaar 13, 8, 18 : 2 Personen

Die Ergebnisse der 18 Paarvergleiche bei Besetzung einer Sitzposition sind in der anschließenden Abbildung dargestellt.

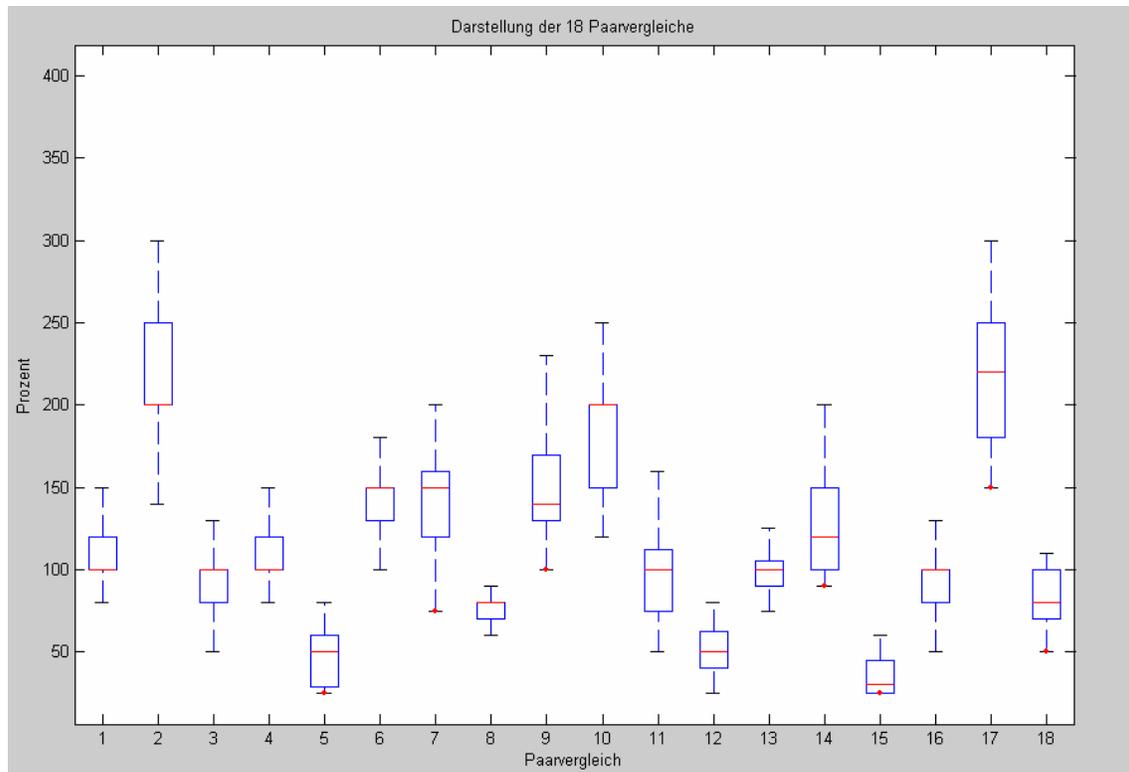


Abb. 37: Darstellung der Ergebnisse des Hörversuchs bei einer besetzten Sitzposition

7.4.2 Besetzung von vier Sitzposition

Weiters wurde auch ein psychoakustischer Hörversuch bei vollbesetztem Fahrzeug durchgeführt (allerdings nur mit 8 Probanden).

Die Anzahl der Probanden, die bei verschiedenen Vergleichspaaren geraten haben, beträgt bei

- Vergleichspaar 9, 7, 14 : 0 Personen
- Vergleichspaar 10, 5, 15 : 1 Person
- Vergleichspaar 11, 8, 16 : 0 Personen
- Vergleichspaar 12, 6, 17 : 1 Person
- Vergleichspaar 13, 8, 18 : 0 Personen

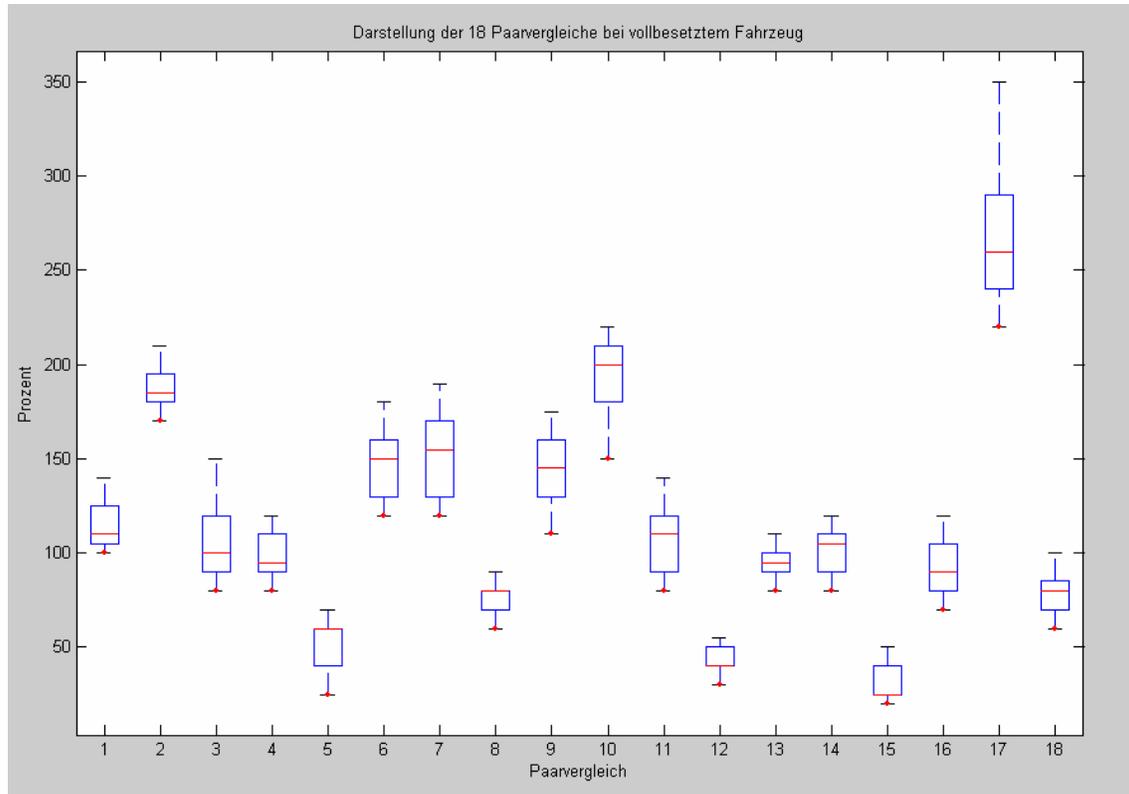


Abb. 38: Darstellung der Ergebnisse des Hörversuchs bei vollbesetztem Fahrzeug

Die obere Abbildung zeigt die Ergebnisse der statistischen Auswertung bei vollbesetztem Fahrzeug. Die Toleranzbänder sind im Vergleich zur Besetzung von nur einer Sitzposition nicht so groß. Der Grund dafür ist, dass diese Probanden alle aus dem Bereich der Akustik kommen und ein psychoakustischer Hörversuch für diese Personen nichts Neues darstellt.

8 Vergleich der objektiven und subjektiven Ergebnisse

In diesem Kapitel werden nun die objektiven und subjektiven Messergebnisse für jedes Vergleichspaar miteinander verglichen. Die objektiven Messergebnisse sind die Werte der Auswertung des Kunstkopfes, bei denen der Wert vom linken und rechten Kunstkopfhörer gemittelt wurde. Daraus wird dann abgeleitet, wie viele Übereinstimmungen es bei den verschiedenen Auswertungsverfahren im Vergleich mit dem psychoakustischen Hörversuch gibt. Das Verhältnis zwischen dem zweiten Geräusch zu dem ersten Geräusch wird in Prozent dargestellt. Der Ausdruck MW gibt den Medianwert des Hörversuches an. Das Toleranzband wird durch Q_{25} welches das 25%-Quantil des Hörversuches und Q_{75} welches das 75%-Quantil des Hörversuches darstellt angegeben. P_{95} gibt das 95-te Perzentil an. Der Modalwert ist jener Wert, der am häufigsten wiedergegeben wurde.

Die Gegenüberstellung der objektiven und subjektiven Ergebnisse wird nur im ersten Paarvergleich dargestellt. Die restlichen Tabellen sind im Anhang zu finden.

8.1 Nur der Fahrersitz besetzt

Die ersten 4 Vergleichspaare sind mit Vorsicht zu behandeln, weil diese Geräusche nicht zweimal sondern nur einmal im Hörversuch vorkommen, damit kann keine genaue Aussage getroffen werden, ob die eine oder andere Person das Ergebnis geraten hat.

