Masterarbeit

Name: Yin, Xiaoyan

Matrikel: 2824767

Ausgabe: 21.05.2012

Bestimmung der Frequenzgruppenbreite

Determination of the Critical Bandwith

Bei der Wahrnehmung von Schallsignalen spielt die Frequenzauflösung des

humanen auditiven Systems eine wichtige Rolle. Das menschliche Gehör fasst Frequenzbereiche zu Frequenzgruppen (critical bands) zusammen, innerhalb bzw. außerhalb derer das Gehör nach unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten arbeitet. Dies führt unter anderem zu einer unterschiedlichen Lautstärkeempfindung. So wird zum Beispiel ein komplexes Signal lauter empfunden, als ein schmalbandiges Signal, welches dieselbe Energie innerhalb der Bandbreite einer Frequenzgruppe besitzt. Die Frequenzgruppenbreite ist dabei von der Mittenfrequenz des jeweiligen Signals abhängig.

In der Arbeit soll ein Programm für hörpsychologische Untersuchungen entwickelt werden, mit dem der Benutzer für eine vorgegebene Mittenfrequenz experimentell die dazugehörige Frequenzgruppenbreite ermitteln kann.

Im Einzelnen sind folgende Teilaufgaben zu bearbeiten:

- Erörterung der hörpsycholgisch relevanten Teilaspekte, wie z. B. •
 - o Lautstärkewahrnehmung
 - Tonhöhenempfindung und 0
 - Auditive Wahrnehmung bei gleichzeitigen Auftreten mehrerer Schallereignisse 0
- Beschreibung des Begriffs der "Frequenzgruppe" und Darstellung der verschiedenen Möglichkeiten einer messtechnischen Bestimmung der Frequenzgruppenbreite.
- Entwicklung und Implementierung eines Programms zur Bestimmung der Frequenzgruppenbreite für mindestens eine Mittenfrequenz.
- Test der entwickelten Software durch Probanden und Vergleich der Ergebnisse mit den Angaben in der Literatur.

Betreuer: M. Sc. Jens Lindemann

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Wolff

Brandenburgische Technische Universität

Cottbus

Fakultät 3 Lehrstuhl Kommunikationstechnik

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Wolff Lehrstuhlinhaber T +49 (0)355 69 21 28 F +49 (0)355 69 21 50 E matthias.wolff@tu-cottbus.de www.tu-cottbus.de/kommunikationstechnik

Bestimmung der Frequenzgruppenbreite

Determination of the Critical Bandwith

Masterarbeit

Brandenburgische Technische Universit ä Cottbus Fakult ät 3 Maschinenbau, Elektrotechnik und Wirtschaftsingenieurwesen Lehrstuhl Kommunikationstechnik

> Xiaoyan Yin Matrikelnummer: 2824767

Betreuer: M. Sc. Jens Lindemann

Prof. Dr.-Ing. habil. Matthias Wolff

Cottbus, den 22.10.2012

Kurzfassung

Bestimmung der Frequenzgruppenbreite

Frequenzselektivität des Innenohrs ist eine wichtige Eigenschaft des auditiven Systems. Das menschliche Gehör fasst Frequenzbereiche zu Frequenzgruppen zusammen. Die Bark-Skala beschreibt die Einteilung des hörbaren Frequenzbereichs in Frequenzgruppen. Der menschliche hörbare Frequenzbereich wird 24 Frequenzgruppen eingeteilt. Die Verteilung der Frequenzgruppen basiert auf der Umsetzung von Schall in Nervenimpulse im Innenohr. Für jede Mittenfrequenz ist eine Frequenzgruppenbreite entspricht. Wenn die Frequenzen des Maskierers und maskierten Signals innerhalb der Frequenzgruppenbreite liegt, ist die Verdeckung stark. Wenn sie außerhalb der Frequenzgruppenbreite liegt, ist die Verdeckung schwach.

In dieser Masterarbeit soll eine Frequenzgruppenbereite für eine Mittenfrequenz mit der entwickelten Software bestimmt werden. Diese erfolgt zum einen anhand theoretischer Grundlagen, zum anderen über eine praktische Versuchsdurchführung. Dabei werden die Ergebnisse der Software analysiert und mit den Ergebnissen in der wissenschaftlichen Literatur verglichen.

Abstract

Determination of the Critical Bandwidth

The inner ear frequency selection is an important function of the human auditory system. The bandwidth of the human auditory system is closely linked with critical band. The human auditory range is divided into 24 critical bands. Bark-Skala describes how the critical bands are measured. The division of critical band is based on sound conversion of the inner ear nerve impulse. There is a corresponding critical band width for each center frequency. If the frequencies of the masking and masked signal are within the frequency group width, masking is strong. If it lies outside the frequency group width, masking is weak.

This paper designed one piece of software to determine the width of critical band. The software is based on a reliable theory, and the theory has been proved by the simulation experiment. Finally, from the result of this software we get a conclusion, the result from the modeling proposed in this paper is good agreement with the one from the literatures.

Inhaltsverzeichnis

1.	Ein	leitung		1					
2.	Die	Geh örphy	/siologie	3					
	2.1	2.1 Das äußere Ohr							
	2.2 Das Mittelohr								
	2.3	Das Innenohr							
		2.3.1 Das Cortische Organ							
		2.3.2	Die Haarzellen	7					
		2.3.3	Die Wandwellen	8					
3.	Нör	psycholog	çie	11					
	3.1	Schall	welle und Schallpegel	11					
	3.2	Tonh öhenempfindung und Lautst ärkewahrnehmung							
		3.2.1	Die menschliche Hörfläche	14					
		3.2.2	Tonh öhe	15					
		3.2.3	Lautst ärke	16					
	3.3	Auditive Wahrnehmung bei gleichzeitigen Auftreten mehrerer Schallereignisse							
		3.3.1	Zeitliche Verdeckung	19					
		3.3.2	Simultane Verdeckung	20					
4.	Die	Frequenz	gruppe und die Frequenzgruppenbreite	23					
4.1		Frequenz	zgruppenbegriff	24					
4.2		Messtechnischen Bestimmung der Frequenzgruppenbreite							
		4.2.1	Band Widening-Experiment	26					
		4.2.2	Bestimmung der Frequenzgruppenbreite an der Ruheh örschwelle	28					
		4.2.3	Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch die Lautheit komple	exer					
		Schallsig	gnale	28					
		4.2.4	Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch Maskierung in	der					
		Frequenz	zl ücke	29					
		4.2.5	Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch binaurale Verzögerung	der					
		Wahrneh	mung	31					
		4.2.6	Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch Nachweisbarkeit	von					
	Phasen änderungen								
5.	Ent	wicklung ı	und Ergebnisse des Programms	33					
5.1		Vorausse	tzung des Experiments	33					
5.2		Die Sim	ulation	34					
		5.2.1	Simulation des Band Widening-Experiments (Fletcher 1940)	35					
		5.2.2	Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrausc	chen					
		(Zwicker	r)	38					
		5.2.3	Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston (Zwicker)41					

	5.2.4	Vergleichung der Methoden und der Ergebnisse des Simulation	44			
5.3	Programm					
	5.3.1	Prinzipieller Versuchsablauf	46			
	5.3.2	Kalibrierung und Messung der Schallsignale	49			
	5.3.3	Programmentwicklung	51			
	5.3.4	Das Ergebnis und die Analyse				
6. Zu	sammenfas	ssung	60			
Abbildu	ngsverzeic	hnis	62			
Tabeller	nverzeichni	is	64			
Literatu	rverzeichni	is	65			
Anhang	1: Die E	Ergebnisse der Simulation des Band Widening-Experiments (Mitter	nfrequenz			
$f_{m} = 2$	kHz)		68			
Anhang	2: Die Erg	gebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke-Mithö	irschwelle			
von Sch	malbandra	uschen (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	69			
Anhang	3: Die Erg	gebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke-Mithö	irschwelle			
von Sin	uston (Mitt	tenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	70			
Anhang	4: Kalibrie	erung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)	71			
Anhang	5: Kalibrie	erung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	72			
Anhang	6: Die Erg	gebnisse der Programmierung (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	73			
Anhang	7: Die Erg	gebnisse der Programmierung (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)	74			
Eidessta	ttliche Erk	l ärung und Einverst ändnis zur Ver öffentlichung	75			

1. Einleitung

Durch das auditive System der Menschen aufgenommen, löst ein Schallsignal eine subjektive Wahrnehmung aus. Bei der Wahrnehmung spielt das Innenohr des humanen auditiven Systems eine wichtige Rolle. Das menschliche Gehör fasst Frequenzbereiche zu Frequenzgruppen (critical bands) zusammen, innerhalb bzw. außerhalb derer das Gehör nach unterschiedlichen Gesetzmäßigkeiten arbeitet. Die Bark-Skala beschreibt Einteilung des hörbaren die Frequenzbereichs in Frequenzgruppen. Der menschliche h örbare Frequenzbereich wird 24 Frequenzgruppen eingeteilt. Die Verteilung der Frequenzgruppen basiert auf der Umsetzung im Innenohr, von Schall in Nervenimpulse.

Diese Arbeit basiert auf wissenschaftlichen Untersuchungen und erfolgt anhand der theoretischen Grundlagen, dass für jede Mittenfrequenz eine bestimmte Frequenzgruppenbreite angegeben werden kann. Sie untersucht zum einen die Frequenzgruppenbreite und zum anderen eine praktische Versuchsdurchführung, um dies zu belegen. Das Ziel dieser Arbeit besteht darin die Abhängigkeit der Frequenzgruppenbreite und Mittenfrequenz zu untersuchen. Schließlich wird ein Programm für hörpsychologische Untersuchungen entwickelt, mit welchem die Versuchsperson die Frequenzgruppenbereite für eine Mittenfrequenz ermitteln kann.

Diese Arbeit umfasst Bereiche der Biologie (z. B. Anatomie), Physiologie des Gehörs, der Akustik (z. B. physikalische Darstellung von Schallereignissen) und der Psychologie (z. B. Beschreibung von Wahrnehmung).

Die Hauptteile dieser Arbeit stehen in engem Zusammenhang. In Kapitel 2 werden der Aufbau des Ohrs und die Funktionen von Außen-, Mittel- und Innenohr beschrieben. Ein Schwerpunkt ist hier die Funktion der Basilarmembran und die Theorie der Wandwelle. In Kapitel 3 wird die Theorie der Hörpsychologie erläutert und der Zusammenhang zwischen psychologischen Empfindungen und physikalischen Größen dar. Weiterhin wird die Abhängigkeit zwischen der Frequenz und der Amplitude für Schallsignal aufgezeigt. Es erläutert den Tonhöhenund Lautst ärkebegriff. Schlie ßlich werden die Phänomen der zeitlichen und simultanen Verdeckung sowie die Auditive Wahrnehmung bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Schallereignisse beschrieben. In Kapitel 4 werden viele Messtechnischen der Bestimmung der Frequenzgruppenbreite dargestellt. Das Band Widening-Experiment von Fletscher ist die erste Testmethode, mit der die Frequenzgruppenbreite bestimmt werden konnte. Auch viele andere Testmethoden werden in diesem Kapitel dargestellt, z.B. Bestimmung der Frequenzgruppenbreite an der Ruhehörschwelle, Bestimmung durch Maskierung in der Frequenzlücke, Bestimmung durch binaurales Hören.

Kapitel 5 ist der Hauptteil dieser Arbeit, welcher auf dem vorherigen Kapiteln basiert. Aus den in der Literatur beschriebenen Möglichkeiten zur messtechnischen Bestimmung der Frequenzgruppenbreite wurden geeignete Verfahren selber simuliert. Auf Basis der Ergebnisse dieser Simulationen wird eine Methode ausgewählt, welche programmtechnisch umgesetzt werden soll. Zum Thema wird die Planung theoretisch begründet, die Entwicklung skizziert und die entstandene Anwendung vorgestellt. Schließlich werden das Messsystem wird kalibriert, dabei mit der Literatur verglichen und analysiert.

2. Die Geh örphysiologie

Das Ohr ist Gehör- und Gleichgewichtsorgan und besteht aus 3 Teilen [Mul09]. Abb. 1 zeigt den Aufbau des Ohrs, das äußere Ohr (Ohrmuschel und Gehörgang), das Mittelohr (Paukenhöhle mit Trommelfell und Gehörknöchelchen), und das Innenohr (Schnecke und Bogengänge). Das menschliche Ohr spielt eine wichtige Rolle im auditiven System, welches komplexe auditive Signale handhabt. Es hat die Aufgabe die ankommenden Schalldrücke in elektrische Impulse umzuwandeln. Diese Prozesse finden haupts ächlich im Mittelohr und Innenohr statt.



Abb. 1: Die Anatomie des menschlichen Ohrs [Mul09]

2.1 Das äußere Ohr

Das äußere Ohr umfasst die Ohrmuschel und den äußeren Gehörgang. Verglichen mit dem Mittelohr und dem Innenohr spielen die Ohrmuschel und der äußere Gehörgang eine geringe Rolle. Die Ohrmuschel ist am Kopf sichtbarer Teil des Ohrs. Die menschliche Ohrmuschel dient der Aufnahme von den Schallwellen. Außer dieser Funktion kann der Mensch durch die unterschiedenen Laufzeiten der Schallwellen zu den Ohren die Schallquelle lokalisieren und die Schallrichtung bestimmen.

Der äußere Gehörgang ist leicht gebogen und hat eine Resonanzfrequenz zwischen 2 kHz und 4 kHz. Dieser Frequenzbereich ist der hauptsächliche Bereich der menschlichen Sprache und wird im Gehörgang auf das Doppelte verstärkt. Normalerweise ist die Länge des äußere Gehörgangs ca. 20 - 25 Millimetern und der

Durchmesser ist durchschnittlich 6 bis 8 Millimetern. Die Schallwellen, die das äußere Ohr erreichen, werden durch die Ohrmuschel gesammelt und gebündelt. Der Gehörgang hat eine Schutzfunktion und überträgt den Schallwellen auf das Trommelfell weiter [Str07].

2.2 Das Mittelohr

Das Mittelohr besteht aus der Paukenhöhle, dem Trommelfell und den Gehörknöchelchen. Die Trommelfellschwankungen werden über Gehörknöchelchen zum Innenohr weitergeleitet. Die Paukenhöhle ist mit Schleimhaut ausgekleidet. In der Paukenhöhle liegen die Gehörknöchelchen. Wie Abb. 2 zeigt, umfassen die Gehörknöchelchen den Hammer, den Amboss und den Steigbügel. Sie bilden eine gelenkige Verbindung zwischen dem Trommelfell und dem ovalen Fenster. Eine Seite des Hammers wächst am Trommelfell an und andere Seite ist mit dem Amboss verbunden. Weiter verbindet der Amboss den Hammer mit dem Steigbügel. Im ovalen Fenster befindet sich die Steigbügelplatte. Unter der Paukenhöhle liegt die Eustachische Röhre, die mit dem Nasenrachenraum verbinden ist. Mit dieser Röhre kann die Balance des Luftdrucks im Ohr geregelt werden [Str07].



Abb. 2: Die Gehörknächelchen [Str07]

Das Trommelfell, eine hauchd ünne Membran, liegt zwischen dem äußeren Gehörgang und der Paukenhöhle. Die Schallwellen erreichen das Ende des Gehörgangs und bringen das Trommelfell zum Schwingen. Das Vibrieren des Trommelfells bringt den Hammer in Bewegung, wodurch dann der Amboss und der Steigbügel in Bewegung gesetzt werden. Der Hammer und der Amboss wirken für die Schallleitung als ein Hebel, wobei das Verhältnis der Länge des Hammergriffs und langes Fortsatz des Amboss 1,3:1 ist, was den Schalldruck um das 1,3-fache verstärkt. Gleichzeitig wird durch die unterschiedliche Fläche der beiden Membranen (Trommelfell: 0,55 cm² und ovales Fenster: 0,032 cm²) der Schalldruck um das 17-fache verstärkt. Insgesamt wird der Druck ca. 20-fach von dem Trommelfell bis zum ovalen Fenster verstärkt.

2.3 Das Innenohr

Das Innenohr ist das Zentrum in dem die mechanischen Signale in elektrische Impulse konvertiert werden. Es besteht aus der Schnecke und 3 Bogengängen und besteht aus einem knöchernen und häutigen Anteil. Die 3 Bogengänge sind das Gleichgewichtsorgan und werden hier nicht detailliert und vollständig dargestellt. Die durch Schallwellen ausgelöste Bewegung von den Gehörknöchelchen im Bereich des ovalen Fensters wird entlang die Schnecke im Innenohr weiter überträgt [Gek10], [Str07].



Abb. 3: Die Anatomie der Schnecke und der Querschnitt [Bei02], [Pro08]

Abb. 3 (a) stellt den Aufbau der Schnecke (engl. Cochlea) dar. Die Größe der Schnecke ist mit der einer Erbse vergleichbar. Die Schnecke ist ein ausgehöhlter Knochen und ein wichtiger Teil des Gehörorgans, in der die mechanischen Schwingungen in elektrische Impulse umwandelt werden, und die Nervenimpulse entstehen. Die Schnecke hat 2,5 Windungen, ist insgesamt ca. 32 mm lang und wird zur Spitze hin immer dünner. An der Basis ist der Durchmesser ca. 7 mm, während er am oberen Ende nur 4 mm beträgt. Die ganze Schnecke ist in das Felsenbein gesetzt. Betrachtet man die Schnecke von innen, wird sie durch die Reissnersche Membran und die Basilarmembran in drei Kanäle geteilt, wie Abb. 3 (b) zeigt. In Abb. 3 (b) können wir sehen, dass die 3 Kanäle Scala vestibuli, Scala media und Scala tympani heißen. Die Scala media liegt in der Mitte, dar über ist die Scala vestibuli und darunter die Scala tympani. Die Spitze der Schnecke ist das Helicotrema und verbindet die Scala vestibuli mit der Scala tympani [Pro08], [Str07].



Abb. 4: L ängsschnitt der Schnecke [G ör06] OF: ovales Fenster, RF: rundes Fenster, SV: Scala vestibuli, ST: Scala tympani

Die 3 Kan äle der Schnecke sind mit den Flüssigkeiten gefüllt. Die Scala media ist mit der Endolymphe gefüllt, in der die Konzentration von Kalium (K^+) hoch ist. Die Scala vestibuli und Scala tympani beinhalten die Perilymphe, in der die Konzentration von Natrium (Na⁺) hoch ist. Zwischen der Perilymphe und der Endolymphe gibt es eine 85 mV Spannung, das heißt, dass zwischen Scala media und Scala vestibuli, Scala tympani die Spannung 85 mV betragt. Die Bewegung des Steigbügels drückt das Trommelfell auf das ovale Fenster und bringt die Endolymphe in der Scala vestibuli ins Schwingen (Abb. 4). Die Schwingung folgt der Scala vestibuli, durch das Helicotrema, weiter in die Scala tympani, bis zum runden Fenster [Gör06].

2.3.1 Das Cortische Organ



Abb. 5: Aufbau des Cortischen Organs [Pro08]

Zwischen Scala media und Scala tympani ist das Cortische Organ (vergleiche Abb. 4 mit Abb. 5), welches von der Tektorialmembran verdeckt wird, darunter liegt die Basilarmembran. Eine Seite von den beiden Membranen ist mit der Schneckenmitte verbunden, die anderen Seiten sind unabhängig voneinander. So können sich diese Seiten beider Membranen nach oben oder nach unten verschieben. Diese Bewegung wird Relativbewegung (Abb. 6) genannt [Lüd08].