- **Vergleichspaar 1: Rosa Rauschen-Beethoven Symphonie Nr. 9**
Presto

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q_{25}	Q_{75}
	sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	40,0	92	100	100	120
Glasberg-Moore	51,0	42,6	83	100	100	120
Stevens	29,4	30,6	104	100	100	120
Robinson	62,6	48,8	78	100	100	120
Zwicker P_{95}	44,6	52,2	117	100	100	120
Glasberg-Moore P_{95}	52,0	54,6	105	100	100	120
Stevens P_{95}	30,3	42,8	141	100	100	120
Robinson P_{95}	63,5	61,0	96	100	100	120

Tabelle 5: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 1

Das Geräusch Rosa Rauschen fällt zu höheren Frequenzen hin um 3dB pro Oktave ab. Damit ist der Energiegehalt des Rauschsignales pro Oktave konstant. Der Ausschnitt aus der Symphonie von Beethoven beginnt im piano und steigert sich dann nach ca. 2 Sekunden zum fortissimo. Dadurch wird es für die Probanden vom Hörversuch natürlich sehr schwer zu entscheiden, ob sie nach der leisesten Stelle bewerten sollen oder die lauteste Stelle in Betracht ziehen sollen. Die Methode nach Glasberg-Moore ist jenes Verfahren, dass bei Verwendung des 95-ten Perzentilwertes sehr nahe an das Ergebnis des Hörversuches herankommt. Der Modalwert beträgt 100% und der Hörversuch entspricht einer linkssteilen Verteilung.

- **Vergleichspaar 2: Have you ever been in love – Neckermann**

Der Titel „Have you ever been in love“ wird von der Sängerin Celine Dion gesungen. Der Werbespot der Firma Neckermann wird von einer Frauenstimme gesprochen. Bei den Auswertungen, wo über die Zeit gemittelt wird, erzielt das Auswertungsverfahren von Stevens ein gutes Ergebnis. Bei den Auswertungen, bei denen sich die Verfahren an den 95-ten Perzentilwert orientiert, ist jenes von Zwicker das Beste. Der Toleranzbereich liegt zwischen 200% und 250%. Der Modalwert und Medianwert bei diesem Paarvergleich beträgt 200% und es ist eine linkssteile Verteilung.

- **Vergleichspaar 3: Fahrzeuginnenraumgeräusch 60 km/h – My way**

Das Fahrzeuginnenraumgeräusch wurde bei 60 km/h aufgenommen. Der Titel „My way“ wird von Frank Sinatra gesungen. Die Stimme ist sehr rechtslastig und die Streicher kommen sehr stark von der linken Seite. Das einzige Auswerteverfahren, welches annähernd das Ergebnis des Hörversuches erreicht, ist jenes von Stevens bei Mittelwertbildung. Alle anderen Methoden berechnen bei diesem Beispiel ein falsches Ergebnis. Bei diesem Beispiel ist der Modalwert 100%, der Medianwert 80% und die Verteilung ist rechtssteil.

- **Vergleichspaar 4: Trompetenkonzert Nr. 1 Allegro von Molter –
gezupfte Gitarre**

Das folgende Vergleichspaar wurde deshalb gewählt, um zwei Musikstücke vergleichen zu können, bei denen 2 Instrumente im Vordergrund stehen. Das Verfahren nach Zwicker liefert bei diesem Paarvergleich ein sehr gutes Ergebnis, wenn man die Lautheit nach dem 95-ten Perzentilwert berechnet. Bei diesem Vergleich von zwei Musikstücken haben 19 Probanden den Medianwert von 100 empfunden. Neun weitere Versuchspersonen liegen zwischen 100 und 120. Beim vergleichen der beiden Musikstücke herrschte sehr große Einigkeit bei den

Probanden. Das 25%-Quantil liegt bei 100% und das 75%-Quantil liegt bei 120%. Der Medianwert und Modalwert beträgt 100% bei einer linkssteilen Verteilung.

Die Geräusche, die ab diesem Zeitpunkt miteinander verglichen werden, kommen mindestens zweimal im psychoakustischen Hörversuch vor. Damit kann man eine Aussage treffen ob die Ergebnisse der Versuchspersonen geraten wurden oder nicht.

- **Vergleichspaar 5: Rosa Rauschen – aus Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky**

Der Ausschnitt aus dem Stück Schwanensee wird von einer Oboe gespielt, im Hintergrund hört man eine Harfe. Dieses Stück wird von den Hörern lauter bewertet als die Auswertungen der Messergebnisse ergeben. Dies kann damit in Verbindung gebracht werden, dass es natürlich sehr schwer ist, ein mindestens um die Hälfte leiser empfundenes Signal als das Referenzsignal zu bewerten. Die Tendenz des Hörversuches geht klar in die Richtung 4-mal so leise. Das Toleranzband des psychoakustischen Hörversuches erstreckt sich von 30% bis 60%. Der Modalwert sowie auch der Medianwert betragen 50% und die Verteilung ist rechtssteil.

- **Vergleichspaar 6: Rosa Rauschen – Whenever Wherever**

Der Titel „Whenever Wherever“ wird von der Sängerin Shakira gesungen. Der Ausschnitt wurde aus dem Refrain gewählt. Die einzige Methode, die an das Ergebnis des Hörversuchs herankommt, ist jenes nach Zwicker bei arithmetischer Mittelung der Lautheit. Das einzige andere Messverfahren, das noch im Toleranzbereich liegt, ist jenes von Stevens bei arithmetischer Mittelung. Das Verfahren von Zwicker beim 95-ten Perzentil, das ein Verhältnis von 153% berechnet, fällt nur sehr knapp aus dem Toleranzbereich heraus. Die meisten Probanden liegen bei der Bewertung zwischen 130% und 150%. Die Verteilung ist bei diesem Paarvergleich linkssteil und hat einen Modalwert sowie einen Medianwert von 150%.

- **Vergleichspaar 7: Rosa Rauschen – Frauenstimme**

Die Sprecherin spricht nicht monoton ihren Text, sondern variiert auch in der Lautstärke. Die Empfindung des Sprachsignals ist lauter als die Auswertungen der Lautheitsmethoden. Das 25%-Quantil beträgt bei diesem Paarvergleich 120% und das 75%-Quantil 160%. Der

Medianwert und Modalwert ist in diesem Beispiel 150% und die Verteilung ist rechtssteil. Das Verfahren, welches im Toleranzbereich liegt, ist jenes von Zwicker bei einer Auswertung nach dem 95-ten Perzentil.

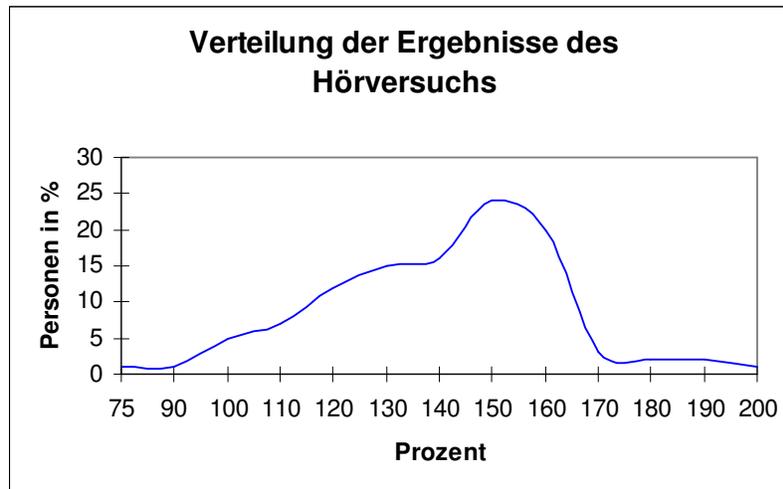


Abb. 39: Rechtssteile Verteilung der Hörversuchsergebnisse des Paarvergleiches 7

Die Verteilungskurve der Personen ist in Abbildung 39 zu sehen. Die meisten Probanden befinden sich zwischen 120% und 160%.

Die Berechnungen der Auswertungsverfahren sind im Vergleich mit dem Hörversuch zu niedrig.

In der folgenden Abbildung wird deutlich, dass sich die Lautheit über den Verlauf der Zeit bei diesem Sprachsignal sich sehr stark ändert.