Abb. 6: Relativbewegung der Basilarmembran und der Tektorialmembran [Eic11]

2.3.2 Die Haarzellen

Auf der Basilarmembran liegen die Haarzellen, eine Reihe innere Haarzellen und drei Reihen äußere Haarzellen (Abb. 7 (a)). Die Anzahl der inneren Haarzellen beträgt 3500 und die der äußeren Haarzellen 12000. Zwischen den äußeren Haarzellen und der Endolymphe ist ein 150 mV Potential existent, weil die äußeren Haarzellen ein negatives Potential haben [Arn05].



Abb. 7: Ordnung und Verbindungen der äußeren Haarzellen und der inneren Haarzellen (a) Die Ordnung von der äußere Haarzellen und der inneren Haarzellen [Arn05]

ÄHZ: äußere Haarzellen

IHZ: innere Haarzellen

(b) Quer- und Spitzenverbindungen zwischen der Stereozilien [Arn05]

Auf der Oberfläche der Haarzellen befinden sich ca. 80 - 100 Stereozilien, welche in Reihen angeordnet sind und deren Länge ca. 50 - 100 μ m beträgt. Die Länge dieser Stereozilien verk ürzt sich von außer nach innen. Die längsten Stereozilien der äußeren Haarzellen sind mit der Tektorialmembran verbunden. Zwischen jeden Stereozilien gibt es fadenartige Quer- und Spitzenverbindungen. Alle Stereozilien der Haarzellen werden von Endolymphe umspült (Abb. 7 (b)).

Die Schallwellen werden über das Trommelfell bis zu den Knöchelchen geleitet. Wenn sich der Steigbügel bewegt wird über das ovale Fenster die Perilymphe der Scala vestibuli in Schwingung versetzen. Die Schwingung ist entlang der Flüssigkeit ausbreitet. Gleichzeitig bewirken diese Schwingung in der Scala vestibuli Abwärtsund Aufwärtsbewegungen von Basilarmembran und die Tektoriamembran. Die Stereozilien der äußeren Haarzellen, deren längsten Sinneshärchen mit der Tectoriamembran verbunden sind, lenken nach außen und innen aus. Diese Auslenkung der äußeren Stereozilien führt zu einer Mitbewegung der Endolymphe in Scala media. So nehmen die Stereozilien die inneren Haarzellen mit. Die inneren Haarzellen und die äußeren Haarzellen haben nicht nur eine unterschiedliche Ordnung, sondern auch unterschiedliche hauptsächliche Funktion. Die beide sind mit 30000 Fasern verbunden (Abb. 8). Die inneren Haarzellen sind zu 90% durch afferente Innervierung und schwache efferente Innervierung mit dem Nervensystem verbunden. Die äußeren Haarzellen dagegen über 10% afferenten Innervierung und starke efferente Innervierung. Durch die Verbindung mit den unterschiedlichen Nerven, sind bez üglich der Schallverarbeitung die äußeren Haarzellen empfindlicher als die inneren Haarzellen.

Die Auslenkung nach außen und innen von den Stereozilien öffnet und schließt die Ionenkan äle der Haarzellen. Das löst eine Änderung des Potentials der Haarzellen aus, wodurch bioelektrischen Impulse generiert werden, die über den Hörnerv zu den Hörzentren geleitet werden. Die Schwingung wird wegen der Bewegung der Haarzellen hundertfach verst ärkt.



Abb. 8: Die inneren Haarzellen und die äußere Haarzellen [Pro08]

2.3.3 Die Wandwellen

Die Schwingungen werden über Außen- und Mittelohr in das Innenohr übertragen. Wegen der Schwingungen der Flüssigkeiten (Perilymphe) in die Scala vestibuli werden die Abwärts- und Aufwärtsbewegungen der cochleären Trennwand (Reissnersche Membran und Basilarmembran) ausgelöst. Diese Schwingung auf der Basilarmembran wird als Wandwelle bezeichnet. Sie entsteht in der Endolymphe am ovalen Fenster und breitet die Schwingung in Form einer Wandwelle in Richtung des Helicotrema aus [Bei02].

Die Frequenz des Schallsignals wird im Innenohr verteilt und selektiert, weil unterschiedliche Frequenzen eine unterschiedliche Ausbreitungsentfernung der Wandwellen auslösen. Alle Wandwellen starten vom ovalen Fenster. Je niedriger die Frequenz ist, desto weiter breitet sich die Wanderwelle vom ovalen Fenster aus. Die Basilarmembran, die in der Nähe des ovalen Fensters ist, akzeptiert die hohe Frequenz und tiefe Frequenzen an ihrem Apex (Abb. 9). Die Erklärung ist, dass die Basilarmembran die Schallenergie absorbiert. Die mechanischen Eigenschaften der Basilarmembran verändern sich entlang dieser von dem ovalen Fenstern bis zum Helicotrema. Nahe dem ovalen Fenster ist die Basilarmembran schmal und steif, am Apex ist breit und biegsam. Ein bestimmter Bereich der Basilarmembran absorbiert ein bestimmtes Schallsignal mit der bestimmten Frequenz besonders gut. Die Welle wandert entlang der Basilarmembran, die anfangs kaum schwingt. Die Welle verliert mit größerer Distanz immer mehr Energie. Die Welle wandert weiter und mehr Energie wird absorbiert, wodurch die Amplitude der Wandwelle steigt bis auf ein Maximum. Die Amplitude fällt plätzlich ab. Die Haarzellen und Nerven in diesem Bereich werden maximal stimuliert. Eine bestimmte Wahrnehmung der Menschen wird im zentralen auditiven System ausgelöst.

Frequenz - Orts - Transformation: Auf der Basilarmembran findet also eine Frequenz - Orts - Transformation statt, welche die Fähigkeit des Innenohrs zur Frequenzanalyse erklärt. Die Energie von Signalkomponenten unterschiedlicher Frequenz wird auf unterschiedliche Orte der Basilarmembran übertragen und erregt die dort befindlichen Haarzellen [Wer99].



Abb. 9: Wanderwellen verschiedener Frequenz [Sch12]

Abb. 9 zeigt die Fähigkeit der Schnecke, wie die Frequenz unterschieden und

selektiert wird. Töne verschiedener Frequenz erregen unterschiedliche örtliche Bereiche der Basilarmembran und das Maximum hängt von der Frequenz ab. Ist die Frequenz niedrig, z. B. 50 Hz, wird diese weiter als 200 Hz in Richtung Apex ausgebreitet. Wenn Frequenz 1600 Hz ist, fällt die Amplitude der Wandwelle sehr stark ab, wodurch das Maximum in der Nähe des ovalen Fensters erscheint.

Vom ovalen Fenster bis Helicotrema liegen die zugeordneten Frequenzen der Wandwellen zwischen 16 kHz und 16 Hz und entsprechen dem menschlichen Hörbereich. Frequenz größer als 16 kHz oder niedriger als 16 Hz haben keine Haarzellen auf der Basilarmembran, so dass wir die Frequenz außerhalb diese Bereich nicht hören können [Ter98].

3. Hörpsychologie

Wie in Kapitel 2 beschrieben wurde, wird durch das auditive System des Menschen eine subjektive Schallwahrnehmung ausgelöst. Um eine subjektive Wahrnehmung konkret auszudrücken, hat G.T. Fechner (1801 - 1887) die Theorie der Hörpsychologie (Psychophysik) begründet. Die Hörpsychologie ist ein Fach, das die subjektive Wahrnehmung der Menschen untersucht, und mit Hilfe der Mathematik beschreibt. In diesem Kapital werden die Schallwelle und die hörpsychologisch relevanten Teilaspekte z. B. die Lautstärkewahrnehmung, die Tonhöhenempfindung und die auditive Wahrnehmung bei gleichzeitigem Auftreten mehrerer Schallereignisse beschrieben [Ern04].

3.1 Schallwelle und Schallpegel

In schallleitenden Medien, wie z. B. Luft, Wasser, Gestein oder Metall, breitet sich der Schall von einer Schallquelle (einem Lautsprecher, einer Klingel oder der menschlichen Stimme) als eine Welle aus. Um die Zusammenhänge zwischen der subjektiven Wahrnehmung und der Schallsignale zu beschreiben, müssen die Wahrnehmungen gemessen und ausgewertet durch eine mathematische Form werden. Die Schallwelle hat folgende grundlegende Eigenschaften [Krü06]:

$$y(t) = A \cdot \sin(\omega t) \tag{1}$$

mit

$$\omega = 2\pi f, f = \frac{1}{T}, T = \frac{\lambda}{\vartheta}$$

A: Amplitude
ω: Kreisfrequenz
t: Zeit
f: Frequenz
T: Periodendauer oder Schwingungsdauer
λ: Wellenlänge
ϑ: Ausbreitungsgeschwindigkeit

Benachbarte Molek üle eines Mediums werden durch Schallsignale aus ihrer Ruhelage bewegt. Der Bewegungsimpuls setzt sich durch das Medium fort. Die Schallgeschwindigkeit in der Luft ist 343m/s, wenn die Temperatur 20°C beträgt. Ob Schallereignisse wahrnehmbar sind oder nicht, hängt von der Frequenz und der Amplitude der Welle ab. Ein Schallereignis wird durch den Rezeptor bzw. Haarzellen empfangen. Die Haarzellen auf der Basilarmembran ändern ihre Reaktion in Abhängig von der Frequenz der ankommenden Schallwelle, wodurch die individuelle Empfindung entsteht. Die Amplitude wird als die Lautstärke des Signals beschrieben, der Schallfrequenz wird als Tonhöhe dargestellt (siehe Abschnitte 3.2) [Ern04]. Weil die Schallschwingungen die Luft verdichtet und verdünnt, wird die Druck änderung ausgelöst. Wenn die Umgebung ruhig ist, trägt das Trommelfell einen statischen Luftdruck p_{Luft} . Wenn der Schall das Ohr erreicht, werden die Druckschwankungen vom Trommelfell aufgefangen, da sich der gesamte Luftdruck ändert. Die relative Luftdruck änderung wird als Schalldruck p (engl. pressure) bezeichnet [Gör06]. Die Einheit ist zu Ehren des Mathematikers Blaise Pascal (1623 - 1662) das Pascal, wobei 1 Pa (Pascal) 1 N/m² entspricht. Die Größe des Schalldrucks ist die Differenz zwischen dem gesamten Luftdruck und dem statischen Luftdruck, wie Formel 2 zeigt [Gör06]. Normalerweise ist der statische Luftdruck mit ca. 101 kPa (Pascal) viel größer als der Schalldruck [Arn05].

$$p_{ges} = p + p_{Luft} \tag{2}$$

p_{ges}: gesamter Luftdruck [Pa (Pascal)]
p: Schalldruck [Pa (Pascal)]
p_{Luft}: statischer Luftdruck [Pa (Pascal)]

Das Gehör kann enorme Druckunterschiede verarbeiten. Der kleinste hörbare Schalldruck des Menschen ist bei 1 kHz, beträgt $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (Pascal). Dies wurde auch als Bezugsschalldruck P₀ Anfang des 20. Jahrhunderts festgelegt. Der menschliche Schmerzschalldruck ist ca. 20 Pa (Pascal) . Da keine absoluten Sinnesreize gegeben werden, können wir nur mit näherungsweise Reizverhältnisse für die konstante Empfindung beschreiben. Die logarithmische Skalierung wird in der Akustik häufig angewandt, um die Sinneswahrnehmung näherungsweise darzustellen. Diese Umrechnung wird als Weber-Fechner`sches Gesetz (nach Ernst Heinrich Weber und Gustav Theodor Fechner) bezeichnet. Das Verhältnis zweier Messgrößen der Reize wird logarithmiert und dieses Ergebnis wird Pegel (engl. Level) genannt. Pegel wurden als der "Pseudo-Einheit" Dezibel (dB) bezeichnet [Gör06]. Egal ob der Reiz Schalldruck, Intensität oder Leistung, elektrische Spannung oder elektrische Leistung nicht wichtig ist, verschwinden die Einheiten nach dem dividieren zweier Physikalischer Größen. Das Prinzip ist wie bei einem digitalen Signal und kann nach der Formel 3 berechnet werden [Eic06], [Hop12]:

$$L = 10 \cdot \log \frac{x_{\text{eff}}^2}{\hat{x}^2} = 20 \cdot \log \frac{x_{\text{eff}}}{\hat{x}}$$
(3)

L: relativer Pegel [dB] x_{eff}: Effektiver Signalwert

x: Bezugssignalwert

Relativer Pegel und absoluter Pegel (engl. relative level und absolute level): Das Verhältnis zweier beliebiger Werte wird relativer Pegel genannt. Wenn ein Referenzwert bzw. das Bezugssignal definiert wird, wird das Verhältnis als absoluter Pegel bezeichnet [Gör06].

Die Größe des Schalldrucks kann auch als akustischer Pegel ausgedrückt werden. Um

die Stärke eines Schallereignisses zu beschreiben, wird der Schalldruckpegel L_p (SPL, engl. sound pressure level) definiert, der auch einfach Schallpegel genannt wird [Gär06].

$$L_{p} = 20 \cdot \log \frac{p_{eff}}{p_{0}} \tag{4}$$

$$\begin{split} &L_p: absoluter \ Schalldruckpegel \ [dB] \\ &p_{eff}: Effektiver \ Schalldruck \ [Pa (Pascal)] \\ &p_0 = 2 \cdot 10^{-5} P_a \ ist \ Bezugsschalldruck \ [Pa (Pascal)] \end{split}$$

Der Schalldruckpegel L_p ist das logarithmische Verhältnis des Werts des effektiven Schalldrucks p zum Wert des Bezugsschalldrucks p_0 . 1 Dezibel ist dabei die kleinste wahrnehmbare Lautst ärken änderung. Tabelle 1 gibt einige Beispiele typischer Werte des absoluten Schalldruckpegels.

Hörschwelle bei 2 kHz	0 dB	Standardpegel ($p = 1 Pa (Paskal)$)	94 dB
Extreme Stille	10 dB	Club, Popkonzert	110 dB
Stille	20 dB	Grenze der Erträglichkeit	120 dB
Leise Umgebungsger äusche	30 dB	Schmerzgrenze	135 dB
Leise Unterhaltung	40 dB	Bassdrum am Trommelfell	150 dB
Laute Unterhaltung	60 dB	Spielzeuggewehr (50 cm)	155 dB
Kino (Normalpegel)	85 dB	Knallk örper (2 m)	166 dB

Tabelle 1: Typische Werte für den absoluten Schalldruckpegel [G ör06]

Der kleinste hörbare Schalldruckpegel des Menschen ist 0 dB bei 2 kHz, der die Hörschwelle genannt wird. Der menschliche Schmerzschalldruck ist ca. 20 P_a , an welcher der Schalldruckpegel 120 dB ist. Außer dem oben erwähnten Schalldruck, Schalldruckpegel gibt es noch einige wichtige Definitionen:

Schallleistungspegel (engl. Power level): Der Schallleistungspegel wird benutzt, um die ausgestrahlt Energie einer Schallquelle zu beschreiben [Krü06], [Lüd08].

$$L_{\rm w} = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \tag{5}$$

L_w: Schallleistungspegel [dB]

P: Schallleistung in Watt [W]

 P_0 : Referenzleistung [$P_0 = 10^{-12}$ W]

Schallintensit ätspegel (engl. Intensity level): Der Schallintensit ätspegel L_J (W/m²) wird auf die gleiche Weise wie Schallleistungspegel berechnet. Er beschreibt die Schallenergie pro Fläche in einem Schallfeld. Die Referenzintensit ät ist $J_0 = 10^{-12}$ W/m² [Krü06].

3.2 Tonh öhenempfindung und Lautst ärkewahrnehmung

Der subjektive Eindruck eines Schallereignisses wird normalerweise mit Tonhöhe, Lautst ärke und Klangfarbe dargestellt. Diese Empfindung hängt von der Eigenschaft der Schallwelle bzw. Amplitude, Frequenz und Spektrum ab. Tabelle 2 zeigt den Zusammenhang zwischen psychologischen und physikalischen Größen. Um die Zusammenhang zu erklären, werden zuerst drei grundlegende Definitionen dargestellt [Ern04], [Zür04]:

- Ton: Ton ist ein Schallereignis, das nur eine Frequenz des Hörbereiches enthält (z.B. 2 kHz Sinuston) [Eic11].
- > Ger äusch: Ger äusche bestehen aus Superposition unendlicher viele Töne.

Empfindung	hängt ab von:
Tonheit	Frequenz
Lautst ärke/Lautheit	Amplitude
Klangfarbe	Spektrum

Tabelle 2: Zusammenhang zwischen psychologischen und physikalischen Größen [G ör06]

Eigenschaft der Schallwelle (physikalischen Größen):

- Frequenz: Frequenz ist die Anzahl von Schwingungen der Schallwelle in einer Sekunde. Einheit ist Hertz (Hz).
- Amplitude: Amplitude ist die größte Auslenkung aus der Ruhelage. Je größer die Amplitude, desto lauter wird der Ton wahrgenommen.
- Spektrum: Das Spektrum stellt grafisch ein akustisches Signal in die einzelnen Teilfrequenzen dar. Weißes Rauschen besitzt ein kontinuierliches Spektrum.

In den folgenden Abschnitten werden die Zusammenhänge zwischen den psychologischen Empfindung (Tonhöhe, Lautstärke und Klangfarbe) und den Eigenschaft der Schallwelle detailliert dargestellt.

3.2.1 Die menschliche Hörfläche

Das menschliche Ohr kann nicht jedes Schallsignal in dem ganzen Frequenzbereich hören. Für den jungen gesunden Menschen liegt der Hörbereich zwischen 16 Hz (16 Hz bis 21 Hz) und 16 kHz. Die Frequenz über 16 kHz (Ultraschall) oder unter 16 Hz (Infraschall) können nicht gehört werden. Dieser menschliche Hörbereich ist ein durchschnittlicher Wert und kann sich mit zunehmendem Alter verringern [Köh10].

Der Frequenzbereich und Pegelbereich von Schall, die vom menschlichen Gehör

wahrgenommen werden kann, wird als Hörfläche bezeichnet. Wie in Abb. 10 gezeigt hat, ist die menschliche Schmerzgrenze (engl. Threshold of pain) bei einem Schalldruckpegel (SPL) von 120 dB. Bei der Schmerzgrenze wird ein stechender Schmerz empfunden. Normalerweise bekommt der Mensch sehr unangenehme Empfindung, wenn der Schalldruckpegel (SPL) 120 dB überschreitet, und es kann zu dauerhaften Hörschäden führen. Im Mittel ist der Bereich der Sprachwahrnehmbarkeit und der Musikwahrnehmbarkeit. Darunter liegt die Ruhehörschwelle (engl. Hearing threshold). Die durchschnittliche Hörschwelle bei 2 kHz wird durch den Referenzschalldruck festgelegt und liegt bei einem Schalldruckpegel von 0 dB (siehe Formel 4). In Abb. 10 ist es sichtlich, dass die Ruhehörschwelle stark von der Frequenz abhängig ist. Links von der Hörfläche liegen der Infraschall und rechts der Ultraschall.