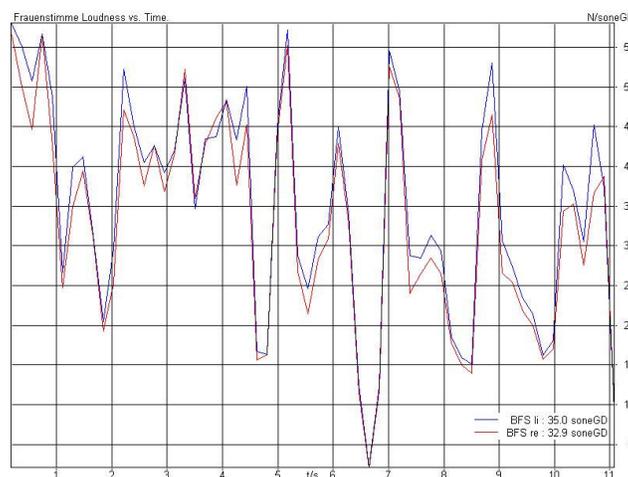


Abb. 40: Lautheit über die Zeit von der Frauenstimme

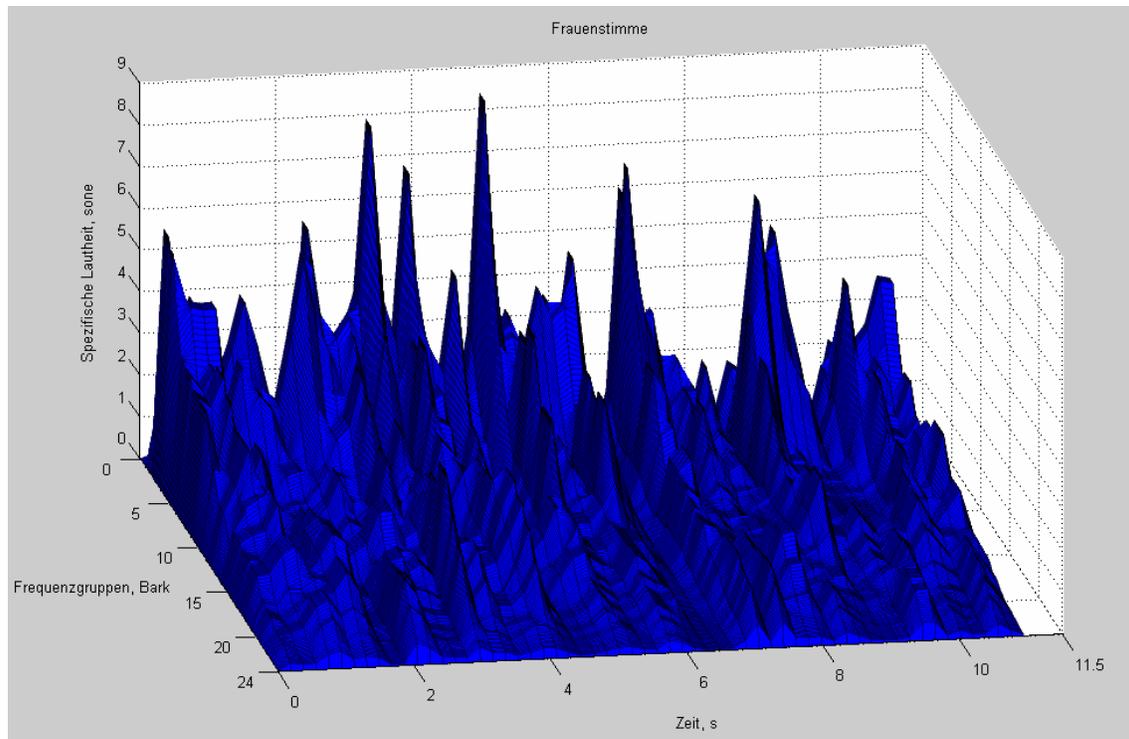


Abb. 41: Spezifische Lautheit über die Zeit der Frauenstimme

Bei dem Verlauf der spezifischen Lautheit über die Dauer des Sprachsignals kann man erkennen, dass in den hohen Regionen die Werte sehr gering sind. Dies hat mit dem Frequenzumfang der weiblichen Sprache zu tun. Die Spitzen liegen im Frequenzbereich von 2 bis 7 Bark.

- **Vergleichspaar 8: Rosa Rauschen – Every breath you take**

Der Titel „Every breath you take“ wird vom Sänger Sting gesungen. Die Auswertungen, welche über die Zeit den Mittelwert ausgeben, sind im Vergleich mit dem Hörversuch zu gering. Die Verfahren bei einer 95-ten Perzentilauswertung nach Zwicker und Glasberg-Moore liegen im Toleranzbereich der Versuchspersonen. Bei diesem Paarvergleich sind 80% der Probanden in einem Bereich zwischen 70% und 80%. Der Modalwert und der Medianwert liegen bei 80% und die Verteilung ist rechtssteil.

- **Vergleichspaar 9: Rosa Rauschen – Per me per sempre**

„Per me per sempre“ wird von Eros Ramazotti gesungen. Die Untermalung der Stimme erfolgt durch Klavier und Streicher. Die Ergebnisse der Methoden zur Lautheitsberechnung geben im Vergleich zum Hörversuch einen zu niedrigen Lautheitswert wieder. Die Stimme,

welche bei diesem Lied im Vordergrund steht, wird lauter empfunden als messtechnisch ermittelt. Die richtige Auswertung erfolgt nur durch das Verfahren von Stevens bei einem Perzentilwert von 95%. Bei diesem Paarvergleich ist die Verteilung linkssteil. Der Medianwert beträgt 150% und der Modalwert ist 140%. Das 25%-Quantil liegt bei 130% und das 75%-Quantil bei 170%.

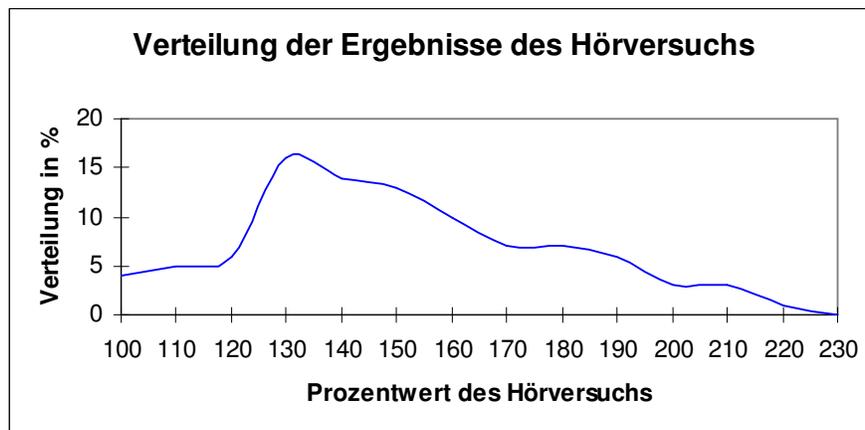


Abb. 42: Verteilung der Bewertung der Probanden des Paarvergleiches 9

Die meisten Bewertungen der Versuchspersonen liegen im Bereich zwischen 130% und 150%.

- **Vergleichspaar 10: Rosa Rauschen – Krainerhaus**

Der Werbespot über das Krainerhaus wird von einer männlichen Stimme gesprochen. Die objektiven Ergebnisse der Auswertungsverfahren liegen deutlich unter den Empfindungen der Versuchspersonen für das Sprachsignal. Das Verfahren nach Stevens, bei einer Auswertung nach dem 95-ten Perzentil, beurteilt die Empfindungen der Personen am Besten. Die meisten Bewertungen gab es zwischen 200% und 220%. Der Modalwert und Medienwert beträgt 200% und die Verteilungskurve des Hörversuchs ist rechtssteil. Das Toleranzband liegt bei 150% bis 220%. Die Stimme des Sprechers wird hier wieder lauter empfunden als messtechnisch berechnet. In der nächsten Abbildung wird wieder ersichtlich, dass die Dynamik der Sprache sehr groß ist.

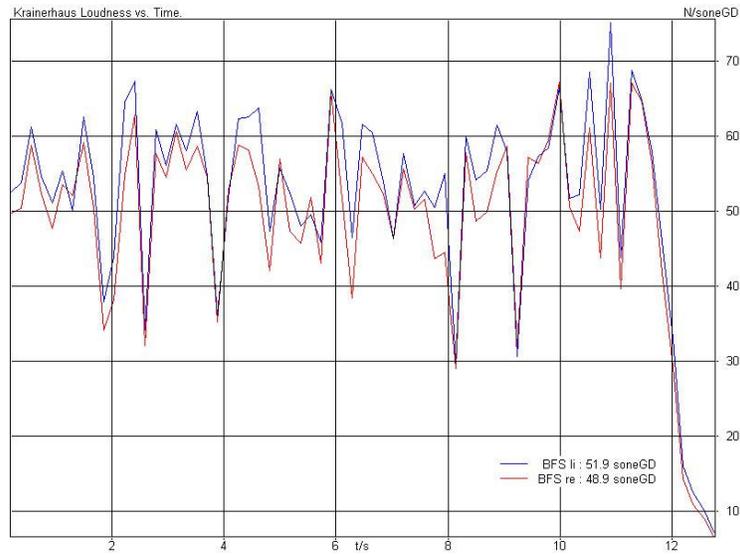


Abb. 43: Lautheit über die Zeit von Krainerhaus

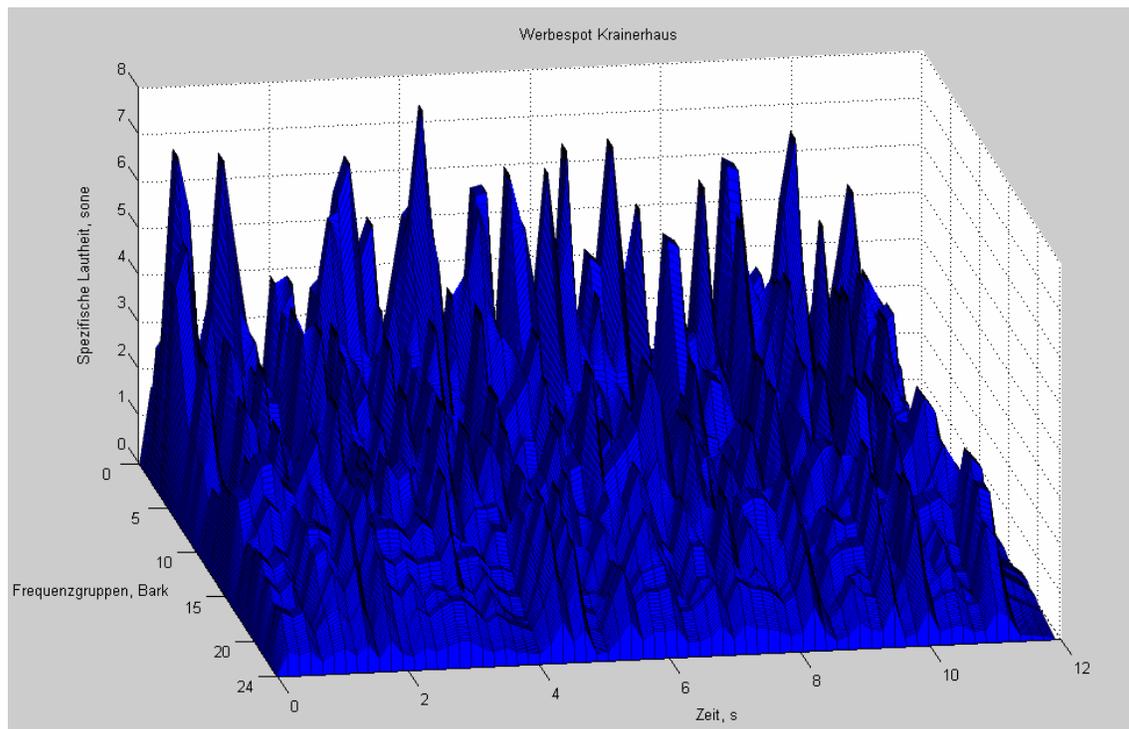


Abb. 44: Spezifische Lautheit über die Zeit von dem Werbespot Krainerhaus

Im Frequenzbereich von 2 bis 4 Bark sind die meisten Lautheitsspitzen zu detektieren. Die spezifische Lautheit fällt zum hohen Frequenzbereich hin ab.

- **Vergleichspaar 11: Rosa Rauschen – Volllastbeschleunigung aus dem 3.Gang**

Bei der Volllastbeschleunigung steigt die Lautheit vom Anfang bis zum Ende hin an. Die Versuchspersonen müssen nun entscheiden, ob sie das Geräusch mitteln oder ob die Probanden das Maximum zum Vergleich nehmen. Das beste Auswertungsverfahren bei diesem Paarvergleich ist der P₉₅ nach Stevens. Der Modalwert ist 100% und der Medianwert ist ebenfalls 100%. Das 25%-Quantil ist bei 75% und das 75%-Quantil ist bei 110%. Die Verteilung ist linkssteil. Der Verlauf der Lautheit über der Zeit zeigt, dass das Geräusch von 20 bis 35 sone kontinuierlich ansteigt.

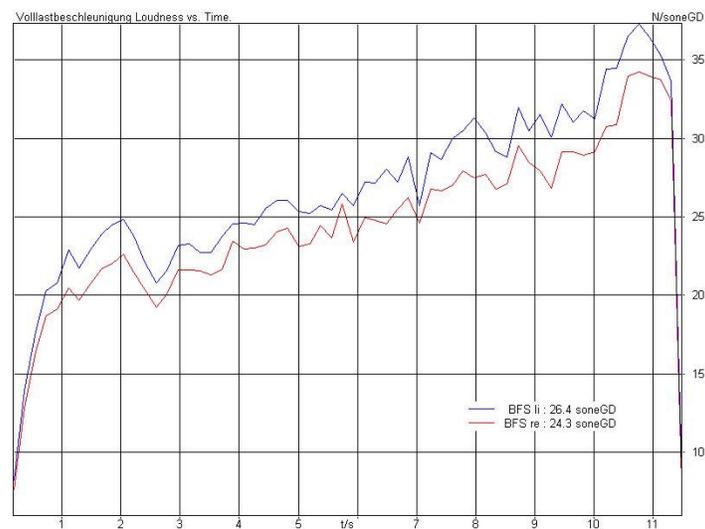


Abb. 45: Lautheit über die Zeit von Volllastbeschleunigung

Die spektrale Verteilung ist sehr schön in der nachfolgenden Abbildung zu sehen. Bei tiefen Frequenzen ist die spezifische Lautheit sehr stark ausgeprägt, ab einem Frequenzband von 8 Bark kann sie jedoch vernachlässigt werden.

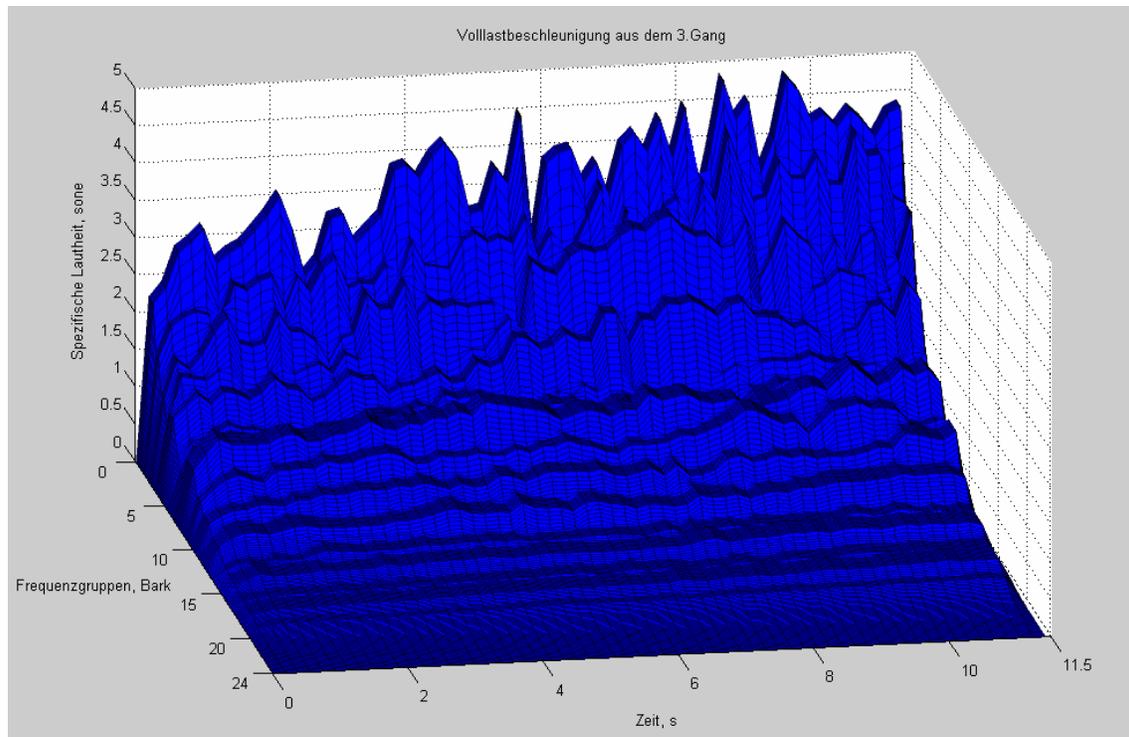


Abb. 46: Spezifische Lautheit über die Zeit bei einer Vollastbeschleunigung

- **Vergleichspaar 12: Rosa Rauschen – Fahrzeuginnenraumgeräusch
120 km/h**

Das Fahrzeuginnenraumgeräusch wurde bei einer Fahrt von 120 km/h aufgenommen. Keines der Auswertungsverfahren liegt im Toleranzbereich des Hörversuches, der sich von 40% bis 60% erstreckt. Die Auswertungen sind im Vergleich zu dem psychoakustischen Hörversuch alle zu niedrig. Der Modalwert und der Medianwert bei diesem Paarvergleich ist 50% und die Verteilung ist linkssteil.

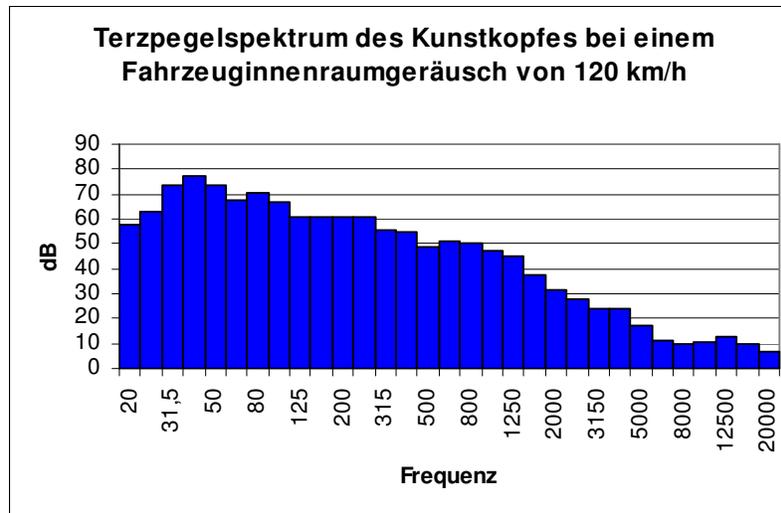


Abb. 47: Terzpegelspektrum eines Fahrzeuginnenraumgeräusches bei 120 km/h

Das Terzpegelspektrum sagt aus, dass bei diesem Geräusch die Frequenzen ab 1500 Hz keine Rolle mehr spielen. Die tiefen Frequenzen sind für dieses Geräusch ausschlaggebend. Für die Probanden des Hörversuchs ist es schwer ein Geräusch zu beurteilen, das um die Hälfte leiser ist als das Referenzgeräusch.

- **Vergleichspaar 13: Rosa Rauschen – 3 Oktavbandrauschen**

Das Oktavbandrauschen hat einen Frequenzbereich von 200 Hz bis 1600 Hz. Diese beiden Signale sind stationär und die Auswertungsverfahren von Zwicker und Stevens liefern sehr gute Ergebnisse. Man kann aus diesem Paarvergleich erkennen, dass sowohl bei arithmetischer Mittelung als auch bei dem 95-ten Perzentil die Auswertungsverfahren einen repräsentativen Wert ermitteln. Der Modalwert sowie auch der Medianwert bei diesem Beispiel ist 100% bei einer rechtssteilen Verteilung. Das Toleranzband ist von 90% bis 105%.