Abb. 10: Hörfläche des Menschen [Gör06]

3.2.2 Tonhöhe

Die Tonhöhenempfindung wird durch die Tonheit dargestellt. Tonheit ist eine Empfindungsgröße und Die Maßeinheit ist mel.

Tonheit (engl. pitch): Die Tonheit beschreibt die subjektive menschliche Empfindung des Tons, der hoch oder tief ist. Für einen Ton gilt je größer die Frequenz des Schallsignals ist, desto höher wird die Tonheit ist. Der Zusammenhang zwischen der Tonheit und der Frequenz ist nichtlinear [Eic06], [Gör06].

Abb. 11 zeigt die Abhängigkeit zwischen Frequenz und Tonheit. Die Wahrnehmung der Tonheit ist eng verbunden mit der Frequenzselektion der Basilarmembran. Die

wahrgenommene Tonheit hängt ann ähernd logarithmisch von der Frequenz ab. Für hohe Frequenzen ist es eine gute Näherung. Bei niedrigen Frequenzen gibt es größere Abweichungen. In Abb. 11 können wir erhalten, dass die maximale Tonheit ist 2400 mel für 16 kHz [Gel09].



Abb. 11: die Abhängigkeit zwischen Frequenz und Tonhöhe [Zwi07]

3.2.3 Lautstärke

Ob ein Schallereignis wahrgenommen wird oder nicht hängt nicht nur von der Frequenz, sondern auch von der Amplitude und dem Frequenzspektrum der Welle ab. Je größer die Amplitude ist, desto lauter sind die Schallereignisse. In folgenden Abschnitten werden Lautheit und Lautstärke dargestellt. Diese Definitionen haben in der Psychoakustik größte Bedeutung.

Lautst ärke (L_N in phon, engl. loudness level): Lautst ärke ist ein Vergleichsmaß, welches dem Schalldruckpegel eines 1 kHz-Tons entspricht und jede Lautst ärke als gleich laut empfunden wird.

Abb. 12 zeigt die Kurven Gleiche Lautstärke nach Eberhard Zwicker (1924-1990). Auf gleicher Kurve haben die Signale gleicher Lautstärke und jede Kurve hat eine bestimmte phon-Zahl. In Abb. 12 können z. B. 3 phon, 20 phon, 100 phon usw. gesehen werden. Das Signal liegt auf einer Kurve und hat unterschiedliche Frequenz, aber diese Signale werden gleich subjektiv laut empfunden, wie ein 1 kHz-Ton [Cla03].

Isophone: Die Schallsignale haben unterschiedliche Frequenz, aber haben die gleiche Lautst ärke zu empfinden.



Schmerzgrenzen und Hörschwellen sind Frequenz abhängig. Die Schmerzgrenze hat Abhängig der Frequenz eine geringe Änderung, aber die Hörschwelle hat eine größere Änderung, wenn die Frequenz sich ändert. Wenn die Lautstärke klein ist, ist die Verringerung der Empfindlich in den niedrigen Frequenzbereich und hohen Frequenzbereich deutlich, bzw. die Abhängigkeit zwischen hohe Lautstärke und Frequenz ist geringer als die kleine Lautstärke. Zugleich, wenn die Lautstärke gleich ist, steigt die Kurve in den niedrigen Frequenzbereich deutlicher als in den hohen Frequenzbereich an. z. B. Bei einem Lautstärke von 40 Phon sind der Schalldruckpegel eines 50 Hz-Tons und eines 10 kHz größer als 1 kHz-Ton, weil das menschliche Ohr die höchsten Empfindlichkeit zwischen 1 kHz und 4 kHz hat [Eic06].

Lautheit (N in sone, engl. loudness): Lautheit ist ein Maß f
ür die menschliche Lautst
ärkeempfindung.

Die Lautst ärke und Lautheit können ineinander umgerechnet werden. Die Skala der Verhältnislautheit N wird oft benutzt, um die empfundene Lautst ärke zu beschreiben. Ihre Einheit ist sone. Die Definition der Lautheit von 1 sone ist, dass sie der empfundenen Lautst ärke eines Tons mit einer Frequenz von 1 kHz bei einem Schalldruckpegel (SPL) von 40 dB, bzw. 40 phon. Folgend gibt es die Formel des Lautheit [Wan06], [Zür04]:

$$N = 2 \frac{L_N - 40}{10} \tag{6}$$

N: Lautheit [sone] L_N: Lautst ärke [phon]

Abb. 13 zeigt die Umrechnung zwischen der Lautheit und Lautst ärke. Warum gibt es Lautst ärke und Lautheit? Die Beiden sind Empfindungsgrößen. In Abb. 13 kann die Tendenz gesehen werden, dass ein doppelt so laut empfundener Schall den doppelten

Lautheitswerterhält und vergleichbar hat ein halb so laut empfundener Schall den halben Lautheitswert.



Abb. 13: Der Zusammenhang zwischen Lautst ärke (phon) und der Lautheit (sone) [Zür04]

Das Lautheitsempfinden wird im Innenohr hervorgerufen. Dort werden die Schallschwingungen in Nervenimpulse umgewandelt. Je nach Stärke der Erregung der Nervenzellen wird ein Schallereignis lauter oder leiser beurteilt.



Abb. 14: A-, B-, C-, D-Bewertungsfilter [Sch10]

Seit einiger Zeit sind technische Geräte vorhanden, z. B. Schalldruckmesser. Der Schalldruckmesser kann die Lautstärkewahrnehmung des Menschen simulieren und messen. In der Schallereignismessung werden überwiegend bewertete Schalldruckpegel (SPL) benutzt. Der bewertete Schalldruckpegel wird mit den verschiedenen Bewertungsfiltern nachgebildet, basierend auf den unterschiedlichen

Empfindlichkeiten des Gehörs für verschiedene Frequenzen. Die Bewertungsfilter werden in Abb. 14 gezeigt. A-, B-, C- und D-Bewertung hängen von der Lautstärke ab. Überwiegend wird allein die A-Bewertung benutzt, manchmal auch die C-Bewertung, während die Bewertungsfilter B und D nur noch selten verwendet werden. Die A-Bewertung wird in dieser Arbeit benutzt, weil diese im Vergleich zu anderen Bewertungsfiltern hoch- und niederfrequente Geräuschanteile stark absenkt.

3.3 Auditive Wahrnehmung bei gleichzeitigen Auftreten mehrerer Schallereignisse

In unserer Umwelt existiert kein einziges Schallereignis alleine, sondern mehrere Ger äusche und Klänge treten zusammen auf. Es ist offensichtlich, dass die nat ürlichen Schallsignale meistens komplex sind. Wie können unser auditives System die überlagerten komplexen Schallanteile unterscheiden? Tats ächlich können die enthaltenen Informationen (z. B. Sprache) aufgenommen werden und die anderen Ger äusche können vernachlässigt werden, wenn die Ger äusche nicht sehr lauter als die Sprache ist. Das ist ein Phänomen, welches als Verdeckung (engl. masking) bezeichnet wird [Nak95].

Verdeckung (Maskierungseffekte, engl. masking): Verdeckung ist ein häufige auftretendes Phänomen in der Psychoakustik. Bei menschlichem Gehör bedeutet dies, dass der Mensch bestimmte Frequenzanteile des Geräusches nicht oder nur mit verringerter Sensitivit ät wahrnehmen kann [Zwi07].

Die Verdeckung hängt von der menschlichen Verarbeitung des Schallereignisses ab. In der Umgebung gibt es einen lauten Schall und einen leiseren Schall, wird ein leiserer Schall nicht wahrgenommen. Der laute Schall wird als das maskierte Signal bezeichnet und der leiserer Schall wird als maskiertes Signal definiert. Die Verdeckung hat zwei Kategorien, die simultane Verdeckung (engl. simultaneous masking) und zeitliche Verdeckung (engl. non-simultaneous masking) [Ma04].

Wenn ein Schall unter dem Einfluss anderer Schalle ist, ändert die sich Wahrnehmbarkeit des Schallsignals. So ist beim Phänomen der Verdeckung die Definition der Mithörschwelle wichtig [Her09], [Kal98]:

Mithörschwelle: Die Mithörschwelle wird mit dem Schalldruckpegel, in dB, beschrieben und ist die Wahrnehmbarkeit eines Schwelleschallsignals (maskiertes Signal oder Testton) unter dem Einfluss anderer Schallsignals (Maskierer).

3.3.1 Zeitliche Verdeckung

Eine zeitliche Verdeckung (engl. non-simultaneous or temporal masking): liegt vor, wenn der Maskierer und maskierte Signal nicht gleichzeitig existieren. Beider zeitlichen Verdeckung wird zwischen Vor- und Nachverdeckung unterschieden [Kal98]:

- Vor-Verdeckung (engl. pre-Masking): Dieser Verdeckung seltenster existiert zeitlich vor dem Auftreten von dem Maskierer.
- Nach-Verdeckung (engl. post-Masking): Dieser Verdeckung tritt, im Gegenteil zu der Vor-Verdeckung, zeitlich nach dem auftretendes Maskierers auf.

Die Ursache der Entstehung der Vor- und Nach-Verdeckung ist, dass das Gehirn eine bestimmte Zeit braucht, um die Schallsignale zu verarbeiten. In Abb. 15 werden die beiden Kategorien der simultanen Verdeckungen gezeigt, recht steigende Kurve ist die Vor-Verdeckung, die normalerweise nur 20 ms dauert. Link sinkende Kurve zeigt die Nach-Verdeckung, dessen Dauer länger ist als die der Vor-Verdeckung. Die Zeit beträgt ungefähr 100 ms. In der Mitte ist die simultane Verdeckung, die eine wichtige Rolle bei der experimentellen Erforschung der Funktionsweise des Gehörs spielt. Sie ist das zentrale Phänomen bei Untersuchung der Frequenzgruppen [Zwi07].



Abb. 15: Zeitliche Verdeckung (Vor- und Nach-Verdeckung) und die simultane Verdeckung [Ebe07]

3.3.2 Simultane Verdeckung

Eine simultane Verdeckung (engl. simultaneous Masking): entsteht, wenn Maskierer und maskiertes Signal gleichzeitig auftreten. Wegen der Existenz eines Schallsignals (Maskierer) ist die Mithörschwelle ungleiche wie in ruhiger Umgebung. Wenn die Frequenz des leiseren Testtons in der Nähe des Maskierers liegt, kann der Mensch einige Frequenzanteile nicht oder nur mit verringerter Sensitivit ät wahrnehmen [Zwi07].

Basiert es auf der Prinzip der Verdeckung, gibt es mehre Wirkungsweise der Verdeckung, z. B ein frequenzgruppenbreitem Rauschen verdeckt reiner Sinuston. Im Experiment ist ein reiner Sinuston das maskierte Signal (Testton) und das frequenzgruppenbreite Rauschen ist der Maskierer. Die Mittenfrequenz des frequenzgruppenbreiten Rauschens ist konstant gleich 1 kHz. Wenn das frequenzgruppenbreite Rauschen unterschiedliche Schalldruckpegel hat, ist die Mith örschwelle des Sinustons unterschiedlich. So können wir die unterschiedliche Kurve bekommen wie Abb. 16 (a) gezeigt. Darunter liegt die Ruheh örschwelle. In

Abb. 16 (a) können wir auch sehen, dass der Maskierungseffekt in der Nähe von 1 kHz stärke ist [Lie88].

Wenn der Schalldruckpegel des frequenzgruppenbreiten Rauschens konstant (60 dB) ist und das frequenzgruppenbreite Rauschen hat unterschiedliche Mittenfrequenz, ist die Mithörschwelle des reinen Sinustons unterschiedliche. So können wir die Kurve wie Abb. 16 (b) bekommen, dass der maximale Schalldruckpegel der Mithörschwelle in der Nähe 60 dB bleibt. Jede Kurve hat ein Maximum in der Nähe von der jeweiligen Mittenfrequenz [Lie88].



Abb. 16: Mith \u00fcrschwelle f\u00fcr reiner Sinuston bei frequenzgruppenbreitem Rauschen [Zwi07](a) Mith \u00fcrschwelle f\u00fcr reiner Sinuston bei frequenzgruppenbreitem Rauschen mit 1 kHz.(b) Mith \u00fcrschwelle f\u00fcr reiner Sinuston bei frequenzgruppenbreitem Rauschen mit 60 dB.

Außer der Verdeckung maskiert ein frequenzgruppenbreites Rauschen ein reiner Sinuston, gibt es auch andere Möglichkeiten der Verdeckung: Breitbandrauschen (z. B. weißes Rauschen) verdeckt einen reinen Sinuston und ein reine Sinuston verdeckt einen reine Sinuston.





(b) Mith örschwelle f ür reiner Sinuston bei reinem Sinuston mit 1 kHz

Breitbandrauschen (z. B. weißes Rauschen) verdeckt einen reinen Sinuston, wenn das weiße Rauschen unterschiedlichen Schalldruckpegel hat, hat der reine Sinuston unterschiedlichen Mithörschwelle wie Abb. 17 (a) gezeigt. In Abb. 17 (a) können wir sehen, dass die Mithörschwelle nach Maskierungseffekt für Frequenzen unterhalb von

500 Hz konstant ist, während sie oberhalb 500 Hz um10 dB je Dekade ansteigt. Darunter liegt die Ruhehörschwelle des Sinustons.

Ein reiner Sinuston verdeckt einen reinen Sinuston, wenn der Maskierer unterschiedliche Schaldruckpegel hat, hat der maskierte Sinuston unterschiedliche Mith örschwelle wie Abb. 17 (b) gezeigt. In Abb. 17 (b) können wir sehen, dass jede Kurve ein Maximum in die Nähe von einer 1 kHz Frequenz besitzt.

Durch das Phänomen der Verdeckung und Erkenntnisse aus der Physiologie des Ohres, wie in 2.3.3 beschrieben, wissen wir, dass das Innenohr die Fähigkeit besitzt die Frequenzen zu selektieren. Die Wandwellentheorie sagt aus, dass die Schallsignale mit den unterschiedlichen Frequenzen unterschiedliche Ausbreitungsentfernung der Wandwellen auslösen kann. Deshalb verläuft die Mithörschwelle in Abhängigkeit der Frequenz und des Schalldruckpegels.

Ein Schallereignis kann durch subjektive empfundene Lautst ärke in phon (Lautheit in sone) und dem objektive gemessener Schalldruck und Schalldruckpegel beschrieben werden. Wenn der Schalldruck sich verdoppelt, ist der Schalldruckpegel um 6 dB höher. Aber welcher Änderung gibt es, wenn gleichzeitig 2 Schallereignisse bzw. 2 Schallquellen auftreten? Wenn die Anzahl gleich lauter Schallquellen sich verdoppelt, erhöht sich der Pegel um 3 dB, wie in Tabelle 3 gezeigt wird [Gör06], [URL4].

Anzahl gleich lauter Schallquellen	Pegelzunahme /dB
1	0
2	3,0
3	4,8
4	6,0
5	7,0
6	7,8
7	8,5
8	9,0
9	9,5

TT 1 11 2	D 1 1	1 1 1	1 1 1 1	C 1 11 11	[C O(1	TIDI 41
Tapelle 3.	Pegeiziinanme	nei menren	dieten tatten	Nonaliquener		
rabene 5.	I CgCiLunannic	our moment	gioren lauten	Schanguchen		TUNET
	0		0		L 1/	

4. Die Frequenzgruppe und die Frequenzgruppenbreite

In den 30er Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts hat Harvey Fletcher das Phänomen der Frequenzgruppe (der kritischen Bandbreiten) erwähnt. Wenn die Frequenzen der Komponenten eines Schallsignals ähnlich sind, bzw. die Bandbreite der dargebotenen Stimuli unter einem kritischen Wert liegt, entsteht das Phänomen der Verdeckung. Liegt auf der anderen Seite die Frequenz weiter als eine kritische Bandbreite auseinander, hat diese keinen Beitrag zur Verdeckung. Auf Grund der physiologischen und funktionalen Eigenschaften des Gehörs hat Fletcher ein Filtermodell des Gehörs vorgeschlagen. Das menschliche Innenohr funktioniert als eine Reihe paralleler akustische Filter entlang der Basilarmembran, von denen jeder Filter auf der Basilarmembran eine unterschiedliche Mittenfrequenz hat [Kau03], [Zwi07].

Klassischerweise gibt es 3 grundlegende Typen von Filtern: Tiefpassfilter, Hochpassfilter und Bandpassfilter. Das Tiefpassfilter lässt nur Schallsignalanteile mit niedrigerer Frequenz als der oberen Grenzfrequenz des Filters passieren. Höhere Frequenzanteile werden gesperrt. Beim Hochpassfilter werden hingegen Frequenzanteile kleiner der Grenzfrequenz des Filters gesperrt. Bandpassfilter lassen nur die Signalanteile eines bestimmten Frequenzbereichs durch. Bandpassfilter haben eine untere und eine obere Grenzfrequenz, deren geometrisches Mittel die Mittenfrequenz ist. In Abb. 18 (a) wird der Bandpassfilter gezeigt, welcher in dieser Arbeit mehrmals benutzt wird.



Abb. 18: Idealer und realer Filter [Kau03] a) Ideale Filter: Bandpassfilter

b) Realer Filter

Der ideale Filter besitzt eine unendliche Flankensteilheit. Der reale Bandpassfilter, wie in Abb. 18 (b) gezeigt, hat keine unendliche Flankensteilheit. Die Filtergüte des realen Bandpassfilters hängt von der Flankensteilheit ab. Je steiler die Flanken sind, desto besser ist die Filtergüte.

Nach der Entdeckung des Phänomens von Fletcher hat Eberhard Zwickers in den 50er und 60er Jahren des 20. Jahrhunderts das Frequenzgruppenmodell vorgeschlagen. Auf der Basis des Filtermodells des Gehörs von Fletcher entwickelte Zwicker diese Theorie. 1961 hat er seine Ergebnisse veröffentlicht. Dieses Modell wird heutzutage umfassend in der Tontechnik benutzt, um die Schallereignisse zu codieren und zu decodieren [Kau03].

4.1 Frequenzgruppenbegriff

Wie in den Kapiteln 2.3 und 3.2.2 beschrieben wurde, ist der vom Menschen akustisch wahrnehmbarere Frequenzbereich von 16 Hz bis 16 kHz. Die Haarzellen auf die Basilarmembran liegen vom ovalen Fenster bis zum Helicotrema. Und entspricht eine bestimmten Frequenzbereich. In Abb. 19 wird der Zusammenhang zwischen Basilarmembran und der Frequenz gezeigt. der gesamte Frequenzbereich kann 24 Gruppen geteilt werden. Diese 24 Gruppen werden als Frequenzgruppen (engl. critical bands) bezeichnet. Die Breite einer Frequenzgruppe hängt von der Tonheit ab. Die Tonheit in Bark oder mel ist das Maß für Tonhöhenempfindung. Die Abhängigkeit zwischen jeder Tonheit und der Mittenfrequenz des Schallsignals kann mit Formel 7 berechnet werden [Hav09], [Ter98].

$$z = 13 \cdot \arctan(0.76 \cdot f_m) + 3.5 \cdot \arctan(\frac{f_m}{7.5})^2$$
 (7)

z: Tonheit [Bark] f_m: Mittenfrequenz [kHz]

Die Tonheit wird in der Einheit mel angegeben. Nach E.Zwicker, 1982 gilt es:



Abb. 19: Zusammenhang zwischen Tonheit und Frequenzgruppen [Zwi07]

Das menschliche auditive System funktioniert als eine Reihe paralleler überlappender

24

Bandpassfilter. Diese Filter verarbeiten komplexer Schallsignale und dienen zur Spektralanalyse des Schallsignals. Die komplexen Schallsignale erreichen das Innenohr, werden in parallelen Kan älen getrennt und als Frequenzgruppen verarbeitet, weshalb die Frequenzgruppen die Verarbeitungs- und Analyseeinheit des Schallsignals sind. Die Frequenzgruppen bestimmen bei der Wahrnehmung von Schallsignalen die Frequenzauflösung des humanen auditiven Systems.

Auf Grund der Studien der ganzen Reihe paralleler Bandpassfilter hat Zwicker Bark-Skala 1961 die Versuchsergebnisse der Frequenzgruppenbreite veröffentlicht, wie Tabelle 4 und Abb. 20 gezeigt hat [Bos03]. Nach Bark-Skala wird der menschliche akustisch wahrnehmbare Frequenzbereich 24 Gruppen geteilt. Für die 24 menschlichen Bandpassfilter hat jeder Filter eine bestimmte Bandbreite, bzw. Frequenzgruppenbreite (engl. critical bandwidth).



Abb. 20: Abh ängigkeit der Frequenzgruppenbreite von der Mittenfrequenz [Zwi99]

Basierend auf Tabelle 4 kann eine Kurve gezeichnet werden, wie sie in Abb. 20 dargestellt ist. Sie beschreibt der Bark-Skala mit der die Abhängigkeit zwischen der Mittenfrequenz und der Frequenzgruppenbreite. Für die Mittenfrequenzen bis 500 Hz ist die Frequenzgruppenbreite konstant. Wenn die Mittenfrequenz größer als 500 Hz ist, steigt die Frequenzgruppenbreite Nach Zwicker beträgt die Frequenzgruppenbreite unterhalb von 500 Hz konstant 100 Hz und oberhalb von 500 Hz wird die Frequenzgruppenbreite mit ca. 20% der Mittenfrequenz angegeben. Die Abhängigkeit der Frequenzgruppenbreite und der Mittenfrequenz kann genauer mit folgender Formel berechnet werden [Zwi07].

$$\Delta f_{\rm c} = 25 + 75 \times [1 + 1.4(f_{\rm m})^2]^{0,69} \tag{8}$$

 Δf_c : Frequenzgruppenbreite [Hz] f_m : Mittenfrequenz [kHz]

Nach der Entdeckung der Frequenzgruppen wurde enormer Experimenten durchgeführt, um die Frequenzgruppenbreitenbestimmen. Diese Experimente zeigen den Wert der Frequenzgruppenbreite nicht nur nach Zwicker sondern auch nach vielem anderem Wissenschaftler z. B. Moore. Die Ergebnisse der Frequenzgruppenbreite nach den Wissenschaftlern sind ähnlich. Das bekannteste Ergebnis ist Bark-Skala von Zwicker. Das Ergebnis von Zwicker wird heutzutage in Tontechnik benutzt. Im Folgenden werden die unterschiedlichen Testmethoden zur Bestimmung der Frequenzgruppenbreite dargestellt.

Tabelle 4: Abh ängigkeit der Frequenzgruppenbreite von der Mittenfrequenz [Zwi07] Tonheit (z/Bark), untere und obere Grenzfrequenz (f_1 /Hz und f_2 /Hz), Mittenfrequenz (f_m /Hz), Frequenzgruppenbreite (engl. critical bandwidth Δf_c /Hz)

Z	f_1 f_2	f _m	Z	Δf_c	Z	f_1 f_2	f _m	Z	Δf_c
Bark	Hz	Hz	Bark	Hz	Bark	Hz	Hz	Bark	Hz
0	0				12	1720			
		50	0.5	100			1850	12.5	280
1	100				13	1720			
		150	1.5	100			2150	13.5	320
2	200				14	2320			
		250	2.5	100			2500	14.5	380
3	300				15	2700			
		350	3.5	100			2900	15.5	450
4	400				16	3150			
		450	4.5	110			3400	16.5	550
5	510				17	3700			
		570	5.5	120			4000	17.5	700
6	630				18	4400			
		700	6.5	140			4800	18.5	900
7	770				19	5300			
		840	7.5	150			5800	19.5	1100
8	920				20	6400			
		1000	8.5	160			7000	20.5	1300
9	1080				21	7700			
		1170	9.5	190			8500	21.5	1800
10	1270				22	9500			
		1370	10.5	210			10500	22.5	2500
11	1480				23	12000			
		1600	11.5	240			13500	23.5	3500
12	1720				24	15500			
		1850	12.5	280					

4.2 Messtechnischen Bestimmung der Frequenzgruppenbreite

4.2.1 Band Widening-Experiment

Die erste Testmethode der Frequenzgruppenbreite wurde von Harvey Fletcher 1940

begründet. Das Experiment hat deutlich die Existenz der Frequenzgruppenbreite bei einer bestimmten Mittenfrequenz gezeigt. In diesem Experiment wurden ein Sinuston und ein bandbegrenztes Rauschsignal gleichzeitig dargeboten. Mitthörschwelle des Sinustons wird ermittelt. In den Vorgang des Experiments bleibt die Frequenz des Sinustons konstant, nur die Amplitude kann reguliert werden. Das bandbegrenzte Rauschsignals wird als Maskierer verwendet. Das Rauschen hat eine konstante spektraler Leistungsdichte, die Bandbreite des Rauschsignals ist auf der Mittenfrequenz zentriert [Moo95].

Hier wird weißes Rauschen verwendet, welches durch ein Bandpassfilter bandbegrenzt wird. Da das Rauschsignal für jede Frequenz ann ähernd die gleiche Signalleistung hat, ist die Leistungsdichte des weißen Rauschens konstant.

In der Abb. 21 wird das Ergebnis des Experiments von Fletcher gezeigt. In dem Vorgang des Experiments werden 2 kHz-Sinuston und ein bandbegrenztes Rauschsignal gleichzeitig dargeboten, wobei die Amplitude des Sinustons reguliert werden kann. Die Mittenfrequenz des bandbegrenzten Rauschsignals ist 2 kHz. So kann die Mithörschwelle für einen Sinuston bei einem bandbegrenzten Rauschsignal ermittelt werden. Wenn die erste Mithörschwelle wird bestimmt, wird die Bandbreite des Rauschsignals vergrößert, z. B. von 50 Hz auf 100 Hz.



Abb. 21: Das Ergebnis von Band Widening-Experiment [Moo95]

Die Kurve in Abb. 21 zeigt die Abhängigkeit der Mithörschwelle des Sinustons von der Bandbreite des Rauschsignals. Wenn die Bandbreite des Maskierer kleiner als 400 Hz ist, erhöht sich die Mithörschwelle für den Sinuston. Aber wenn die Bandbreite größer als 400 Hz ist, erhöht sich die Mithörschwelle nicht mehr. Auf Basis des Frequenzgruppenmodels (engl. critical band model) ist Verdeckung innerhalb der kritischen Bandbreite (Frequenzgruppenbreite) stark. Das Ergebnis von Fletcher zeigt, dass je größer Bandbreite des Rauschens ist, desto lauter ist diese Mithörschwelle, aber die Mithörschwelle ist konstant, wenn die Bandbreite größer als Frequenzgruppenbreite bzw. 400 Hz [Ste00]. Aber die Frequenzgruppenbreite ist nach Bark-Skala von Zwicker gleich 300 Hz, wenn die Mittenfrequenz 2 kHz ist.

4.2.2 Bestimmung der Frequenzgruppenbreite an der Ruheh örschwelle

Durch Bestimmung der Frequenzgruppenbreite an der Ruhehörschwelle (engl. threshold measurements) kann direkt die Frequenzgruppenbreite bestimmen. Wenn die Teiltöne des komplexen Signals innerhalb der Frequenzgruppenbreite liegen, hängt die Ruhehörschwelle von der Anzahl der Testsignale ab. Zwicker stellt mit dieser Testmethode die Frequenzgruppenbreite bei 1 kHz fest. Im Experiment hat jedes Testsignal gleiche Amplitude.

Die Abb. 22 zeigt die Ruhehörschwelle des komplexen Signals. Zuerst wird die Ruhehörschwelle des Testsignals bei 920 Hz allein bestimmt. Dann wird ein anderer Testsignals mit gleicher Amplitude bei 940 Hz addiert und es wird die Ruhehörschwelle der beiden Testsignale bestimmt. Die Anzahl der Testsignale wird weiter erhöht, und jedesmal wird die Ruhehörschwelle erneut gemessen. Die Ruheh örschwelle sinkt mit der zunehmenden Anzahl der Testsignale. Am Anfang wird die Anzahl der Testsignale verdoppelt und die Ruhehörschwelle des komplexen Signals nimmt um 3 dB ab. Wenn die Anzahl der Testsignale mehr als 8 ist, bleibt die Ruheh örschwelle auf einem konstanten Pegel. Das Phänomen wird in Abb. 22 gezeigt, die Ruhehörschwell des komplexen Signals bei ungefähren 1080 Hz konstant ist. Zwicker beschreibt, dass die Hörschwelle ab dem 9. Ton nicht mehr absinkt, weil die Frequenz der Komponenten des komplexen Signals außerhalb der Frequenzgruppenbreite liegt und es keine Abh ängigkeit zwischen der Ruhrhörschwelle und der Anzahl der Testsignale gibt. Deshalb ist für 1 kHz die Frequenzgruppenbreite etwa 160 Hz (von 920 Hz bis 1080 Hz) [Zwi07].



Abb. 22: Ruheh örschwelle komplexer Signale [Zwi07]

4.2.3 Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch die Lautheit komplexer Schallsignale

Eine weitere Möglichkeit der Bestimmung der Frequenzgruppenbreite ist die Lautheit

komplexer Schallsignale (engl. Loudness measurement of bandwidth for constant SPL). Bei dieser Testmethode wird die Frequenzgruppenbreite durch die Messung der Lautheit der akustischen Reize bestimmt. Ein bandbreites Rauschsignal wird gegeben, dann wird die Bandbreite des Rauschsignals ausgeweitet, wobei der Schaldruckpegel konstant gehalten wird. Wenn die Gesamtenergie aller Komponenten des Rauschsignals innerhalb der kritischen Bandbreite ist, ver ändert sich die Lautst ärke des Rauschsignals nicht. Wenn die Gesamtenergie die Grenzen des Bandes überschreitet, ändert sich die Lautheit abhängig von der Bandbreite des Rauschens.



Abb. 23: Die Lautheit eines Rauschens mit unterschiedlicher Bandbreite [Zwi07] Mittenfrequenz = 2 kHz, SPL = 47 dB

In Abb. 23 werden die Ergebnisse der Lautheit eines Rauschens mit unterschiedlicher Bandbreite dargestellt. Im Experiment von Zwicker ist die Mittenfrequenz 2 kHz und der Schalldruckpegel (SPL) des Rauschsignales bleibt konstant bei 47 dB. Wenn die Bandbreite des Rauschsignals als 0,3 kHz ist, ist die Lautheit des Rauschsignals bei 2 sone. Ab 0,3 kHz steigt die Lautheit des Rauschsignals abh ängig von der Bandbreite. Die Kurve ist wie Abb. 23 gezeigt. Auf Grund des Experiments stellt Zwicker fest, dass die Frequenzgruppenbreite für eine Mittenfrequenz von 2 kHz etwa 300 Hz beträgt.

4.2.4 Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch Maskierung in der Frequenzlücke

Maskierung in der Frequenzlücke (engl. masking in frequency gaps) ist ein bekanntes Maskierungsexperiment, um die Frequenzgruppenbreiten zu bestimmen. Diese Testmethoden wurden von Zwicker begründet. Dabei werden Schmalbandrauschen und Sinuston als Maskierer und als maskiertes Signal benutzt. Schmalbandrauschen ist ein bandbegrenzte Rauschsignal, die für eine relative kleine Bandbreite und eine konstante spektrale Leistungsdichte besitzt. In diesem Experiment werden Maskierer und das maskierte Signal gleichzeitig dargeboten. Durch Regulierung der Lautstärke des maskierten Signals maß Zwicker die Mithörschwelle des Maskierer. Das Experiment kann mit folgenden 2 Konfigurationen durchgeführt werden [Zwi07]:

Maskierung in der Frequenzlücke: Sinuston verdeckt

In diesem Experiment wird ein Sinuston mit 2 kHz verwendet, deren Amplitude reguliert werden kann. 2 Schmalbandrauschsignale sind auf der Mittenfrequenz zentriert und haben gleichen Pegel und Abstand unter und oberhalb von der Mittenfrequenz. Die Bandbreite des Schmalbandrauschens beträgt jeweils 200 Hz. In dem Vorgang des Experiments wird die Mithörschwelle für den Sinuston gemessen. Wenn die erste Mithörschwelle bestimmt ist, wird der Abstand zwischen den 2 Schmalbandrauschen vergrößert. Somit erhält man Mithörschwelle des Sinustons bei Schmalbandrauschen mit unterschiedlichem Frequenzabstand [Ter98].

Maskierung in der Frequenzlücke: Schmalbandrauschen verdeckt

Dieses Verfahren ist ähnlich der vorherigen Methode Sinuston verdeckt in der Frequenzlüke. In diesem Experiment wird ein Schmalbandrauschen von 2 Sinustönen verdeckt. Nur die Amplitude des Schmalbandrauschens kann reguliert werden. Die Mithörschwelle des Schmalbandrauchens wird dabei für 2 Sinustöne mit unterschiedlichem Frequenzabstand bestimmt.



Abb. 24: Maskierung in der Frequenzl ücke [Zwi07]a) Mithörschwelle des Sinustons bei Verdeckung in der Frequenzl ückeb) Mithörschwelle des Schmalbandrauschens bei Verdeckung in der Frequenzl ücke

In Abb. 24 wird das Ergebnis der beiden Experimente der Maskierung in der Frequenzlüke von Zwicker gezeigt. In erstem Experiment beträgt der Pegel der beiden Schmalrauchsignale 50 dB und deren Mittenfrequenzen liegen im gleichen Abstand unter- und oberhalb zur Testfrequenz von 2 kHz. In dem Experiment wird die Mithörschwelle des 2 kHz-Sinustons für unterschiedliche Frequenzabstande Δf z. B. von 50 Hz bis 2 kHz, der beiden Schmalbandrauschen bestimmt. Schließlich bekommt man eine Kurve wie Abb. 24 (a). Abb. 24 (b) zeigt die Mithörschwellen der Verdeckung des Schmalbandrauschens in der Frequenzlücke. Die Mittenfrequenz des Schmalbandrauschens ist 2 kHz. Die beiden Sinustöne sind auf die Mittenfrequenz zentriert.
Wie in Abb. 24 gezeigt, kann für jeder Frequenzabstand Δf des Maskierers die Mithörschwelle des maskierten Signals angegeben werden. Vergleicht man die 2 Kurven des Ergebnisses des Experiments miteinander sehen wir, dass wenn der Frequenzabstand des Maskierers kleiner als ungefähr 300 Hz ist, nehmen beiden Kurven etwa linear konstanten Wert an. Aber wenn der Frequenzabstand Δf des Maskierers größer als 300 Hz ist, fällt die Mithörschwelle des maskieren Signals plötzlich ab. Die 2 Ergebnisse von Zwicker haben gezeigt, dass die Frequenzgruppenbreite für 2 kHz Mittenfrequenz 300 Hz beträgt.

4.2.5 Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch binaurale Verzögerung der Wahrnehmung

Eine andere Möglichkeit der Bestimmung der Frequenzgruppenbreite ist binaurale Verzögerung der Wahrnehmung (engl. binaural hearing). Diese Testmethode verwendet höherfrequente Sinusbursts, welche zeitlich zueinander verzöget jeweis auf ein Ohr gegeben werden, um die Frequenzgruppenbreite zu bestimmen. Sowohl auf das linke Ohr und als auch auf das rechte Ohr, wird ein Sinusburst mit unterschiedlicher Frequenz gegeben. Dann muss die Versuchsperson sich auf die Verzögerung der beiden Töne konzentrieren. Das menschliche auditive System hat eine hohe Sensibilität, wenn die Töne nahe beieinander in derselben Frequenzgruppe liegen. Aber wenn die Frequenzen außerhalb dieses kritischen Bands sind, sinkt die Sensibilität des menschlichen Ohrs deutlich. Die Sensibilität des menschlichen Ohrs ändert sich in Abhängigkeit von dem Frequenzabstand zwischen den beiden Tönen [Ter98], [Zwi07].

4.2.6 Bestimmung der Frequenzgruppenbreite durch Nachweisbarkeit von Phasen änderungen



Abb. 25: Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM) [Fri07]

Diese Testmethode (engl. detectability of phase changes) basiert auf die Theorie der Amplitudenmodulation (AM) und der Frequenzmodulation (FM). Wie Abb. 25 gezeigt hat, ist Amplitudenmodulation (AM) eine Modulationsart. Ein Trägersignal mit einer bestimmten Frequenz wird in Abhängigkeit des Nutzsignals in der Amplitude verändert. Frequenzmodulation (FM) ist, dass ein Trägersignal mit einer bestimmten Amplitude von einem Nutzsignals in Abhängigkeit seiner Frequenz ver ändert wird [Fri07].Für eine sinusf örmige Amplituden-(AM)und Frequenzmodulation gibt es dem wahrnehmbaren Modulationsgrad wie in Abb. 26 gezeigt wird. Der wahrnehmbare Modulationsgrad der Amplitudenmodulation (AM) wird durch Amplitudenmodulationsgrad (m) beschrieben. Und der Frequenzmodulationsindex (n) beschreibt den wahrnehmbaren Modulationsgrad der Frequenzmodulation (FM).



Abb. 26: Grade wahrnehmbare Modulation einer sinusförmigen Frequenz- (FM) und Amplitudenmodulation (AM) [Zwi07]

Sinuston: f = 1 kHz, Schalldruckpegel SPL = 80 dB

In diesem Experiment ist das Trägersignal ein Sinuston. Die Frequenz des Sinustons beträgt bei 1 kHz, Schalldruckpegel bei 80 dB. Wenn die Frequenz des Nutzsignals steigt, bleibt der wahrnehmbare Amplitudenmodulationsgrad zuerst ein relativ konstanter Wert. Dann der wahrnehmbare Amplitudenmodulationsgrad nimmt ab. Der wahrnehmbare Frequenzmodulationsindex sinkt, wenn die Modulationsfrequenz vergrößert. Wenn die Modulationsfrequenz größer als 64 Hz ist, haben die beiden Modulationsmethoden gleiche Wahrnehmbarkeit, bzw. einen Schnittpunkt in Abb. 26. Abhängig von $\Delta f = 2f_{mod}$ ist der Abstand 150 Hz, bei dem der Schalldruckpegel erreicht 0 dB. Es ist ein Maßfür die kritischen Bandbreiten, hat Zwicker gezeigt, dass für 1 kHz die Frequenzgruppenbreite 150 Hz beträgt.