Die in der folgenden Abbildung dargestellte Verteilung zeigt, dass die meisten Versuchspersonen sich im Toleranzbereich befinden.

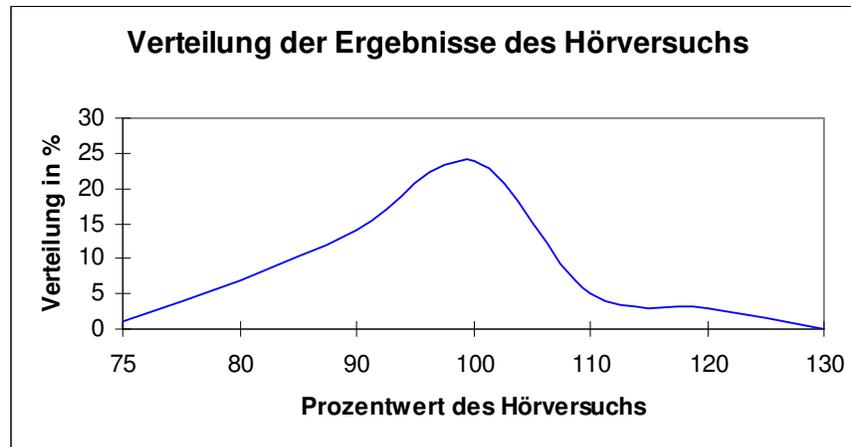


Abb. 48: Verteilung der Bewertung der Probanden des Paarvergleiches 13

- **Vergleichspaar 14: Per me per sempre – Frauenstimme**

Hier wird ein Musiktitel mit einem Sprachsignal verglichen. Der Musiktitel ist ein eher ruhigeres Lied mit Streichern und Klavier im Hintergrund. Die Empfindung der Probanden für die Frauenstimme ist höher als dies bei allen Auswertungsverfahren zu sehen ist. Als einziges Auswertungsverfahren liegt jenes von Stevens im Toleranzbereich des Hörversuches. Der Modalwert beträgt 100% und die Verteilung ist linkssteil. Das 25%-Quantil ist 100%, der Medianwert beträgt 120% und das 75%-Quantil ist 150%.

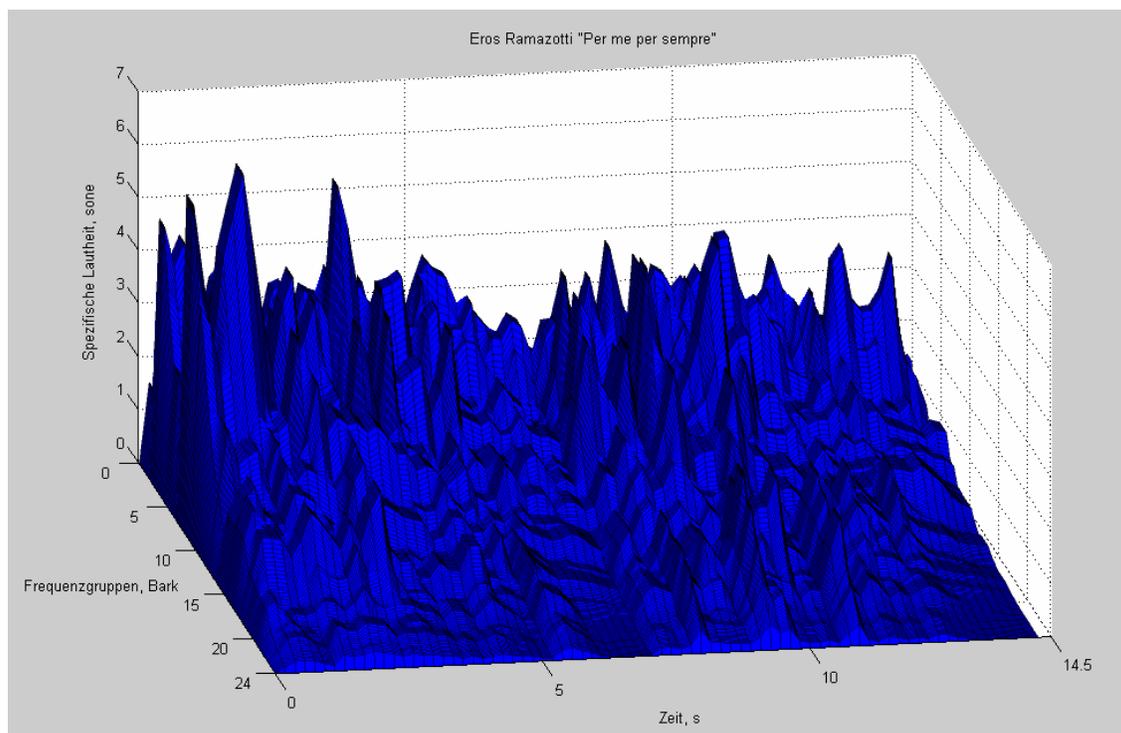


Abb. 49: Spezifische Lautheit über die Zeit des Musiktitels "Per me per sempre"

Ab einem Frequenzbereich von 3500 Hz nimmt die spezifische Lautheit sehr stark ab. Die Dynamik dieses Musiktitels ist auch relativ groß.

- **Vergleichspaar 15: Krainerhaus – Schwanensee op. 20 Valse von Tchaikovsky**

Hier wird die Stimme eines männlichen Sprechers gegenüber dem Ausschnitt eines klassischen Stückes gestellt. Die Erkenntnis aus den Ergebnissen des Hörversuchs ist hier, dass die messtechnischen Bewertungen kleiner ausfallen als die subjektiven Beurteilungen. Die Ursache dafür kann wiederum sein, dass es außerordentlich schwer ist ein Geräusch zu beurteilen, welches mehr als viermal so leise ist wie das Referenzsignal. Die Verteilung dieses Paarvergleiches ist linkssteil und hat einen Modalwert und Medianwert von 25%. Der Toleranzband liegt bei 25% bis 30%. Wie bereits bei vorangegangenen Paarvergleichen ist es sehr schwer zu beurteilen, ob ein Geräusch nur ein halb, ein Drittel oder ein Viertel so laut wie das Vergleichsgeräusch ist..

- **Vergleichspaar 16: Vollastbeschleunigung aus dem 3. Gang – Every breath you take**

Bei der Vollastbeschleunigung entsteht wieder das Problem, dass man als Proband nicht weiß, ob man nun die lauteste Stelle oder den Mittelwert über die Zeit bewerten soll. Das Verfahren von Zwicker liefert hier ein gutes Ergebnis. Der Medianwert und der Modalwert beträgt 100% und die Verteilung ist rechtssteil. Des 25%-Quantil ist bei 80% und das 75%-Quantil ist bei 100%.

- **Vergleichspaar 17: Fahrzeuginnenraumgeräusch 120 km/h – Whenever Wherever**

Bei diesem Vergleichspaar sind alle objektiven Auswertungen weit weg vom Ergebnis des Hörversuchs. Die einzige Ausnahme ist das Verfahren nach Stevens bei arithmetischer Mittelung. Das Ergebnis dieses Verfahrens liegt zwischen dem 25%-Quantil und dem Medianwert. Ein Grund liegt darin, dass die Beurteilung eines Schallsignals, welches viel lauter ist als das Referenzsignal, nicht genau zu bewerten ist. Der Modalwert beträgt hier 250% bei einer rechtssteilen Verteilung. Der Medianwert beträgt 220%. Der Toleranzbereich erstreckt sich von 200% bis 250%.

Die folgende Abbildung zeigt, dass ab einem Frequenzbereich von 19 Bark die spezifische Lautheit sinkt. Die Spitzen bei diesem Musikstück zeigen sich im Frequenzbereich um 6 Bark.

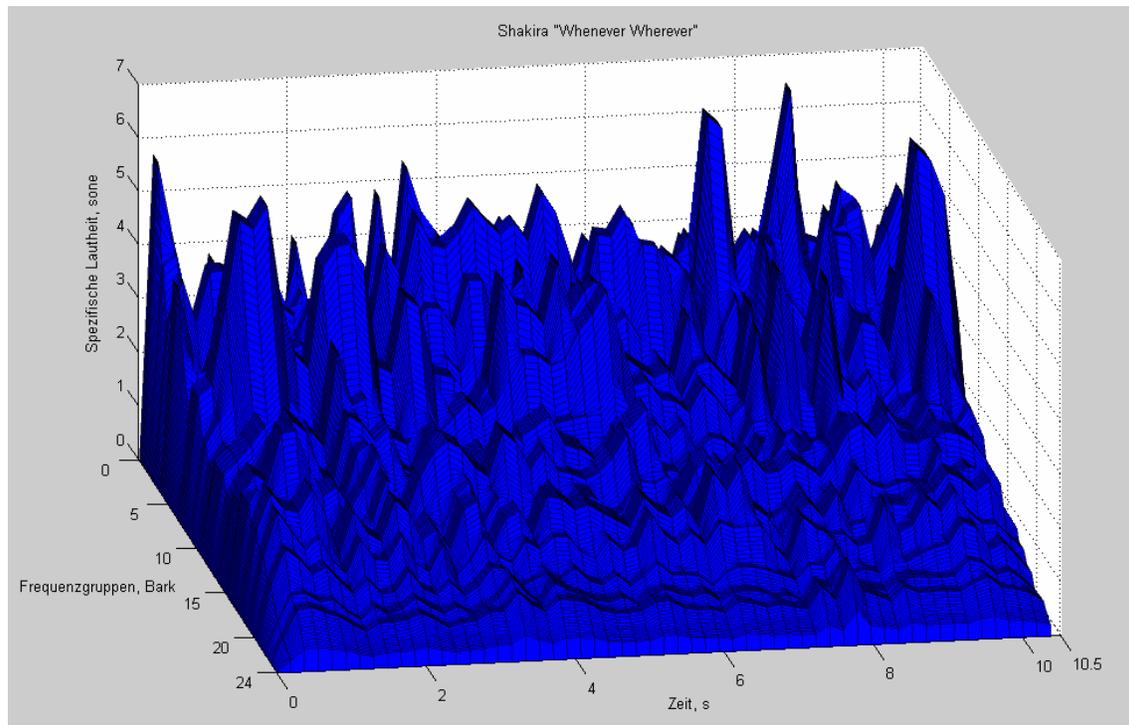


Abb. 50: Spezifische Lautheit über die Zeit des Musiktitels "Whenever Wherever"

- **Vergleichspaar 18:3 Oktavbandrauschen – Every breath you take**

Das letzte Paar des Hörversuches vergleicht nun ein Rauschsignal, welches bandbegrenzt ist, und den Musiktitel „Every breath you take“. Die meisten Methoden zur Lautheitsberechnung ergeben nach einer Auswertung des 95-ten Perzentilwertes ein sehr gutes Ergebnis. Das genaueste Verfahren bei diesem Paarvergleich ist jenes von Glasberg-Moore. Der Modalwert ist in diesem Beispiel 80% und die Verteilung ist linkssteil. Der Medianwert ist ebenfalls 80%. Der Toleranzbereich erstreckt sich von 70% bis 100%.

8.2 Alle vier Sitzpositionen besetzt

Bei den folgenden Vergleichen waren alle Sitzpositionen besetzt. Der Kunstkopf war am Fahrersitz befestigt.

Bei vollbesetztem Fahrzeug werden gewisse Frequenzen mehr gedämpft. Dies ist sehr deutlich in Abbildung 34 ersichtlich.

Bei den Auswertungsverfahren von Stevens, Robinson, Glasberg-Moore und Zwicker ergeben sich keine Unterschiede zwischen vollbesetztem Fahrzeug und mit nur einer Person besetztem Fahrzeug bei:

- Fahrzeuginnenraumgeräusch von 60 km/h
- Fahrzeuginnenraumgeräusch von 120 km/h
- Vollastbeschleunigung aus dem 3.Gang
- "Have you ever been in love" von Celine Dion

Dies ist darauf zurück zu führen, dass diese Geräusche bei mittleren bis hohen Frequenzen keine großen Amplituden besitzen.

8.3 Andere Sitzpositionen

8.3.1 Beifahrersitz

Die Ergebnisse der Auswertungsverfahren sind am Beifahrersitz 2 bis 4 sone leiser als am Fahrersitz. Die Ausnahme sind die Fahrzeuginnenraumgeräusche, welche nur unwesentlich leiser sind.

8.3.2 Sitzposition hinten links

Bei der Sitzposition hinten links sind die Auswertungsergebnisse um 3 bis 6 sone leiser als am Fahrersitz, außer die beiden Fahrzeuginnenraumgeräusche die ungefähr gleich laut sind.

8.3.3 Sitzposition hinten rechts

Die Unterschiede zwischen Fahrersitz und der Sitzposition hinten rechts betragen bis auf die Fahrzeuginnenraumgeräusche 2 bis 6 sone.

8.4 Zusammenfassen der Ergebnisse

Die Auswertungen der anderen Sitzpositionen ergeben das gleiche Bild wie jene des Fahrersitzes.

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen objektiven und subjektiven Messungen mit Hilfe des 25%-Quantilwertes als untere Grenze und des 75%-Quantilwertes als obere Grenze bei arithmetischer Mittelung der Auswertungsverfahren und Besetzung des Fahrersitzes:

Zwicker : 5

Glasberg-Moore : 1

Stevens : 6

Robinson : 1

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen objektiven und subjektiven Messungen mit Hilfe des 25%-Quantilwertes als untere Grenze und des 75%-Quantilwertes als obere Grenze bei arithmetischer Mittelung der Auswertungsverfahren und vollbesetztem Fahrzeug:

Zwicker : 2

Glasberg-Moore : 2

Stevens : 5

Robinson : 1

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen objektiven und subjektiven Messungen mit Hilfe des oben genannten Toleranzbereiches unter Berücksichtigung des 95-ten Perzentils bei Besetzung des Fahrersitzes:

Zwicker : 10

Glasberg-Moore : 6

Stevens : 7

Robinson : 2

Die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen objektiven und subjektiven Messungen mit Hilfe des Toleranzkorridors unter Berücksichtigung des 95-ten Perzentils bei vollbesetztem Fahrzeug:

Zwicker : 8

Glasberg-Moore : 5

Stevens : 7

Robinson : 2

Bei Berücksichtigung des 95-ten Perzentils sind die Übereinstimmungen erwartungsgemäß höher als jene bei arithmetischer Mittelung. Die Ergebnisse der obigen Auswertungen zeigen, dass bei vollbesetztem Fahrzeug weniger Übereinstimmungen vorhanden sind als bei der alleinigen Besetzung des Fahrersitzes. Dadurch, dass mehrere Personen im Fahrzeuginnenraum sitzen, werden gewisse Frequenzen gedämpft. Die Anzahl der Reflexionen nimmt wegen der zusätzlichen Fahrgäste ab.

Das Auswertungsverfahren von Zwicker liefert bei Einbeziehung des 95-ten Perzentilwertes die besten Ergebnisse. Die Beurteilung der Lautheit beruhend auf der Methode nach Stevens liegt knapp hinter dem Verfahren von Zwicker. Das Auswertungsverfahren nach Glasberg und Moore hat weniger Übereinstimmungen als die Verfahren von Stevens und Zwicker. Das Verfahren von Glasberg und Moore könnte noch bessere Ergebnisse liefern, wenn die Verdeckung mitberücksichtigt wird. Das Verfahren mit den wenigsten Übereinstimmungen ist jenes nach Robinson.

9 Diskussion

In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse der Diplomarbeit nochmals zusammenfassend dargestellt.

9.1 Erkenntnisse

Die Empfindungen des menschlichen Gehörs messtechnisch nachzuvollziehen, besonders im Hinblick auf sich zeitlich ändernde Signale, gestaltet sich sehr komplex. Jeder Mensch empfindet ein Schallsignal anders und deswegen muss man die Ergebnisse der Auswertungsverfahren für die Lautheit mit einem psychoakustischen Hörversuch vergleichen. Die Aufgabe aller Verfahren zur Bestimmung der Lautheit ist es, einen möglichst genauen Wert zu erhalten, welcher der menschlichen Lautheitsempfindung entspricht.

Genau genommen sind die momentanen Auswertungsverfahren wie Zwicker, Stevens, Robinson und Glasberg-Moore nur für stationäre Signale oder Signale ausgelegt, die sich nur langsam mit der Zeit ändern.

Bei Messsignalen, die mehr als doppelt oder halb so laut waren, gibt es eine sehr große Streuung. Das Problem ist, dass eine Beurteilung eines Geräusches, welches z.B. 3-mal so laut wie das Referenzgeräusch ist, für sehr viele Versuchspersonen schwierig ist. Genauso verhält es sich mit Geräuschen, die sehr viel leiser als das Referenzgeräusch sind. Die Geräusche, die in diesen Bereich fallen sind z.B. die Fahrzeuginnenraumgeräusche. Bei zukünftigen Hörversuchen wäre es daher sinnvoll Geräusche miteinander zu vergleichen, die sich im Bezug auf ihre Lautheit zwischen 80% und 150% des Referenzgeräusches bewegen.

Die Fahrzeuginnenraumgeräusche können nie durch die Lautsprecher des Audiosystems so wiedergegeben werden, wie sie während der Fahrt empfunden werden. Der Grund dafür sind die Abweichungen des Messsystems, mit denen die Fahrzeuginnenraumgeräusche aufgenommen wurden, von einem idealen Messsystem. Bei den Lautsprechern ergibt sich das gleiche Problem, es gibt keinen Lautsprecher, der über das gesamte Frequenzband den gleichen Lautstärkepegel halten kann.

9.2 Ausblick

Durch die Ergebnisse dieser Diplomarbeit kann man in Zukunft die verschiedenen Sitzpositionen eines Fahrzeuges, im Bezug auf die Lautheit, nicht nur bei stationären, sondern auch bei sich zeitlich ändernden Signalen bewerten. Es lassen sich außerdem auch verschiedene Baureihen miteinander vergleichen und entsprechende Veränderungen ableiten. Die beste Methode ist jene nach dem Verfahren von Zwicker bei einer Auswertung des 95-ten Perzentils.