5. Entwicklung und Ergebnisse des Programms

In Kapitel 4 wurden viele Experimente zur Bestimmung der Frequenzgruppenbreite dargestellt. Drei ausgewählte Testmethoden werden simuliert. Auf Basis der Simulationsergebnisse wird eine Methode ausgewählt, welche als Programm umgesetzt und durch mehrere Versuchspersonen evaluiert werden soll. Das Ziel dieser Arbeit ist die Existenz der Frequenzgruppen zu zeigen und exemplarisch die Frequenzgruppenbreite durch das Softwareprogramm zu bestimmen.

5.1 Voraussetzung des Experiments

Diese Experimente fassen die Grundlagen der Psychologie auf, nach der jeder Mensch eine unterschiedliche Wahrnehmung hat, wenn Schallereignisse zufällig auftreten. Die Beurteilung und Wahrnehmung der Probanden hängen z. B. von Aufmerksamkeit, Erm üdungsprozessen, Gesundheitszustand und den Erwartungen der Versuchsperson ab. Damit in dieser Arbeit alle Experimente unter gleichen Konditionen durchgeführt werden, müssen alle betrachteten Einflüsse weitestgehend ausgeschlossen werden. Die Reizschwellen sollen unter gleichen Rahmenbedingungen bestimmt werden. Unter folgenden Voraussetzungen und mit der angegebenen Hardware wurde der Versuch durchgeführt:

Umgebung des Experiments

Ruhiges Labor (mit Kopfh örer)

> Computer

Rechnertyp: SONY VAIO VGN-NW21JF_S

Betriebssystem: Windows 7 (64 Bit)

Prozessor: Intel Pentium Dual Core T4300 @ 2.10GHz

Grafikkarten: Intel GL40/GM45/GM47/GS45 Graphics Controller

Soundkarte: Realtek ALC262 @ Intel 828011 (ICH9)

➢ Kopfhörer

Sennheiser HD 280

Dieser Kopfhörer dämpft Außengeräusche sehr gut ab. Die Übertragungsleistung ist stabil, wie Abb. 27 zeigt, und in den Frequenzen zwischen 100 Hz und 10 kHz ändern

sich die relativen Schalldruckpegel nur von 5 dB bis 10 dB. In dieser Arbeit liegt die Frequenz aller Experimente zwischen 200 Hz und 3600 Hz, deshalb passen die Kopfhörer gut zu den Experimenten dieser Arbeit.



Abb. 27: Diffusfeld-Übertragungsmaßdes Kopfhärers (Sennheiser HD 280) [Sen06]

> Software

Abobe Audition 3.0 (Simulationsexperiment)

Microsoft Visual Basic 2010 Express (Programm)

Versuchspersonen

Für jedes Experiment wurden 20 Versuchspersonen verwendet. Alle Versuchspersonen sind gesunde erwachsene Menschen. Das Alter der Versuchsperson ist zwischen 20 und 30.

5.2 Die Simulation

Für die Programmsetzung wurden 3 Testmethoden simuliert, um anhand der Ergebnisse und Erfahrungen eine geeignete Verfahrensweise für die Softwareumsetzung auszuwählen. Hierbei werden die Verfahren "Band Widening-Experiment" (siehe Abschnitte 4.2.1), "Sinuston wird verdeckt in der Frequenzl ücke" "Schmalbandrauschen und wird verdeckt in der Frequenzlücke" (siehe Abschnitte 4.2.4) verwendet.

5.2.1 Simulation des Band Widening-Experiments (Fletcher 1940)

In diesem Experiment werden ein Sinuston und mehrere bandbegrenzte Rauschsignale benutzt. Der Sinuston mit einer Frequenz von 2 kHz wird mit dem Programm Adobe Audition erstellt und die Amplitude kann durch Adobe Audition reguliert werden. Wie im Experiment von Fletcher hat jedes bandbegrenzte Rauschsignal unterschiedliche Bandbreiten (siehe Tabelle 5). Die Bandbreite des Rauschsignals ist auf 2 kHz zentriert. Zwischen oberer und unterer Grenzfrequenz des bandbegrenzten Rauschsignals ist die Bandbreite Δf der Abstand.

		θ	
Ordnungszahl	Bandbreite	obere Grenzfrequenz	untere Grenzfrequenz
	Δf/Hz	f/Hz	f/Hz
1	50	1975	2025
2	100	1950	2050
3	200	1900	2100
4	300	1850	2150
5	400	1800	2200
6	500	1750	2250
7	800	1600	2400
8	1600	1200	2800
9	2000	1000	3000
10	3200	400	3600

Tabelle 5: Der Bandbreite des bandbegrenzte Rauschsignals (Mittenfrequenz: $f_m = 2 \text{ kHz}$)



Abb. 28: Die Entstehung des bandbegrenzten Rauschsignals

Jedes bandbegrenzte Rauschsignal wird durch Audition erstellt. Das weiße Rauschen wird durch ein Bandbreitefilter bandbegrenzt. Es wird weißes Rauschen ausgewählt, weil die Leistungsdichte des weißen Rauschens konstant ist. In diesem Experiment wird ein Butterworth-Bandpassfilter benutzt. Abb. 28 zeigt den Prozess der Entstehung des bandbegrenzten Rauschsignals. Das weiße Tauschen wird durch ein

Butterworthfilter bandbegrenzt. In Abb. 28 ist exemplarischerer Frequenzgang für die Bandbreite des Filters ist von 300 Hz bis 3600 Hz dargestellt. Schließlich erhalten wir ein bandbegrenzte Rauschsignal, welches eine annähend konstante spektraler Leistungsdichte in Durchlassbereich aufweist. Die bandbegrenzten Rauschsignale für andere Bandbreiten wurden durch gleiche Methode entstellt.



Abb. 29: Der Vorgang des Band Widening-Experiments (nach [Rei09])

Der Vorgang des Experiments wird in Abb. 29 gezeigt. Ein 2 kHz-Sinuston und ein bandbegrenztes Rauschsignal werden gleichzeitig dargeboten. Die Amplitude des Sinustons kann reguliert werden, um die Mithörschwelle bei einem bandbegrenzten Rauschsignal zu messen. Wenn die erste Mithörschwelle bestimmt wurde, wird die Bandbreite des Rauschsignals ausgeweitet, bzw. wird der nächste Maskierer ausgewählt.

🗠 🛰 🚠 🗴 🛛 🖅		
👪 1000-3000. wav	Sinuston M	2000
🌆 1200-2800. wav	il 🕢 -60	
🌇 1600-2400. wav		
🏭 1750-2250. wav	+++ 1 M	1975-2025
🏭 1800-2200. wav		1950 2050
🏭 1850-2150. wav	1 HH 2 M	1330-2030
🔛 1900-2100. wav	+++ 3 M	1900-2100
1950-2050. wav		1050 2150
1975-2025. wav	4 M	1850-2150
2000. wav	F#F 5 M	1800-2200
🏭 400-3600. wav		
	+++ 6 M	1750-2250
	+++ 7 M	1600-2400
	H++ 8 M	1200-2800
	[+++ 9]M	1000-3000
	+++ 10 M	400-3600

Abb. 30: Simulation des Band Widening-Experiments mit Audition

Der ganze Vorgang des Experiments wurde mit Audition wie Abb. 30 simuliert. Durch Auswahl der Kanäle kann der Maskierer und das maskierte Signal gleichzeitig übertragen werden. In Abb. 30 ist erster Kanal der Sinuston, dessen relativer Pegel durch den darunterliegenden Regler gesteuert werden kann. Darunter legen dem sich die bandbegrenzten Rauschsignale, mit den Ordnungszahlen von 1 bis 10 wie analog der Tabelle 5. Während der Durchführung dieses Experiments war die Lautstärke des Computers auf den Maximalwert eingestellt. Der relative Pegel aller bandbegrenzten Rauschsignale beträgt in Audition -20 dB. Die detailierten Ergebnisse des Experiments sind in Anhang 1 dargestellt. Es gibt 20 Sätze von experimentellen Daten. Die in Abb. 31 zeigt die mittlere Mithörschwell des Sinustons.



Abb. 31: Mith \ddot{a} schwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

In Abb. 31 wird das Phänomen gezeigt, dass die Bandbreite des begrenzten Rauschsignals von 100 Hz bis 500 Hz steigt, sich der relative Pegel der Mithörschwelle auch von -25 dB bis -21,5 dB erhöht. Wenn die Bandbreite des Rauschsignals größer als 500 Hz ist, erhöht sich die Mithörschwelle nicht mehr, obwohl sich die Bandbreite vergrößert. Die Veränderung der Mithörschwelle liegt in einem Bereich von 5 dB. Der erste relative Pegel bei $\Delta f = 50$ Hz ist mit -23 dB größer als der zweite relative Pegel mit -25 dB. Weil die Bandbreite von 50 Hz sehr klein ist, sind das Rauschsignal und der Sinuston schwer zu verteilen. Auf Basis des Frequenzgruppenmodels (critical band model) und der Ergebnisse von Fletcher trägt zur Verdeckung eines Testtones nur der Signalanteil innerhalb der kritischen Bandbreite (Frequenzgruppenbreite) bei, weshalb ist Frequenzgruppenbreite etwa 500 Hz ist.

Der Nachteil von dem Band Widening-Experiments ist die Geringgüte je Veränderung der Mithörschwelle, sodass kleine Veränderungen der Bewertungen größeren Fehler führen können. Dieses Ergebnis ist also stark abhängig von den Testbedingungen. Der Kurvenverlauf aus den Veröffentlichungen von Zwicker (vgl. Abb. 21) ist in verglich zu den eignen Simulationsergebnissen (siehe Abb. 31) kontinuierlicher und weist nicht diese "Knick" bei der Bandbreite des Rauschsignale von 400 Hz auf.

5.2.2 Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen (Zwicker)

In dieses Experiment werden ein Schmalbandrauschen und 2 Sinustöne gleichzeitig angeboten. Das Schmalbandrauschen, dessen Mittenfrequenz 2 kHz ist, wurde mit dem Programm Adobe Audition erstellt. Abb. 32 zeigt den Prozess der Entstehung des Schmalbandrauschens. In dieser Abbildung werden ein weißes Rauschsignal und dessen Frequenzspektrum gezeigt. Die Leistungsdichte des weißen Rauschens ist konstant. Es wird durch einen Butterworthfilter bandbegrenzt. Abb. 32 zeigt einen sehr schmalen Bandpassfilter, dessen Bandbreite 40 Hz ist (von 1980 Hz bis 2020 Hz). Schließlich erhält man ein Schmalbandrauschen, welches einer konstanten spektralen Leistungsdichte in Durchlassbereich hat. In sonst Frequenzbereich ist die Leistungsdichte inkonstanten.



Abb. 32: Die Entstehung des Schmalbandrauschens

Die 2 Sinustöne sind auf 2 kHz zentriert. Fuer jede Testeinstellung haben die 2 Sinustöne unterschiedliche Frequenzen und somit auch einen anderen Frequenzabstand, wie in Tabelle 6 gezeigt wird. z. B. der erste Abstand ist 50 Hz zwischen den 2 Sinustönen. Die Bandbreite des Schmalbandrauschens muss kleiner als dieser Abstand sein. In der Simulation wurde eine Bandbreite des Schmalbandrauschens 40 Hz (von 1980 Hz bis 2020 Hz) ausgewählt. In Tabelle 6 zeigt die niederfrequenten und höherfrequente Sinussignale, welche die zusammen angeboten wurden.

Der Vorgang des Experiments wird in Abb. 33 gezeigt. Die Bandbreite des Schmalbandrauschens ist konstant, die Amplitude kann jedoch reguliert werden. Es wurden 2 Sinustöne gleichzeitig dargeboten und der relative Pegel des Schmalbandrauschens wurde erhöht, um die Mithörschwelle fuer alle 10 Testeinstellungen zu messen.

Ordnungszahl	Abstand	niederfrequentes Sinussignal	h cherfrequentes Sinussignal
	Δf/Hz	f/Hz	f/Hz
1	50	1975	2025
2	100	1950	2050
3	200	1900	2100
4	300	1850	2150
5	400	1800	2200
6	500	1750	2250
7	800	1600	2400
8	1600	1200	2800
9	2000	1000	3000
10	3200	400	3600

Tabelle 6: Der Abstand zwischen die 2 Sinust öne und die Frequenz der 2 Sinust öne



Abb. 33: Der Vorgang der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen

Der ganze Vorgang des Experiments wird mit dem Programm Adobe Audition wie Abb. 34 simuliert. Durch die Auswahl der Kan äle kann der gewünschte Maskierer und das maskierten Signal gleichzeitig widergegeben werden. In Abb. 34 ist der erste Kanal das Schmalbandrauschen, dessen relativer Pegel durch den darunterliegenden Regler gesteuert werden kann. Darunter finden sich die Datei mit dem Sinustönen (siehe Tabelle 6). "L" bedeutet das niederfrequente Sinussignal und "R" kennzeichnet das höherfrequentes Sinussignal. Während der Durchführung dieses Experiments war die Lautst ärke des Computers auf den Maximalwert eingestellt. Der relative Pegel aller Sinustöne ist in Audition bei -30 dB. Die Taste "M" kann jeder Kanal aktiviert bzw. deaktiviert werden. Dann steigern wir den relativen Pegel des Schmalbandrauschens und ermittelt somit die Mithörschwelle für den ersten Frequenzabstand (50 Hz). Die Ergebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlüke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen sind Anhang 2. Die Mith örschwellen wurden 20 Mal gemessen. Die Kurve in Abb. 35 zeigt die mittlere Mith örschwelle von aller 20 Messungen.



Abb. 34: Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen mit Audition



Abb. 35: Mith \ddot{a} schwelle des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz f_m = 2 kHz)

In Abb. 35 wird die deutliche Tendenz der Kurve gesehen, dass wenn der Abstand der 2 Sinust öne von 100 Hz bis 400 Hz steigt, es keine größere Änderung des relativen Pegels der Mithörschwelle gibt. Der Wert bleibt im Bereich von -12 dB bis -13 dB. Wenn der Abstand der 2 Sinust öne größer als 400 Hz ist, sinkt die Mithörschwelle. Ab 800 Hz ist das Sinken abrupt und sehr deutlich. Die Mithörschwelle liegt in einem Bereich von 25 dB. Der erste relative Pegel von 50 Hz ist mit -10 dB größer als der zweite relative Pegel mit -12 dB, weil der Abstand, von 50 Hz so klein ist, dass die Verdeckung stärker ist. Basierend auf dem Frequenzgruppenmodel (critical band model) und den Ergebnissen von Zwicker ist der Verdeckung stellt eines Testtones innerhalb einer kritischen Bandbreite deutlich stärker als außerhalb der 40

Frequenzgruppenbreit. Die mittlere Frequenzgruppenbreite in diesem Experiment beträgt ca. 400 Hz.

Vorteil der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen: Verglichen mit dem Band Widening-Experiment ist die Ver änderung der Mithörschwelle deutlicher. Der Umfang der Mithörschwelle liegt in einem Bereich von -10 dB bis -35,5 dB. Die Versuchspersonen können die Änderung im Experiment deutlicher beobachten und das Ergebnis ist stabiler als Band Widening-Experiment.

Nachteil der Maskierung in der Frequenzlücke-Mithörschwelle von Schmalbandrauschen: Die Kurve abruptes Sinken hat, aber wenn der Abstand der 2 Sinustöne ca. 800 Hz ist.

5.2.3 Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston (Zwicker)

		niderfrequentes Signal		h öherfreque	entes Signal
Ordnung	Abstand	untere	obere	untere	obere
szahl	Δf/Hz	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz	Grenzrequenz	Grenzrequenz
		f/Hz	f/Hz	f/Hz	f/Hz
1	50	1775	1975	2025	2225
2	100	1750	1950	2050	2250
3	200	1700	1900	2100	2300
4	300	1650	1850	2150	2350
5	400	1600	1800	2200	2400
6	500	1550	1750	2250	2450
7	800	1400	1600	2400	2600
8	1600	1000	1200	2800	3000
9	2000	800	1000	3000	3200
10	3200	200	400	3600	3800

Tabelle 7: Der Abstand zwischen die 2 Schmalbandrauschsignale

Bei dieser Testmethode ist das Verfahren ähnlich dem des verdeckten Schmalbandrauschens (siehe 5.2.2). Aber hier werden ein Sinuston und 2 Schmalbandrauschen benutzt. Hier wurde analog zum Experiment von Zwicker die Frequenz des Sinustons bei 2 kHz. Die 2 Schmalbandrauschen sind den gleichen Pegel und den gleichen Abstand zur Frequenz des Sinustons gewählt. Die Bandbreite der 2 Schmalbandrauschen ist 200 Hz und die spektrale Leistungsdichte ist innerhalb dieser Bandbreite konstant. Das Schmalbandrauschen wurde mit dem Programm Adobe Audition erstellt. Der Entstehungsprozess entspricht dem Abb. 32. Der Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale entspricht dem Abstand zwischen der oberen Grenzfrequenz des niederfrequenten Schmalbandrauschens. Die detaillierten Werte werden in Tabelle 7 gezeigt. In der Tabelle ist z. B. für den Abstand 50 Hz zwischen niederfrequenten und höherfrequenten Schmalbandrauschen berichtet, dass die Bandbreite des niederfrequente Schmalbandrauschen 200 Hz ist (von 1775 Hz bis 1975 Hz), ebenso wie diese der Bandbreite des hochfrequenten Schmalbandrauschen (von 2025 Hz bis 2225 Hz).

In dem Vorgang des Experiments wird die Amplitude des Sinustons reguliert, bei dieser wahrgenommen wird. Danach wird der Abstand der 2 Schmalbandrauschen variiert. Der Vorgang des Experiments wird in Abb. 36 gezeigt. Somit wird für jede Gruppe des Schmalbandrauschens in Tabelle 7 die entsprechende Mithörschwelle bestimmt.



Abb. 36: Der Vorgang der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston

Die Simulationsumgebung ist im Abb. 37 dargestellt. Mit dem Programm Adobe Audition kann Maskierer und maskiertes Signal gleichzeitig übertragen werden. In Abb. 37 ist der erste Kanal der Sinuston, dessen relativer Pegel durch den darunterliegenden Regler verändert werden kann. Darunter Kanäle mit dem Schmalbandrauschsignale (mit den Ordnungszahlen von 1 bis 10 gezeichnet). "L" steht für das niederfrequente Signal und "R" bedeutet höherfrequentes Signal. Der relative Pegel aller Sinustöne beträgt in Audition bei -15 dB.

Die detailierten Ergebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke -Mith örschwelle des Sinustons gezeigt. Für den Abstand der der 2 Schmalbandrauschen von 50 Hz bis 500 Hz bleiben sich lediglich Änderungen des relativen Pegels der Mithörschwelle (Wert der Bereich von -18 dB bis -24 dB). Wenn der Abstand der 2 Schmalbandrauschen größer als 500 Hz ist, sinkt die Mith örschwelle abrupt und sehr deutlich. Verglichen mit dem Ergebnis von Zwicker in Abb. 24 (a)) ist die Verlauf der Mithörschwelle ähnlich. Zuerst bleibt die Kurve auf einem bestimmten Wert, sinkt dann aber ab. Die Frequenzgruppenbreite in diesem Experiment ist ungef ähr 300 Hz bis 500 Hz.



Abb. 37: Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle Sinuston mit Audition



Abb. 38: Mith \ddot{a} schwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

Vorteile der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston: Verglichen mit dem "Band Widening-Experiment" ist die Veränderung der Mithörschwelle deutlicher. Der Umfang der Mithörschwelle ist in einem Bereich von -18 dB bis -49,5 dB. Die Versuchsperson kann die Änderung der Mithörschwelle im Experiment deutlich beobachten. Verglichen mit der "Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen" ist zuerst die Kurve relativ glatt. Schließlich hat die Kurve ein plötzliches abruptes Sinken, wenn der Abstand der 2 Schmalbandrauschen größer als 500 Hz ist.

Der Nachteil der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston: Am Anfang der Kurve gibt es kleine Änderung des relativen Pegels der 43 Mith örschwelle. Im Gegensatz zu Abb. 24 (a) ist der Verlauf der Mith örschwelle in diesen Bereich und der Ergebnisse der Simulation nicht so konstant.

5.2.4 Vergleichung der Methoden und der Ergebnisse der Simulation

In diesem Teil werden es die Ergebnisse obengenannter 3 Testmethoden, Band Widening-Experiment, Maskierung in der Frequenzlücke-Mithörschwelle von Sinuston und Schmalbandrauschen, verglichen (Abb. 39 und Tabelle 8), um eine geeignete Testmethode für das Programm auszuwählen.

Band Widening-Experiments:

Die Ver änderung der Mith örschwelle liegt in einem Bereich von 5 dB. Das Ergebnis zeigt eine starke Abhängigkeit von den Konditionen des Experiments. Kleine Änderungen bewirken hierbei große Fehler. Die Kurve hat nur ein kontinuierlicher Übergang, aber keinen genauen Knickpunkt. Die Stabilität ist schwach.



Abb. 39: Vergleichung der Ergebnisse der Testmethoden

Die Maskierung in der Frequenzlücke-Mithörschwelle von Schmalbandrauschen:
 Die Ver
änderung der Mithörschwelle ist deutlicher. Die Ergebnisse zeigt eine gr
ößere

Variationsbreite (ungefähr 25 dB), deshalb ist die Ergebnisse stabiler. Trotzdem sinkt die Kurve plötzlich und abrupt Sinken ab (bei $\Delta f = 800 \text{ Hz}$), aber der ersten Einstellung ($\Delta f = 50 \text{ Hz}$) ist nicht zufriedenstellend.

> Die Maskierung in der Frequenzlücke-Mithörschwelle von Sinuston:

Die Veränderung der Mithörschwelle ist deutlich, und in diesem Experiment hat sie eine größere Variationsbreite (ungefähr 35 dB). Der Anfang der Kurve ist relativ glatt, trotzdem gibt es kleine Änderungen des relativen Pegels der Mithörschwelle, jedoch nicht so konstant wie der Kurveverlauf bei dem Ergebnissen von Zwicker (vgl. Abb. 24 (a)). Schließlich zeigt die Kurve außerhalb der Frequenzgruppenbreite ein plötzliches abruptes Sinken der Mithörschwelle.

	Maskierung in d	er Frequenzlücke
Band Widening-Experiment	Mith örschwelle des	Mith örschwelle des Sinustons
	Schmalbandrauschens	
Mittenfrequenz f _m ist 2 kHz.	Mittenfrequenz f _m ist 2 kHz.	Mittenfrequenz f _m ist 2 kHz.
Die Ver änderung der Mith ör- schwelle ist innerhalb 5 dB.	Die Ver änderung der Mith ör- schwelle ist innerhalb 25 dB.	Die Ver änderung der Mith ör- schwelle ist innerhalb 35 dB.
Die Kurve hat nur ein	Die Kurve hat ein plätzliches	Die Kurve hat ein plätzliches
kontinuierlicher Übergang.	abruptes Sinken.	abruptes Sinken.
Es gibt keinen genauen Knickpunkt.	Es gibt einen genauen Knickpunkt (Δf = 800 Hz).	Es gibt einen genauen Knickpunkt.
Die Stabilit ät ist schwach.	Das Ergebnis ist stabil.	Das Ergebnis ist stabil.
Der Wert des ersten Punkts ist nicht zufriedenstellend.	Der Wert des ersten Punkts ist nicht zufriedenstellend.	Der Wert des ersten Punkts ist angemessen.
	Die Kurve hat ein plätzliches	Der Anfang der Kurve ist
	abruptes Sinken, aber wenn	relativ glatt. Die Kurve hat ein
	der Abstand der 2 Sinustöne	plötzliches abruptes Sinken,
	800 Hz bleibt.	wenn die 2 Schmalband-
		rauschen außerhalb der
		Frequenzgruppenbreite bleibt.
Frequenzgruppenbereite Δf_c ist etwa 500 Hz	Frequenzgruppenbereite Δf _c ist etwa 400 Hz	Frequenzgruppenbereite Δf _c liegt etwa 300 Hz

Tabelle 8: Vergleichung der Ergebnisse der Testmethoden

Basierend auf den Ergebnissen von Zwicker, ist die Frequenzgruppenbreite 320 Hz, wenn die Mittenfrequenz 2150 Hz ist (siehe Formel 8 und Tabelle 4). Aufgrund der

Ergebnisse der 3 Methoden wird die dritte Testmetode "Maskierung in der Frequenzlüke-Mithörschwelle von Sinuston" für die Programmtechnische Umsetzung ausgewählt.

5.3 Programm

Auf Grund des Ergebnisses in 5.2 wird ein Programm für hörpsychologische Untersuchungen entwickelt, mit dem der Benutzer für eine vorgegebene Mittenfrequenz experimentell die dazugehörige Frequenzgruppenbreite ermitteln kann.

5.3.1 Prinzipieller Versuchsablauf



Abb. 40: Programmablauf

In Abhängigkeit von den im Kapitel 5.2.2 Schritten der Testmethode (vgl. auch Abb. 33), "Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston", wird ein Programmablauf entwickelt. Das Programm soll den Sinuston und die beiden Schmalbandrauschen gleichzeitig darbieten, wobei der Pegel des Sinustons automatisch erhöht werden soll. Wenn der Sinuston gehört wird, drückt die Versuchsperson die Leertaste. Dadurch wird der relative Pegel des Sinustons gespeichert, bzw. die Mithörschwelle des Sinustons. Dann wird das nächste Schmalbandrauschen automatisch übertragen. Wenn der Sinuston gehört wird, drückt die Versuchsperson erneut die Leertaste. So werden alle Mithörschwellen des Sinustons nacheinander abgearbeitet.

Basierend auf dem Programmablauf wie in Abb. 40 gezeigt, werden ein Login-Bildschirm, ein Hinweisfenster, ein Text-Bildschirm und ein Ergebnis-Fenster erstellt (siehe Abb. 41). Der Login-Bildschirm kann die Daten der Versuchspersonen aufnehmen. Die Versuchsperson kann hier den Name eingeben und die Mittenfrequenz auswählen. Das Hinweisfenster wird der Testablauf textlich beschrieben, damit die Versuchsperson den Programmprozess genauer verstehen kann. **Test-Bildschirm** kann die Versuchsperson die Bestimmung Im der Frequenzgruppenbreite für die ausgewählte Mittenfrequenz durchführen. Wenn der Sinuston wahrgenommen wird, best ätigt dies die Versuchsperson durch drücken der Leertaste. Hier wird die Anzahl des lesbar durchgeführten Einzeltests sowie die Voraussetzecke der zu über prüfender Testeinstellung angezeigt. Gleichzeitig wird die Ergebnisansicht als eine Tabelle gezeigt. Diese können als Datei für ein Kalkulationsprogramm, z. B. Excel, auf den Computer gespeichert werden.



Abb. 41: Design des Bildschirms

- (a) Login-Bildschirm
- (b) Hinweisfenster
- (c) Ergebnisansicht
- (d) Test-Bildschirm

In diesem Programm können die Mittenfrequenzen 1 kHz und 2 kHz ausgewählt werden, weil die beide Frequenz in der Mitte des menschlichen Hörbereichs liegen. Das niederfrequente und höherfrequente Schmalbandrauschen mit jeweils der Bandbreite von 200 Hz, haben ausreichend Abstand. Nach den Ergebnissen der Frequenzgruppenbreite von Zwicker beträgt die Frequenzgruppenbreite ungefähr 300 Hz, wenn die Mittefrequenz 2 kHz ist. So wird der Abstand Δf wie in Tabelle 9 ausgewählt. Insgesamt wurden 8 Abstände des Schmalbandrauschen ausgewählt. Alle 16 Rauschsignale wurden mit Adobe Audition erstellt wie in Abb. 32 dargestellt. Danach wurden mit Adobe Audition jeweils für die acht zu untersuchenden Testkonfigurationen, die zusammengehörigen niederfrequenten und hochfrequenten Signale ist eine Datei gespeichert. Wenn die Mittenfrequenz 1 kHz ist, beträgt nach den Ergebnissen von Zwicker die Frequenzgruppenbreite 160 Hz. Auch wird insgesamt 8 Abstände Δf der 2 Schmalbandrauschen wie in Tabelle 10 gezeigt ausgewählt. Die dafür notwendigen Signale werden mit Audition erstellt.

	niederfrequentes Signal		h öherfreque	entes Signal
Abstand	untere	obere	untere	obere
Δf	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz
	f/Hz	f/Hz	f/Hz	f/Hz
50	1775	1975	2025	2225
100	1750	1950	2050	2250
200	1700	1900	2100	2300
300	1650	1850	2150	2350
400	1600	1800	2200	2400
600	1500	1700	2300	2500
800	1400	1600	2400	2600
1600	1000	1200	2800	3000

Tabelle 9: Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale ($f_m = 2 \text{ kHz}$)

Tabelle 10: Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale ($f_m = 1 \text{ kHz}$)

	niederfrequentes Signal		h öherfreque	entes Signal
Abstand	untere	obere	untere	obere
Δf	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz	Grenzfrequenz
	f/Hz	f/Hz	f/Hz	f/Hz
40	780	980	1020	1220
80	760	960	1040	1240
120	740	940	1060	1260
160	720	920	1080	1280
200	700	900	1100	1300
300	650	850	1150	1350
500	550	750	1250	1450
800	400	600	1400	1600

5.3.2 Kalibrierung und Messung der Schallsignale



(c)

(d)

- Abb. 42: Die Geräte zur Bestimmung des absoluten Schalldruckpegels
- (a): Kunstkopf-Messsystem von HEAD Acoustics (HMS II.3)
- (b): Schalldruckpegelmessger ä (NTI XL2)
- (c): Mikrofonvorverst ärker
- (d): Kalibrator 4231 von Brüel & Kjaer

Um die eigenen Messeergebnisse vergleichen zu können, soll diesen sowie in dem Experiment von Zwicker der Schalldruckpegel (SPL) jedes Schmalbandrauschen 50 dB betragen. Die Kalibrierung des Experimentsystems erfolgt mit den in Abb. 42 dargestellten Messevorrichtung. Abb. 42 (a) zeigt das Kunstkopf-Messsystem (HMS II.3) von HEAD Acoustics. Im künstlichen Ohr ist ein Mikrophon, das die Schallereignisse des Kopfhörers empfangen kann. Abb. 42 (b) zeigt das 42 Schalldruckpegelmessger ät. Abb. (c) ist ein Vorverst ärker, der das Schalldruckpegelmessger ät und das Kunstkopf-Messsystem durch ein Verbindungkabel zusammenführt, um die Schalldruckpegel (SPL) im Kopfhörer zu testen. Aber mit den Geräten können wir hier nur den Schalldruckpegel (SPL) einer Seite der Kopfhörer messen. In dieser Arbeit wurde allein die rechte Seite der

Kopfhörer gemessen [Hea11]. Bevor wir das Kunstkopf-Messsystem benutzen, muss eine Kalibrierung gemacht werden. Abb. 42 (d) zeigt den das Pistonphon (Kalibrator 4231 von Brüel & Kjaer), der ein 1 kHz-Ton mit einem Schallpegel von 94 dB erzeugt. Das Pistonphon ist mit einer Hülse aus Aluminium, mit dem künstlichen Ohr verbunden.

Tabelle 11: Messeergebnisse des Kunstkopf-Messsystems von HEAD Acoustics (HMS II.3) für dem erzeugten 1 kHz-Ton des Pistonphons

rechtes Ohr	SPL	94.5 dB
linkes Ohr	SPL	94.6 dB

Tabelle 11 zeigt die Messwerte der Kalibration des Kunstkopf-Messsystems. Abhängig von der Eigenschaft des Pistonphons erzeugt es einen 1 kHz-Ton, dessen Schalldruckpegel 94 dB ist. Durch Verwendung der Aluminiumhülle wird für das Kunstkopf-Messsystem nach Hersteller nochmals 0,5 dB addiert. Die zusätzliche Dämpfung ist 0,5 dB. Verglichen mit Tabelle 11 ist der Schalldruckpegel gleich Messwert minus 1 dB ist (bzw. 93,5 dB).

Der Schalldruckpegel des Schmalbandrauschens kann man mit dem Kunstkopf-Messsystem ermittelt werden. Die Messeergebnisse sind im Anhang 4 (Kalibrierung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)) und im Anhang 5 (Kalibrierung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)) gezeigt. Basierend auf den Experiment angaben von Zwicker, soll der Schalldruckpegel jedes Schmalbandrauschen 50 dB betragen. Nach der Kalibration bleibt der Schaldruckpegel der Schmalbandrauschsignale in diesem Programm 50±3 dB.



Abb. 43: Die Kontrolle der Lautst ärke für ALC262 [Rea05]

Zur Einstellung der Testsignale wurde der Schalldruckpegel auch durch die A-Bewertung dargestellt, weil die A-Bewertung das niederfrequente Geräusch gut dämpfen kann. Wie die Messeergebnisse im Anhang 4 und 5 zeigten, kann für das Experimentsystem ein Schalldruckpegel für alle Schmalbandrauschsignale von ungefähr 50 dB angegeben werden. Die 1 kHz und 2 kHz Sinussignale werden auch mit dem Programm Adobe Audition erstellt. Dadurch das Programm kann der relativen Pegel reguliert werden. Für die Sinussignale wurde analog zu der Messung der Schmalbandrauschsignale der absolute Schalldruckpegel gemessen.

Im eignen Messesystem wurde die Soundkarte Realtek ALC262 @ Intel 828011 (ICH9) verwendet. Abb. 43 zeigt die Theorie der Kontrolle der Lautst ärke für LC262. Die Lautst ärke reguliert über eigene Systemsteuerung. Die maximale Spannung ist 5 V. Durch die Änderung des Stellwiderstandes wird das Verhältnis von der Eigenspannung und maximale Spannung geregelt. Der Volumen Code wird durch den ADC (engl. Analog-to-Digital Converter) erzeugt und steuert die Lautst ärke. Für Untersuchungen war Lautst ärkeregler am Notebook auf 100 % eingestellt.

5.3.3 Programmentwicklung

Auf Basis vor beschreibenden Programmablauf (Abb. 40) und denn Konzeptdesign der Programmoberfläche (Abb. 41), das Programm "Bestimmung der Frequenzgruppenbreite" entstanden. Mit diesem Programm kann die Versuchsperson das Experiment automatisch durchführen. Folgend wird das Programm ausführeich dargestellt, und es wird gezeigt, dass diese Programmentwicklung vom Programmablauf und dem Design des Programmfensterns eng abhängt. Der Testablauf wurde so implementiert wie er sie in der Simulation benutzt wurde.



Abb. 44: Start-Bildschirm

Die Versuchsperson kann die Datei "Bestimmung.exe" doppelklicken, um die

Software zu starten. In der ganzen Durchf ührung des Programms muss die Lautst ärke konstant bleiben (Betriebssystem: maximaler Wert), was die wichtigste Voraussetzung ist. Dann wird der erste Bildschirm wie Abb. 44 gezeigt. In diesem Fenstern werden alle Informationen über dieses Experiment deutlich dargestellt. Mit klicken der Reiter ("1"), kann der Start-Bildschirm oder die Anzeige der Ergebnisse ausgewählt werden. "2" ist ein Button "Neuer Test". Wenn die Versuchsperson diese Schaltfläche klickt geht es zum nächsten Schritt, und ein neuer Bildschirm öffnet sich. "3" gibt zus ätzlich die Anweisung zu diesem Schritt. Nachdem die Versuchsperson die Schaltfläche "Neuer Test" geklickt hat, wird der Login-Bildschirm wie Abb. 45 angezeigt.

Login Bitte geben Sie Ihre (1000 Hz oder 2000 Hz,	en Namen ein und wählen Sie die verwendete Mittenfrequenz aus. Klicken Sie anschließend auf "Weiter"!
Name: Mittenfrequenz:	▼ 1 kHz 2 kHz
	Weiter

Abb. 45: Login-Bildschirm

Tipps			
Nächster Schritt werden Ihnen verschiedene schmalbandige Rauschsignal	e präsentiert.		
Zusätzlich wird der Testton (Sinussignal) eingespielt. Wenn sie diesen Testton			
automatisch in die nächste Testeinstellung (insgesamt 16) gewechselt.	wu u		
Um einen auditiven Eindruck vom Schmalbandrauschen und dem Sinussignal zu bekommen, können Sie diese hier durch klicken auf den jeweiligen Button anhören.			
Bitte klicken Sie auf "Weiter", um den Test zu starten.			
Bitte klicken Sie auf "Weiter", um den Test zu starten.			
Bitte klicken Sie auf "Weiter", um den Test zu starten.			

Abb. 46: Hinweisfenster

Im Login-Fenster kann die Versuchsperson seinen Name eingeben und die zu testende Mittenfrequenz auswählen. In diesem Programm werden 1 kHz und 2 kHz unterst ützt. Wenn es nötig ist, können auch andere Mittenfrequenzen hinzugef ügt werden. Wenn die Versuchsperson keinen Namen oder keine Mittenfrequenz auswählt, kann der Test nicht fortgesetzt werden. Wenn dieser Login-Fenster direkt geschlossen wird, geht es zur ück zum Start-Bildschirm. Nachdem die Versuchsperson den Namen eingegeben hat muss die Mittenfrequenz ausgewählt werden und der Button "Weiter" geklickt werden. Dann wird das Hinweisfester wie Abb. 46 gezeigt. Darin werden die nächsten Schritte ausführeich beschrieben. Wenn die Versuchsperon die Schaltfläche "Schmalbandrauschen" oder "Sinussignal" klickt kann ein Beispielsignal gehört werden. Das klicken auf "Stop" kann beendet die Widergabe. Wenn dieser Bildschirm direkt geschlossen wird, springt es zum ersten Bildschirm zurück. Klickt die Versuchsperson die Schaltfläche "Weiter", geht es zum nächsten Schritt Test Bildschirm (Abb. 47).