Der DIN Normen Ausschuss Akustik, Lärminderung und Schwingungstechnik hat einen eigenen Arbeitskreis 'psychoakustische Messtechnik', der sich mit dem Thema instationäre Lautheit befasst. Es soll in den nächsten Jahren eine Erweiterung der DIN Norm 45631 (Zwicker Verfahren) im Bezug auf die Lautheitsbewertung zeitvarianter Schalle erfolgen.

Eine weitere Applikation, die speziell in der Automobilindustrie interessant wäre, ist ein Online-Analysesystem in Bezug auf die Lautheit zu entwickeln. Dadurch, dass die Radiosender alle Signale gleich aussteuern, gibt es im Fahrzeug das Problem, dass z.B. ein Moderator lauter empfunden wird als ein Musiksignal. Um diesem Phänomen entgegen zu wirken, könnte man durch die Entwicklung eines Analysesystems für die Lautheit bei Übertragung eines Sprachsignals den Lautstärkepegel absenken. Dadurch würde ein gleicher Höreindruck zwischen z.B. dem Moderator einer Radiosendung und dem vorher gespielten Musikstück entstehen. Um dieses Analysesystem wirkungsvoll zu gestalten, müsste wie vorher schon beschrieben ein psychoakustischer Hörversuch nur für Sprachsignale durchgeführt werden. Bei gewissen Sprachsignalen ist dies jedoch nicht erwünscht. (z.B. Verkehrsfunk)

9.3 Schlussfolgerungen

Die Ergebnisse dieser Diplomarbeit zeigen, dass die Auswertungsverfahren für stationäre Signale wie Rosa Rauschen oder 3 Oktavband Rauschen sehr genau mit den Auswertungen des psychoakustischen Hörversuchs übereinstimmen. Bei einer Auswertung, welche sich an dem 95-ten Perzentil der Lautheit orientiert, erhält man für Musik sehr große Übereinstimmungen mit den Versuchspersonen. Diese Auswertung ist deswegen sinnvoll, weil sich das Empfinden des menschlichen Gehörs am Spitzenwert eines Geräusches

orientiert. Das Verfahren von Zwicker, welches auch der DIN und ISO Norm entspricht, erzielte die besten Ergebnisse.

Bei allen Vergleichspaaren wurde festgestellt, dass die Lautheit bei reinen Sprachsignalen subjektiv lauter empfunden wird als durch die Auswertungsverfahren ermittelt werden kann. Die Änderungen der Lautheit über einen gewissen Zeitbereich sind bei Sprachsignalen sehr stark. Im Vergleich dazu sind die Änderungen der Musiksignale nicht so schnell. Eine weitere Auffälligkeit ist die hohe Dynamik der Sprache im Vergleich zu den Musiksignalen. Dies kann mit ein Grund sein, warum die Sprachsignale lauter empfunden werden, als durch die Auswertungsverfahren bestimmt.

Damit die Auswertungsverfahren bei reinen Sprachsignalen in den Bereich der Ergebnisse des Hörversuchs zu liegen kommen, wird ein Zuschlag von 15% auf die Ergebnisse der messtechnischen Auswertungen gegeben. Um für Sprachsignale eine exakte Aussage treffen zu können, müsste man die Lautheitsbewertungen von verschiedenen Sprechern und Sprecherinnen, die den gleichen Text sprechen, mit verschiedenen Stimmlagen und mit verschiedenen Lautstärken durch einen psychoakustischen Hörversuch ermitteln.

10 Literatur

1. A-Med World AG Aktiengesellschaft zur Darstellung von Medizin und Gesundheit im Internet
<http://www.m-ww.de>
2. Martina Kremer ars auditus Akustik-Gehör-Psychoakustik
http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus
3. S.Blatrix, CIRC, France
<http://www.iurc.montp.inserm.fr/cric/audition/english/ear/fear.htm>
4. Zwicker E., Psychoakustik, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1982
5. Zwicker E., Fastl H., Psychoacoustics Facts and Models, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1990
6. Glasberg B.R., Moore B.C.J., „A Revision of Zwicker’s Loudness Model” *acta acustica* Vol.82 1996
7. Glasberg B.R., Moore B.C.J., „Derivation of auditory filter shapes from notched-noise data” *Hear.Res.*47 1990
8. Pflüger M., „Methoden gehörbezogener Lautheitsbewertung“ Diplomarbeit, Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung TU Graz, September 1994
9. Pflüger M., „Modelle des peripheren Gehörs am Beispiel der menschlichen Lautheitsempfindung“ Dissertation, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik TU Graz, September 1997
10. Heckl M., Möller H.A., Taschenbuch der technischen Akustik, 1995
11. Schick A., Schallbewertung Grundlagen der Lärmforschung, 1990
12. Neumann J., Lärmmesspraxis, Kontakt und Studium Lexika 2.Auflage 1979
13. Günther B.C., Hansen K.H., Veit I. Technische Akustik Ausgewählte Kapitel, 2000
14. Henn H., Sinambari G.R., Fallen M., Ingenieurakustik, 2001
15. Aures W., „Berechnungsverfahren für den Wohlklang beliebiger Schallsignale” Dissertation TU München August 1984
16. Glasberg B.R., Moore B.C.J., Baer T., „A Model for the Prediction of Thresholds, Loudness and Partial Loudness” *J. Audio Eng. Soc.*, Vol 45, No. 4, 1997 April
17. Hellman R.P., Zwislocki J.J. „Monaural Loudness Summation of 1000 cps and Interaural Summation” *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35 1963
18. Houtgast T. „Lateral Suppression and Loudness Reduction of a Tone in noise“ *Acustica* Vol. 30 1974
19. Psychoakustik „Gehörbezogene Lärmbewertung“ ÖAL Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie
20. DIN 45631 „Berechnung des Lautstärkepegels unter der Lautheit aus dem Geräuschspektrum“, 1991
21. DIN 45630-2 „Grundlagen der Schallmessung“, 1967
22. ISO 1996-1 „Acoustics – Description, measurement and assessment of environmental noise”, 2003
23. ISO 226 „Normalkurven gleicher Lautstärke”, 2001
24. ISO 532 „Acoustics Method for calculating loudness level”,

-
25. Kauer S., „Entwicklung einer Multimedia-Lehranwendung zur Psychoakustik: Auditive Wahrnehmung und die Rolle kritischer Bandbreiten“ Magisterarbeit, Institut für Sprache und Kommunikation TU Berlin, 2002
 26. Moore B.C.J., "An introduction to the psychology of hearing" Academic press, London 1997

11 Anhang

11.1 Fragebögen

Psychoakustischer Hörversuch

Name : _____ Sitzposition : _____ Datum : _____

4-mal so leise : 25 halb so laut : 50 gleich laut : 100
doppelt so laut : 200 3-mal so laut : 300 4-mal so laut : 400

(minimale Abstufungsschritte 10 z.B. 190 wenn gerade nicht doppelt so laut)

	1. Geräusch	2. Geräusch
Titel 1 :	100	_____
Titel 2 :	100	_____
Titel 3 :	100	_____
Titel 4 :	100	_____
Titel 5 :	100	_____
Titel 6 :	100	_____
Titel 7 :	100	_____
Titel 8 :	100	_____
Titel 9 :	100	_____
Titel 10 :	100	_____
Titel 11 :	100	_____
Titel 12 :	100	_____
Titel 13 :	100	_____
Titel 14 :	100	_____
Titel 15 :	100	_____
Titel 16 :	100	_____
Titel 17 :	100	_____
Titel 18 :	100	_____

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!!

Ich möchte Sie abschließend bitten noch einige Fragen zu beantworten:

Name : _____

◆ Alter :	15 – 20	20 – 24	25 – 29	30 – 34
	35 – 39	40 – 44	45 – 49	50 – 54
	55 – 59	über 60		

◆ Geschlecht :	männlich	weiblich
----------------	----------	----------

◆ Führerschein :	ja	nein
------------------	----	------

◆ Fahrzeugbesitzer :	ja	nein
----------------------	----	------

◆ Haben Sie schon einmal einen psychoakustischen Hörversuch gemacht ?

ja		nein
----	--	------

◆ Ist es Ihnen leicht gefallen die Aufgabenstellung zu bewältigen?