Abb. 47: Test-Bildschirm

Im Test-Bildschirm kann die Versuchsperson nur die Ordnungszahl des Tests in der Mitte z. B. "9/16" sehen. Es zeigt den Prozessfortschritt des Tests an. Die anderen Informationen sind nicht zugeben gleich (z. B. auf den Test die Reiter funktionieren nicht), damit sich die Versuchsperson auf den Test konzentrieren kann. Nach der die Öffnung des **Test-Bildschirms** wird Versuchsperson zuerst ein Schmalbandrauschen hören. Gleichzeitig wird das Sinussignal dargeboten, aber der relative Pegel ist sehr gering, weshalb er nicht wahrgenommen wird. Der relative Pegel des Sinussignals wird automatisch immer lauter. Wenn die Versuchsperson das Sinussignal hören kann, drückt sie die Leertaste. Das Programm macht automatisch weiter und speichert gleichzeitig den relative Pegel des Signals, bzw. die Mitth örschwelle des Sinussignals. In diesem Programmwird für jeder Frequenzabstand 2 mal der Wert der Mithörschwelle bestimmt. So werden insgesamt 16 Mithörschwellen bestimmt. Schließlich werden die Ergebnisse in der Ergebnisansicht (siehe Abb. 48) als eine Tabelle gezeigt.

Weil die Frequenz des Sinustons konstant ist, hängt der relative Pegel nur von der Amplitude (Spannung) ab. Der relative Pegel ist gleich dem 20fachen logarithmischen Verhältnis der gemessenen Spannung und der maximaler Spannung der Soundkarte in diesem Programm. Die Spannung der Soundkarte ist 5 V, wir teilen die 5 V in 100 Teile und jede Sekunde steigt die SoundkarteLautstärke um 1%. Der Prozess wird mit dem Software Visual Basic durch folgende Programmierung erreicht:

If MaskedPlayer.Volume < 1 Then

MaskedPlayer. Volume += 0.01'steigende Geschwindigkeit der Lautst ärke Else

Der relative Pegel der Mithörschwelle basiert auf die Definition des relativen Pegels und wird nach folgendem Programm berechnet:

Private Function Cal(ByVal value As Double) As Double Return 20 * Math.Log10(value / 100)' Definition des relativen Pegels End Function

Während der Durchführung des Tests wird jedes Paar von Schmalbandrauschen 2 Mal dargeboten. Die Reiterfolge der Maskierungssignale erscheint der Versuchsperson zufällig, damit diese keine Erwartungen an die Testeinstellung stellen kann. Im Folgenden ist ein Programmierbeispiel für 1 kHz gegeben:

Select Case i

Case 5 fileName = "40.wav" Case 2 fileName = "80.wav" Case 7 fileName = "120.wav" Case 14 fileName = "160.wav" Case 1 fileName = "200.way" Case 11 fileName = "300.wav" Case 8 fileName = "500.wav" Case 3 fileName = "800.wav" Case 16 fileName = "40.wav" Case 6 fileName = "80.wav" Case 9 fileName = "120.wav" Case 10 fileName = "160.wav" Case 4 fileName = "200.wav" Case 13 fileName = "300.wav" Case 15

```
fileName = "500.wav"
Case 12
fileName = "800.wav"
End Select
Else
```



Abb. 48: Ergebnisanzeige

In diesem Programm hängt der Wert jeder Mithörschwelle nur von dem Abstand der 2 Schmalbandrauschen ab. Wenn alle 8 Mithörschwellen (je 2 Werte pro Frequenzabstand) abgefragt wurden, springt das Programm zum dem Start-Bildschirm zur ück. Die Versuchsperson kann einen neuen Testen machen oder sich die Ergebnisse ansehen.

In Abb. 48 zeigt "1" die Ergebnisse, bzw. der relative Pegel der Mithörschwellen des Sinustons. Die Ergebnisse werden in einer Reihe dargestellt. In dieser Tabelle können die Daten der Versuchspersonen, Information der Mittenfrequenz, der Abstand der 2 Schmalbandrauschsignal und relativen Pegel der Mithörschwellen des Sinustons eingesehen werden. Die Einheit der Mithörschwelle ist dB. "2" zeigt die Schaltfläche "Speichern". Nachdem die Versuchsperson "Speichern" gedrückt hat, werden alle Daten als ein Excel-Tabelle automatisch speichert.

5.3.4 Das Ergebnis und die Analyse

Unter den gleichen Konditionen wie Abschnitt 5.1 beschrieben haben 10 Versuchspersonen mit dem entwickelten Programm des Test für die Mittenfrequenz 1 kHz und 2 kHz im ruhigen Labor durchgeführt.

Für die Mittenfrequenz $f_m = 2$ kHz wird das Ergebnis in Anhang 6 dargestellt. Der daraus resultierende relative Pegel der Mithörschwelle des Sinustons wird in Abb. 49 gezeigt. Der Wert der Mithörschwelle des Sinustons bleibt im Bereich von -16 dB bis

-19,5 dB, wenn der Abstand der 2 Schmalbandrauschen im Bereich von 50 Hz bis 300 Hz bleibt. Es gibt also nur kleine Änderungen des relativen Pegels der Mithörschwelle. Wenn der Abstand der 2 Schmalbandrauschen größer als 300 Hz ist, sinkt die Mithörschwelle abrupt und sehr deutlich.



Abb. 49: Relativer Pegel der Mith \ddot{a} rschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

Die Mith örschwelle in diesem Programm wird durch den relativen Pegel dargestellt. Die absoluten Pegel bzw. Schalldruckpegel (SPL) können durch die Kalibrierung des Experimentiersystems (vgl. Abschnitt 5.3.2) zugeordnet werden. Das Ergebnis der Lautst ärkemessung des Sinustons wird in Tabelle 12 dargestellt. Wir können die Abhängigkeit zwischen dem relativen Pegel im Programm und dem Schalldruckpegel (SPL) des Sinustons deutlich sehen. Alle gemessenen Werte sind korrekturwert (minus 1 dB vgl. 5.3.2).

10	e	
Verh ältnis	relativer Pegel /dB	Schalldruckpegel SPL /dB
0		14.9
0.01	-40	23.1
0.03	-30.46	32.3
0.1	-20	42.8
0.2	-13.98	48.9
0.5	-6.02	56.8
1	0	62.8

Tabelle 12: Schallpegelmessung des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

Basierend auf Tabelle 12 können wir die absoluten Werte im Tabelle 13 bestimmen. Tabelle 13 zeigt den Mittelwert über 10 Versuchspersonen. Die Kurve der Mithörschwelle wie in Abb. 50 (b) zeichnen. Verglichen mit dem Ergebnis von Zwicker in Abb. 50 (a) ist die Veränderung der Mithörschwelle innerhalb 25 dB. Zuerst bleibt der Schalldruckpegel (SPL) der Mithörschwelle des Sinustons auf einem bestimmten Wert. Wenn der Abstand des Schmalbandrauschens Δf größer als 300 Hz ist, sinkt der Schalldruckpegel (SPL) abrupt. Basierend auf dem Frequenzgruppenmodel (critical band model) und den Ergebnissen von Zwicker trägt zur Verdeckung eines Testtones nur der Maskierer innerhalb einer kritischen Bandbreite (Frequenzgruppenbreite) bei. Auch aus dessen Ergebnissen ist ersichtlich, dass die Frequenzgruppenbreite ungef ähr 300 Hz ist.

Versuchspersonen 100 Abstand/Hz 50 200 300 400 600 800 1600 Relativer Pegel/dB -16 -17 -19.5 -16 -22 -28.5 -33 -38

46

43

41

34

29

25

47

47

Tabelle 13: Messung der Mithörschwelle (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$); Mittelwerte über 10



Abb. 50: Mith \ddot{a} rschwelle von Sinuston (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

(a) Ergebnisse von Zwicker

SPL/dB

(b) Eigne Messeergebnisse

Das bemerkenswerte Phänomen bei der Messung des Sinustons ist, dass der Schalldruckpegel gleich 14,9 dB in einer ruhigen Umgebung ist (siehe Tabelle 12). Der letzte Wert der experimentellen Ergebnisse, bzw. der Schalldruckpegel der Mithörschwelle ist 25 dB, wenn der Abstand der Schmalbandrauschen 1600 Hz beträgt. Aber durch die Software besteht keine Möglichkeit kleine Änderungen für niedrige Schalldruckpegel vorzunehmen. Bereits für eine Lautstärke erfolgt dabei in 1%-Schnitten.

Für die Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$ wird das Ergebnis im Anhang 7 gezeigt. Der daraus resultierende relative Pegel der Mithörschwelle des Sinustons wird in Abb. 51 gezeigt. Der Wert der Mithörschwelle des Sinustons bleibt im Bereich von -18 dB bis -19 dB, wenn der Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale in Bereich von 50 Hz bis 160 Hz bleibt. Es treten lediglich kleine Änderungen des relativen Pegels der Mithörschwelle auf. Wenn der Abstand des 2 Schmalbandrauschens größer als 160 Hz ist, sinkt die Mithörschwelle abrupt und sehr deutlich.

Schließlich können hier die relativen Pegel der Mithörschwelle auch nach die absolute Pegel bzw. Schalldruckpegel (SPL) ausgegeben werden. Die Ergebnisse des kalibrierten Messesystems sind in Tabelle 14 dargestellt.



Abb. 51: Relativer Pegel der Mith örschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)

10	E X	
Verh ältnis	relativer Pegel /dB	Schalldruckpegel SPL /dB
0		16.1
0.01	-40	20.9
0.03	-30.46	28.3
0.1	-20	38.5
0.2	-13.98	44.4
0.5	-6.02	52.4
1	0	58.4

Tabelle 14: Schallpegelmessung des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)

Basierend auf Tabelle 14 können wir die Pegelwerte in Tabelle 15 errechnen. Tabelle 15 zeigt die Mittelwerte über 10 Versuchspersonen. Die Kurve der Mithörschwelle ist in Abb. 52 gezeigt. Das Ergebnis für die Frequenzgruppenbreite ist vergleichbar mit dem Ergebnis von Zwicker in Tabelle 4. Dieser gibt die Frequenzgruppenbreite von 160 Hz für die Mittenfrequenz 1 kHz an.

Tabelle 15: Messung der Mithörschwelle (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$); Mittelwerte über 10 Versuchspersonen

Abstand/Hz	40	80	120	160	200	300	500	800
Relativer Pegel/dB	-19	-18	-18	-19	-23	-27	-33	-37
SPL/dB	39.5	40.5	40.5	39.5	35.5	31.5	25	20

Ähnlich wie bei 2 kHz beträgt der Schalldruckpegel gleich 16,1 dB in einer ruhigen Umgebung, wie Tabelle 13 und Tabelle 15 zeigen. Der Schalldruckpegel der Mithörschwelle ist 20 dB, wenn der Abstand des Schmalbandrauschen 800 Hz beträgt. Es gibt keine Möglichkeit, dass die tatsächliche Mithörschwelle des Sinustons kleiner als dieser Wert ist.



Abb. 52: Mith $\ddot{\alpha}$ schwelle von Sinuston (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)

Schließlich gibt es folgende einige Verbessrungsmöglichkeit des Programms:

Die Mithörschwelle ist in diesem Programm mit dem relativen Pegel dargestellt und wird schließlich dem Wert nach in die absoluten Pegel bzw. Schalldruckpegel (SPL) umgewandelt. Weiter kann die Mithörschwelle in diesem Programm direkt mit dem Schalldruckpegel dargestellt wird.

Im Programm hat der Computer keine Möglichkeit kleiner als 23,1 dB (für 2 kHz) und 20,9 dB (für 1 kHz) Schalldruckpegel zu erreichen. (Kleiner als 23.1 dB) Weiter kann die Soundkarte verbessen, um niedrigen Schalldruck erreichen.

Damit der relativen Pegel des Sinustons ändern, regelt es in diesem Programm Spannung der Soundkarte, wir teilen die Spannung (5V) in 100 Teile und jede Sekunde steigt die Soundkarte 1%. Weiter kann die Teilung vermehren, um das Ergebnis genauer zu sein.

Jetzt kann die Frequenzgruppenbreite für 2 Mittenfrequenzen (1 kHz und 2 kHz) ermittelt werden. Weiter kann die Mittenfrequenz vermehren.

6. Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit besteht darin, die Abhängigkeit der Frequenzgruppenbreite von der und Mittenfrequenz zu untersuchen. Schließlich wurde in der vorliegenden Arbeit ein Programm für hörpsychologische Untersuchungen entwickelt, mit dem der Benutzer für eine vorgegebene Mittenfrequenz experimentell die dazugehörige Frequenzgruppenbreite ermitteln kann.

Für den jungen gesunden Menschen ist der Hörbereich zwischen 16 Hz und 16 kHz. Die Kombinationen des Frequenzbereichs und Pegelbereichs des Schall, der vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden kann, wird als Hörfläche bezeichnet. Die Grenzlinie der Hörfläche ist die menschlichen Schmerzgrenze (engl. Threshold of pain) und die Ruhehörschwelle (engl. Hearing threshold). Wenn gleichzeitig mehrere komplexe Schallereignisse auftreffen, liegt ein Phänomen, welches als Verdeckung (engl. masking) bezeiget wird, vor. Die Verdeckung hat zwei Kategorien, die simultane Verdeckung (engl. simultaneous masking) und zeitliche Verdeckung (engl. non-simultaneous masking or temporal masking). Für die simultane Verdeckung gilt, wenn ein Schall gleichzeitig unter den Einfluss anderer Schalle ist, ändert sich deren Mithörschwelle. Die Mithörschwelle wird definiert als die Wahrnehmbarkeit eines Schalles (maskiertes Signal oder Testton) unter den Einfluss anderer Schallsignale (Maskierer).

Wenn die Frequenzen der Komponenten eines Schallsignals ann ähernd gleich sind, bzw. die Bandbreite der dargebotenen Stimuli unter einem kritischen Wert liegt, ist das Phänomen der Verdeckung existent. Auf Grund der physiologischen und funktionalen Eigenschaften des Gehörs hat Fletcher ein Filtermodell des Gehörs vorgeschlagen. Das menschliche Innenohr funktioniert als eine Reihe paralleler akustische Filter entlang der Basilarmembran des menschlichen Ohrs. Jeder Filter auf der Basilarmembran hat jeweils unterschiedliche Mittenfrequenzen. Der menschliche Frequenzbereich wahrnehmbare wird in 24 Gruppen geteilt. Jede der Frequenzgruppen hat eine bestimmte Bandbreite, bzw. Frequenzgruppenbreite (engl. critical bandwidth). Der Zusammenhang zwischen Frequenzgruppenbreite und Lage auf Basilarmembran kann durch Formel der Tonheit (Bark oder mel) rechnet werden kann. Es gibt viele messtechnische Bestimmungen der Frequenzgruppenbreite, z. B. das Band Widening-Experiment von Fletscher, Bestimmung der Frequenzgruppenbreite an der Ruhehörschwelle, Bestimmung durch Maskierung in der Frequenzlücke, Bestimmung durch binarales Hören.

Auf den gezeigten Theorien basierend wurden 3 praktische Simulation gemacht. Die erste Testmethode ist das Band Widening-Experiment. Das Ergebnis zeigt eine starke Abhängigkeit von den Konditionen des Experiments, kleine Änderungen können große Fehler bewirken. Die Mithörschwelle hat einen kontinuierlichen Übergang, aber es gibt keinen genauen Punkt zu bestimmung der kritischen Bandbreite. Die zweite Testmethode ist die "Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen". Die Veränderung der Mithörschwelle ist deutlicher, aber das Ergebnis hat eine größere Variationsbreite. Die Mithörschwelle hat keinen deutlich fallenden Verlauf außerhalb der Frequenzgruppenbreite. Die dritte Testmethode ist die "Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Sinuston. Die Veränderung der Mithörschwelle ist sehr deutlicher. Die Mithörschwelle hat außerhalb der Frequenzgruppenbreite schwelle hat außerhalb der Frequenzgruppenbreite ein plötzliches abruptes Sinken.

Vergleicht man die Ergebnisse, die Versuchsdurchführung und die Stabilität der 3 Methoden, so ist die dritte Testmetode (Maskierung in der Frequenzlüke -Mithörschwelle von Sinuston) an geeignetsten für die Programmsetzung. Mit dir entwickelten Software kann der Benutzer für eine vorgegebene Mittenfrequenz experimentell die dazugehörige Frequenzgruppenbreite ermitteln. Die Mithörschwelle wird in diesem Programm mit dem relativen Pegel dargestellt. Für das verwendete kalibrierte Experimentsystem können schließlich die absoluten Pegel bzw. Schalldruckpegel (SPL) angegeben werden. Diese Ergebnisse sind mit den Literaturangaben vergleichbar.

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Die Anatomie des menschlichen Ohrs [Mul09]	3
Abb. 2: Die Geh ärkn ächelchen [Str07]	4
Abb. 3: Die Anatomie der Schnecke und der Querschnitt [Bei02], [Pro08]	5
Abb. 4: Längsschnitt der Schnecke [Gör06]	5
Abb. 5: Aufbau des Cortischen Organs [Pro08]	6
Abb. 6: Relativbewegung der Basilarmembran und der Tektorialmembran [Eic11]	6
Abb. 7: Ordnung und Verbindungen der äußeren Haarzellen und der inneren Haarzellen	7
Abb. 8: Die inneren Haarzellen und die äußere Haarzellen [Pro08]	8
Abb. 9: Wanderwellen verschiedener Frequenz [Sch12]	9
Abb. 10: Hörfläche des Menschen [G ör06]	15
Abb. 11: die Abh ängigkeit zwischen Frequenz und Tonh öhe [Zwi07]	16
Abb. 12: Kurven gleicher Lautst ärke (Isophone) [Z ür04]	17
Abb. 13: Der Zusammenhang zwischen Lautst ärke (phon) und der Lautheit (sone) [Zür04]	.18
Abb. 14: A-, B-, C-, D-Bewertungsfilter [Sch10]	18
Abb. 15: Zeitliche Verdeckung und die simultane Verdeckung [Ebe07]	20
Abb. 16: Mith örschwelle für reiner Sinuston bei frequenzgruppenbreitem Rauschen	21
Abb. 17: Mith örschwelle bei weißem Rauschen und reinem Sinuston [Zwi07]	21
Abb. 18: Idealer und realer Filter [Kau03]	23
Abb. 19: Zusammenhang zwischen Tonheit und Frequenzgruppen [Zwi07]	24
Abb. 20: Abh ängigkeit der Frequenzgruppenbreite von der Mittenfrequenz [Zwi99]	25
Abb. 21: Das Ergebnis von Band Widening-Experiment [Moo95]	27
Abb. 22: Ruheh örschwelle komplexer Signale [Zwi07]	28
Abb. 23: Die Lautheit eines Rauschens mit unterschiedlicher Bandbreite [Zwi07]	29
Abb. 24: Maskierung in der Frequenzlücke [Zwi07]	30
Abb. 25: Amplitudenmodulation (AM) und Frequenzmodulation (FM) [Fri07]	31
Abb. 26: Grade wahrnehmbare Modulation einer Frequenz- und Amplitudenmodulation	32
Abb. 27: Diffusfeld-Übertragungsmaßdes Kopfhärers (Sennheiser HD 280) [Sen06]	34
Abb. 28: Die Entstehung des bandbegrenzten Rauschsignals	35
Abb. 29: Der Vorgang des Band Widening-Experiments (nach [Rei09])	36
Abb. 30: Simulation des Band Widening-Experiments mit Audition	36
Abb. 31: Mith \ddot{a} rschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	37
Abb. 32: Die Entstehung des Schmalbandrauschens	38
Abb. 33: Der Vorgang der Maskierung in der Frequenzlücke - Schmalbandrauschen	39
Abb. 34: Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke - Schmalbandrauschen	40
Abb. 35: Mith \ddot{a} rschwelle des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	40
Abb. 36: Der Vorgang der Maskierung in der Frequenzlücke - Sinuston	42
Abb. 37: Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke - Sinuston	43
Abb. 38: Mithärschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	43
Abb. 39: Vergleichung der Ergebnisse der Testmethoden	44
Abb. 40: Programmablauf	46
Abb. 41: Design des Bildschirms	47