Ja	- - - - -	Nein
----	-----------	------

◆ Sonstige Anmerkungen

11.2 Tabellen Hörversuch

	25% Quantil	Medianwert	75% Quantil
Paarvergleich 1	100	100	120
Paarvergleich 2	200	200	250
Paarvergleich 3	80	100	100
Paarvergleich 4	100	100	120
Paarvergleich 5	30	50	60
Paarvergleich 6	130	150	150
Paarvergleich 7	120	150	160
Paarvergleich 8	70	80	80
Paarvergleich 9	130	140	170
Paarvergleich 10	150	200	200
Paarvergleich 11	75	100	110
Paarvergleich 12	40	50	60
Paarvergleich 13	90	100	105
Paarvergleich 14	100	120	150
Paarvergleich 15	25	30	45
Paarvergleich 16	80	100	100
Paarvergleich 17	180	220	250
Paarvergleich 18	70	80	100

Tabelle 6: Ergebnis des psychoakustischen Hörversuches Fahrersitz für eine Sitzposition

	25% Quantil	Medianwert	75% Quantil
Paarvergleich 1	105	110	125
Paarvergleich 2	180	185	195
Paarvergleich 3	90	100	120
Paarvergleich 4	90	95	110
Paarvergleich 5	40	60	60
Paarvergleich 6	130	150	160
Paarvergleich 7	130	155	170
Paarvergleich 8	70	80	80
Paarvergleich 9	130	145	160
Paarvergleich 10	180	200	210
Paarvergleich 11	90	110	120
Paarvergleich 12	40	40	50
Paarvergleich 13	90	95	100
Paarvergleich 14	90	105	110
Paarvergleich 15	25	25	40
Paarvergleich 16	80	90	105
Paarvergleich 17	240	260	290
Paarvergleich 18	70	80	85

Tabelle 7: Ergebnis des psychoakustischen Hörversuches Fahrersitz für vollbesetztes Fahrzeug

11.3 Vergleichstabellen zwischen objektiven und subjektiven Ergebnissen

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	21,7	49,6	228	200	200	250
Glasberg-Moore	26,7	53,1	199	200	200	250
Stevens	18,2	37,9	209	200	200	250
Robinson	28,3	65,2	229	200	200	250
Zwicker P ₉₅	29,9	59,8	200	200	200	250
Glasberg-Moore P ₉₅	36,6	66,5	182	200	200	250
Stevens P ₉₅	26,4	48,2	182	200	200	250
Robinson P ₉₅	36,6	75,5	206	200	200	250

Tabelle 8: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 2

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	9,6	13,5	140	100	80	100
Glasberg-Moore	10,9	17,6	161	100	80	100
Stevens	9,9	10,7	107	100	80	100
Robinson	15,5	18,0	116	100	80	100
Zwicker P ₉₅	10,2	20,6	201	100	80	100
Glasberg-Moore P ₉₅	11,3	24,7	218	100	80	100
Stevens P ₉₅	10,5	17,8	170	100	80	100
Robinson P ₉₅	16,1	25,1	156	100	80	100

Tabelle 9: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 3

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	27,3	30,2	110	100	100	120
Glasberg-Moore	29,7	33,7	113	100	100	120
Stevens	21,5	21,3	99	100	100	120
Robinson	33,1	31,8	96	100	100	120
Zwicker P ₉₅	35,4	35,3	100	100	100	120
Glasberg-Moore P ₉₅	39,6	43,5	109	100	100	120
Stevens P ₉₅	29,5	26,4	89	100	100	120
Robinson P ₉₅	41,2	36,8	89	100	100	120

Tabelle 10: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 4

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	7,7	18	50	30	60
Glasberg-Moore	51,0	9,6	19	50	30	60
Stevens	29,4	6,3	21	50	30	60
Robinson	62,6	10,8	17	50	30	60
Zwicker P ₉₅	44,6	9,2	21	50	30	60
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	10,9	21	50	30	60
Stevens P ₉₅	30,3	7,7	26	50	30	60
Robinson P ₉₅	63,5	12,3	19	50	30	60

Tabelle 11: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 5

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	56,9	130	150	130	150
Glasberg-Moore	51,0	61,3	120	150	130	150
Stevens	29,4	39,7	134	150	130	150
Robinson	62,6	69,2	110	150	130	150
Zwicker P ₉₅	44,6	68,3	153	150	130	150
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	69,3	133	150	130	150
Stevens P ₉₅	30,3	51,2	169	150	130	150
Robinson P ₉₅	63,5	80,6	127	150	130	150

Tabelle 12: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 6

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	33,9	78	150	120	160
Glasberg-Moore	51,0	41,9	82	150	120	160
Stevens	29,4	29,6	100	150	120	160
Robinson	62,6	45,2	72	150	120	160
Zwicker P ₉₅	44,6	53,9	121	150	120	160
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	57,6	110	150	120	160
Stevens P ₉₅	30,3	49,6	164	150	120	160
Robinson P ₉₅	63,5	65,2	103	150	120	160

Tabelle 13: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 7

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	22,2	51	80	70	80
Glasberg-Moore	51,0	28,6	50	80	70	80
Stevens	29,4	18,0	61	80	70	80
Robinson	62,6	25,3	40	80	70	80
Zwicker P ₉₅	44,6	30,6	70	80	70	80
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	37,0	71	80	70	80
Stevens P ₉₅	30,3	26,3	86	80	70	80
Robinson P ₉₅	63,5	33,6	53	80	70	80

Tabelle 14: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 8

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	40,8	93	150	120	200
Glasberg-Moore	51,0	46,6	91	150	120	200
Stevens	29,4	27,9	95	150	120	200
Robinson	62,6	54,9	87	150	120	200
Zwicker P ₉₅	44,6	56,4	127	150	130	170
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	59,6	115	150	130	170
Stevens P ₉₅	30,3	43,6	143	150	130	170
Robinson P ₉₅	63,5	70,6	111	150	130	170

Tabelle 15: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 9

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	50,4	115	200	150	220
Glasberg-Moore	51,0	59,4	116	200	150	220
Stevens	29,4	38,5	130	200	150	220
Robinson	62,6	68,4	109	200	150	220
Zwicker P ₉₅	44,6	66,1	148	200	150	220
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	72,9	140	200	150	220
Stevens P ₉₅	30,3	54,2	178	200	150	220
Robinson P ₉₅	63,5	84,1	132	200	150	220

Tabelle 16: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 10

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	25,3	53	100	75	110
Glasberg-Moore	51,0	24,8	49	100	75	110
Stevens	29,4	21,1	71	100	75	110
Robinson	62,6	33,0	52	100	75	110
Zwicker P ₉₅	44,6	34,4	77	100	75	110
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	30,3	58	100	75	110
Stevens P ₉₅	30,3	30,3	100	100	75	110
Robinson P ₉₅	63,5	42,1	66	100	75	110

Tabelle 17: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 11

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	13,5	31	50	40	60
Glasberg-Moore	51,0	14,6	29	50	40	60
Stevens	29,4	18,0	61	50	40	60
Robinson	62,6	18,7	30	50	40	60
Zwicker P ₉₅	44,6	14,3	32	50	40	60
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	15,6	30	50	40	60
Stevens P ₉₅	30,3	12,1	39	50	40	60
Robinson P ₉₅	63,5	19,5	31	50	40	60

Tabelle 18: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 12

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	43,7	41,9	96	100	90	105
Glasberg-Moore	51,0	45,0	88	100	90	105
Stevens	29,4	29,4	100	100	90	105
Robinson	62,6	48,2	77	100	90	105
Zwicker P ₉₅	44,6	43,0	97	100	90	105
Glasberg-Moore P ₉₅	52,0	45,9	88	100	90	105
Stevens P ₉₅	30,3	30,6	100	100	90	105
Robinson P ₉₅	63,5	49,4	78	100	90	105

Tabelle 19: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 13

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	40,8	33,9	83	120	100	150
Glasberg-Moore	46,6	41,9	89	120	100	150
Stevens	27,9	29,6	106	120	100	150
Robinson	58,5	54,9	94	120	100	150
Zwicker P ₉₅	56,4	53,9	96	120	100	150
Glasberg-Moore P ₉₅	59,6	57,6	97	120	100	150
Stevens P ₉₅	43,6	49,6	137	120	100	150
Robinson P ₉₅	70,6	65,2	92	120	100	150

Tabelle 20: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 14

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	50,4	7,7	15	30	25	45
Glasberg-Moore	59,4	9,6	16	30	25	45
Stevens	38,5	6,3	16	30	25	45
Robinson	68,4	10,8	16	30	25	45
Zwicker P ₉₅	66,1	9,2	14	30	25	45
Glasberg-Moore P ₉₅	72,9	10,9	15	30	25	45
Stevens P ₉₅	54,2	7,7	14	30	25	45
Robinson P ₉₅	84,1	12,3	14	30	25	45

Tabelle 21: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 15

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	25,3	22,2	88	100	80	100
Glasberg-Moore	24,8	28,6	115	100	80	100
Stevens	21,1	18,0	85	100	80	100
Robinson	33,0	25,3	77	100	80	100
Zwicker P ₉₅	34,4	30,6	89	100	80	100
Glasberg-Moore P ₉₅	30,3	37,0	122	100	80	100
Stevens P ₉₅	30,3	26,3	86	100	80	100
Robinson P ₉₅	42,1	33,6	80	100	80	100

Tabelle 22: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 16

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	Sone	%	%	%	%
Zwicker	13,5	56,9	419	220	200	250
Glasberg-Moore	14,6	61,3	418	220	200	250
Stevens	18,0	39,7	220	220	200	250
Robinson	18,7	69,2	369	220	200	250
Zwicker P ₉₅	14,3	68,3	477	220	200	250
Glasberg-Moore P ₉₅	15,6	69,3	444	220	200	250
Stevens P ₉₅	12,1	51,2	423	220	200	250
Robinson P ₉₅	19,5	80,6	413	220	200	250

Tabelle 23: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 17

Verfahren	Geräusch 1	Geräusch 2	Verhältnis	MW	Q ₂₅	Q ₇₅
	Sone	sone	%	%	%	%
Zwicker	41,9	22,2	53	80	70	100
Glasberg-Moore	45,0	28,6	64	80	70	100
Stevens	29,4	18,0	61	80	70	100
Robinson	48,2	25,3	52	80	70	100
Zwicker P ₉₅	43,0	30,6	71	80	70	100
Glasberg-Moore P ₉₅	45,9	37,0	80	80	70	100
Stevens P ₉₅	30,6	26,3	87	80	70	100
Robinson P ₉₅	49,4	33,6	68	80	70	100

Tabelle 24: Gegenüberstellung objektiver und subjektiver Messung Paarvergleich 18