Abb. 42: Die Ger äte zur Bestimmung des absoluten Schalldruckpegels	49
Abb. 43: Die Kontrolle der Lautst ärke für ALC262 [Rea05]	
Abb. 44: Start-Bildschirm	51
Abb. 45: Login-Bildschirm	
Abb. 46: Hinweisfenster	
Abb. 47: Test-Bildschirm	53
Abb. 48: Ergebnisanzeige	55
Abb. 49: Relativer Pegel der Mith örschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz	$f_{\rm m} = 2 \text{ kHz})56$
Abb. 50: Mithärschwelle von Sinuston (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	57
Abb. 51: Relativer Pegel der Mith örschwelle des Sinustons (Mittenfrequenz	$f_{\rm m} = 1 \rm kHz)58$
Abb. 52: Mithärschwelle von Sinuston (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)	59

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Typische Werte für den absoluten Schalldruckpegel [Gör06]	13
Tabelle 2: Zusammenhang zwischen psychologischen und physikalischen Größen [Gör)6].14
Tabelle 3: Pegelzunahme bei mehren gleich lauten Schallquellen [Gör06], [URL4]	22
Tabelle 4: Abh ängigkeit der Frequenzgruppenbreite von der Mittenfrequenz [Zwi07]	26
Tabelle 5: Der Bandbreite des bandbegrenzte Rauschsignals ($f_m = 2 \text{ kHz}$)	35
Tabelle 6: Der Abstand zwischen die 2 Sinust öne und die Frequenz der 2 Sinust öne	39
Tabelle 7: Der Abstand zwischen die 2 Schmalbandrauschsignale	41
Tabelle 8: Vergleichung der Ergebnisse der Testmethoden	45
Tabelle 9: Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale ($f_m = 2 \text{ kHz}$)	48
Tabelle 10: Abstand der 2 Schmalbandrauschsignale ($f_m = 1 \text{ kHz}$)	48
Tabelle 11: Messeergebnisse des Kunstkopf für dem 1 kHz-Ton des Pistonphons	50
Tabelle 12: Schallpegelmessung des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	56
Tabelle 13: Messung der Mith örschwelle (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)	57
Tabelle 14: Schallpegelmessung des Sinustons (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)	58
Tabelle 15: Messung der Mith örschwelle (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)	58

Literaturverzeichnis

- [Arn05] Arnold, Wolfgang: Checkliste Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Thieme, 2005.
- [Bei02] Beier, Max: Handbuch der Zoologie. Walter de Gruyter, 2002.
- [Bos03] Bosi, Marina: Introduction to Digital Audio Coding and Standards. Springer, 2003.
- [Cla03] Clark, Graeme: Cochlear Implants: Fundamentals and Applications. Springer, 2003.
- [Eic06] Eichler, Hans Joachim: Das Neue Phasikalische Grundpraktikum. Springer, 2006.
- [Eic11] Eichhorn, Th.: Vorlesung "Hören als biologische Voraussetzung für menschliche Kommunikation". BTU, 2011
- [Ern04] Ernst, Peter: Germanistische Sprachwissenschaft. WUV, 2004.
- [Fri07] Friesecke, Andreas: Die Audio-Enzyklop ädie. Walter de Gruyter, 2007
- [Gek10] Gekle, Michael: Taschenlehrbuch Physiologie. Georg Thieme Verlag, 2010.
- [Gel09] Gelfand, Stanley: Essentials of Audiology. Thieme, 2009.
- [Gör06] Görne, Thomas: Tontechnik. Fachbuchverlag Leipzig, 2006.
- [Hav09] Havelock, David: Handbook of Signal Processing Acoustics. Springer, 2009.
- [Hea11] Head acoustics: Datenblatt HMS II.3. Head acoustics, 2011.

http://www.head-acoustics.de/de/telecom_hms_II_3.htm (1.10.2012)

- [Her09] Herrmann, Marcus: Psychoakustik und Sound-Engineering. GRIN Verlag, 2009.
- [Hop12]Hopper, Konrad: Das Weber-Fechner'sche Gesetz unter besonderer Berücksichtigung des Weber'schen Gesetzes. 2012.

http://www.elmer-herzig.de/wp-content/uploads/2012/03/Hoppe-posthum1.p df (16.10.2012)

- [Kal98] Kalivoda, Manfred T.: Taschenbuch Der Angewandten Psychoakustik. Springer, 1998.
- [Kau03] Kauer, Sebastian: Entwicklung einer Multimedia-Lehranwendung zur Psychoakustik: Auditive Wahrnehmung und die Rolle Kritischer Bandbreiten. Technische Universit ät Berlin, 2003.

http://www.netaudio.de/psychoakustik/Daten/dokumentation/Magisterarbeit_ kritische_Bandbreiten.pdf (2.10.2012)

- [Köh10] Köhler, Thomas: Medizin für Psychologen und Psychotherapeuten. Schattauer, 2010.
- [Kr ü06] Kr üger, Friedrich: Schall- und Ersch ütterungsschutz im Schienenverkehr. Expertverlag, 2006.
- [Lie88] Lieberman, Philip: Speech Physiology, Speech Perception, and Acoustic Phonetics. Cambridge University Press, 1988.
- [Lüd08] Lüders, Klaus: Pohls Einführung in die Physik. Mechanik, Akustik und Wärmelehre, Springer, 2008.
- [Ma04] Ma, Daxian: Speak of science and technology. Qing Hua Universitä, 2004.
- [Moo95] Moore, Brian C. J.: Hearing. Academic Press, 1995.
- [Mul09] Muller, Claudine: Ein hörgeschädigtes Kind in meiner Klasse. Centre de Logopedie, 2009.
- [Nak95] Nakagawa, Seiichi: Speech, Hearing and Neural Network Models. IOS Press, 1995.
- [Pro08] Probst, Görne: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Georg Thieme, 2008.
- [Rea05] Realtek Semiconductor Corp.: 2+2 Channel High Definition Audio Codec Datasheet. Realtek, 2005.
- [Rei09] Reichel, Uwe: Skript "Perzeptive Phonetik Psychoakustik 2". LMU München, 2009.
- [Sch10] Schenk, Joachim: Mensch-Maschine-Kommunikation: Grundlagen von sprach- und bildbasierten Benuterschnittstellen. Springer, 2010.
- [Sch12] Schreier, Ernst: Schwingungslehre in Kursstufe.

http://schreier.free.fr/pages/physik/musik/papers/schwingungslehre_kap4.pdf (24.9.2012)

- [Sen06] Sennheiser: HD 280 Bedienungsanleitung. Sennheiser electronic GmbH, 2006.
- [Ste00] Stevens, Kenneth N.: Acoustic Phonetics. MIT Press, 2000.
- [Str07] Strepp, Kai: Auditive Wahrnehmungsst ärungen Im Schulrelevanten Kontext. GRIN, 2007.
- [Ter98] Terhardt, Ernst: Akustische Kommunikation. Springer, 1998.
- [Wan06] Wang, Boxiong: Engineering Measurement Technology. Qing Huan Universität, 2006.
- [Wer99] Werkmann, Martin: Zur Entstehung und Quantifizierung rauher Geräuschkomponenten von Verbrenungsmotoren. Expert Verlag, 1999.
[Zür04] Zürcher, Christoph: Bauphysik. Bau und Energie, vdf, 2004.

- [Zwi99] Zwicker, Eberhard: The Ear as a Communication Receiver. Acoustical Society of America, 1999.
- [Zwi07] Zwicker, Eberhard: Psychoacoustics. Springer, 2007.
- URL1: <u>http://www.bksv.com/products/transducers/acoustic/calibrators/4228.aspx</u> (16.10.2012)
- URL2: <u>http://www.abi-physik.de/buch/wellen/grundlegende-eigenschaften/</u>(16.10.2012)
- URL3: <u>http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegelaenderung.htm</u> (18.10.2012)
- URL4: http://www.sengpielaudio.com/Rechner-pegeladdition.htm (21.10.2012)
- URL5: <u>http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/psychoak/psychoak16.htm</u> (21.10.2012)

	Varauchanaraan	Alton	Casablaabt		Bandbreite Δf/Hz								
	Versuchsperson	Alter	Gesenheem	50	100	200	300	400	500	800	1600	2000	3200
	1	27	W	-30.9	-27	-23.1	-22.5	-23.7	-24.5	-22.5	-22.8	-22.8	-21
	2	27	W	-21.9	-24.6	-21.6	-22.8	-21.3	-19.5	-20.4	-24	-19.5	-27.6
	3	28	W	-22.5	-23.7	-24	-25.5	-22.5	-25.2	-21.6	-27.6	-26.4	-27.6
	4	28	w	-24	-24.6	-23.1	-24	-24.9	-21.6	-24.3	-24.9	-23.1	-24.9
	5	28	w	-24.6	-24.6	-21.9	-21	-24.6	-21.3	-22.8	-25.2	-29.4	-22.8
dB	6	28	W	-21	-24.6	-25.8	-24.9	-21	-24.6	-22.2	-22.8	-25.2	-22.5
gel/	7	24	W	-25.5	-26.4	-26.4	-22.5	-24.6	-21.3	-21.9	-29.1	-26.4	-23.1
r Pe	8	24	W	-24.3	-21.6	-18.6	-19.8	-21.3	-18.6	-21.6	-18.4	-22	-22.5
vite	9	25	W	-27	-25.5	-24.3	-23.7	-22.8	-24	-21.6	-24.6	-21.9	-24.9
rela	10	25	W	-23.1	-26.1	-24.6	-22.2	-20.4	-21.6	-20.7	-24	-23.4	-22.5
	11	28	m	-17.2	-21.9	-23.1	-23.4	-22.5	-23.7	-21.6	-19.3	-20.2	-22.5
le	12	28	m	-18.7	-28.2	-23.4	-24.6	-20.7	-21.3	-20.7	-17.8	-21.4	-20.2
well	13	27	m	-21.4	-23.1	-24.3	-25.8	-19.5	-23.7	-23.1	-18.4	-20.8	-23
sch	14	27	m	-22	-25.5	-25.2	-22.2	-20.4	-17.7	-20.4	-22.6	-21.1	-23.4
thö	15	26	m	-25.2	-24	-23.1	-24.9	-20.1	-20.1	-19.5	-19.6	-23.2	-22.1
Mi	16	26	m	-17.4	-25.2	-21	-23.7	-20.7	-21.6	-22.8	-21.4	-17.8	-20.2
	17	30	m	-22.5	-26.4	-23.1	-20.1	-20.4	-21.3	-23.1	-19.9	-19	-24
	18	30	m	-23.1	-25.5	-20.7	-22.8	-19.8	-18.6	-18.9	-21.6	-23.7	-16.8
	19	28	m	-21.6	-27.3	-20.1	-21.3	-21.9	-19.8	-22.2	-25.2	-25.2	-22.5
	20	28	m	-27.3	-28.2	-24.6	-20.4	-22.8	-20.4	-19.8	-21.3	-23.7	-21.6
	Durchschnitt d	es relativ	en Pegels	-23.06	-25.2	-23.1	-22.905	-21.795	-21.52	-21.585	-22.525	-22.81	-22.785

Anhang 1: Die Ergebnisse der Simulation des Band Widening-Experiments (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

	Varauchanarson	Alton	Casablaabt	Abstand der 2 Sinust öne Δf/Hz									
	versuchsperson	Allel	Geschiecht	50	100	200	300	400	500	800	1200	2000	3200
	1	27	w	-6.8	-11.4	-13.8	-14.4	-10.2	-14.4	-18.9	-23.7	-21.6	-32.7
	2	27	w	-3.9	-15.3	-9.6	-15.3	-14.4	-11.7	-19.5	-29.7	-29.1	-28.8
	3	28	w	-9	-6.9	-16.5	-16.5	-12	-15.9	-17.4	-20.4	-28.5	-26.1
	4	28	w	-9.9	-15	-15.6	-15	-13.5	-16.8	-10.8	-29.7	-35.1	-37.2
	5	28	w	-10.5	-14.4	-9	-13.6	-12.6	-18.6	-18	-30	-32.7	-39
dВ	6	28	w	-9.6	-11.1	-8.4	-12.3	-13.8	-14.5	-11.7	-30	-35.7	-39.3
gel/	7	24	w	-9	-14.1	-11.1	-12.9	-11.4	-18.4	-17.1	-35.4	-31.5	-36.3
r Pe	8	24	w	-9.3	-12.6	-12.6	-12	-13.2	-18.7	-12.9	-34.5	-34.8	-37.5
tive	9	25	w	-8.7	-14.4	-14.1	-13.5	-11.7	-16.6	-20.1	-32.4	-36	-38.7
rela	10	25	w	-12.6	-13.8	-11.4	-10.2	-13.8	-16	-16.2	-30.6	-38.7	-36.6
	11	28	m	-11.4	-11.1	-11.1	-9	-11.4	-19.3	-16.8	-34.8	-33.3	-34.2
е	12	28	m	-12	-12.3	-12	-9.3	-11.1	-17.8	-16.2	-33.3	-33	-33
well	13	27	m	-11.1	-10.2	-10.2	-11.7	-16.2	-15.9	-17.4	-32.4	-34.8	-33
rsch	14	27	m	-11.7	-11.4	-13.5	-12.3	-11.7	-13.2	-15.6	-32.4	-35.1	-37.8
thö	15	26	m	-12.9	-14.4	-12.3	-13.8	-14.1	-13.2	-16.2	-28.8	-38.4	-38.7
Mi	16	26	m	-11.1	-12	-11.7	-11.7	-17.1	-13.5	-17.1	-34.5	-32.1	-39.3
	17	30	m	-9	-13.6	-11.7	-9.9	-13.2	-13.5	-22.2	-31.2	-39.3	-36.6
	18	30	m	-10.2	-10.2	-10.8	-8.7	-14.4	-13.8	-17.7	-31.8	-35.1	-37.5
	19	28	m	-11.7	-14.4	-12	-13.6	-9.3	-12.3	-16.8	-33	-35.1	-37.2
	20	28	m	-12.3	-11.1	-11.4	-10.2	-13.2	-12.6	-16.2	-24.9	-36	-32.1
	Durchschnitt d	es relativ	en Pegels	-10.135	-12.485	-11.94	-12.295	-12.915	-15.335	-16.74	-30.675	-33.795	-35.58

Anhang 2: Die Ergebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke - Mithörschwelle von Schmalbandrauschen (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

	Abstand der 2 Schmalbandrauschen Δf/Hz												
	versuchsperson	Alter	Geschiecht	50	100	200	300	400	500	800	1600	2000	3200
	1	27	W	-18.6	-18.3	-18.6	-22.2	-23.1	-24.6	-36.9	-43.5	-47.7	-44.1
	2	27	W	-19.2	-19.2	-17.4	-23.1	-23.7	-28.8	-31.5	-45	-41.4	-42.6
	3	28	W	-16.8	-15.9	-21	-23.9	-25.2	-26.1	-35.9	-47.9	-50.6	-52.8
	4	28	W	-16.3	-17.1	-19.8	-21	-21	-27.9	-36.3	-52	-56.1	-45.9
	5	28	W	-19.5	-20.7	-20.4	-21.9	-25.2	-24.3	-30.9	-42	-45	-44.7
dB	6	28	W	-17.1	-19.8	-18.9	-20.1	-24.6	-25.8	-35.1	-44.1	-45.3	-49.8
gel/	7	24	W	-16.2	-19.8	-20.4	-20.4	-25.5	-21	-33	-45.9	-45.9	-56.2
r Pe	8	24	W	-17.7	-16.5	-19.2	-22.2	-23.1	-24.6	-35.1	-45.4	-43.2	-56.1
tive	9	25	W	-17.1	-17.2	-19.5	-20.7	-21	-20.7	-34.5	-42.3	-43.2	-48.3
rela	10	25	W	-19.2	-19.1	-18.3	-20.1	-23.4	-23.7	-31.5	-45.9	-44.7	-51.6
	11	28	m	-15.3	-18.3	-18.9	-20.7	-21	-22.8	-34.2	-45.6	-42	-51.2
е	12	28	m	-16.8	-18.9	-17.7	-20.4	-21.9	-22.2	-31.5	-46.5	-45.9	-46.2
well	13	27	m	-18	-18.6	-19.1	-21	-26.4	-24	-35.1	-47.4	-48.3	-51.9
rsch	14	27	m	-18.9	-17.9	-19.5	-23.1	-24.3	-23.4	-35.1	-46.8	-45.3	-50.4
thä	15	26	m	-18.9	-18.4	-20.4	-19.8	-21.9	-24.6	-32.7	-46.2	-46.5	-51.5
Mi	16	26	m	-17.7	-19.9	-19.5	-23.1	-22.5	-24.9	-35.1	-47.1	-48.9	-47.5
	17	30	m	-18	-17.4	-18.3	-20.1	-22.5	-23.7	-31.8	-47.7	-46.8	-47.8
	18	30	m	-15.3	-18.6	-20.8	-21.9	-23.7	-21.6	-30.6	-47.1	-43.8	-47.6
	19	28	m	-22.1	-19.3	-18.3	-22.2	-23.7	-24.3	-32.7	-43.1	-51.3	-48
	20	28	m	-21	-17.2	-18.6	-22.5	-19.5	-22.8	-33.6	-49.5	-44.7	-56.3
	Durchschnitt d	es relativ	en Pegels	-17.985	-18.405	-19.23	-21.52	-23.16	-24.09	-33.655	-46.05	-46.33	-49.525

Anhang 3: Die Ergebnisse der Simulation der Maskierung in der Frequenzlücke-Mithörschwelle von Sinuston (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

	Zuordnung Af/Uz	nieder	frequentes Signal	h cherfrequentes Signal			
		A-Bewertung /dB	Schalldruckpegel SPL /dB	A-Bewertung /dB	Schalldruckpegel SPL /dB		
1	200	50	55.2	50.4	55.1		
2	80	50.1	55.9	50.6	54.7		
3	800	48.9	56.3	50.3	54.8		
4	200	50.1	55.2	50.3	55.5		
5	40	50.1	54.8	50.6	56.2		
6	80	50.1	55	50.6	55.7		
7	120	50.1	55.3	50.4	54.8		
8	500	49.8	56.3	50.3	55.1		
9	120	50.1	55.6	50.3	54.9		
10	160	50.1	55.2	50.5	55.4		
11	300	50	55	50.4	54.6		
12	800	49	55.7	50.7	54.7		
13	300	50.1	55.7	50.4	54.4		
14	160	50.1	55.1	50.4	54.8		
15	500	49.9	55.9	50.3	54.6		
16	40	50.1	55.7	50.7	55.3		
Ruhig		28.1	53.4				

Anhang 4: Kalibrierung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)

	Zuordnung Af/Uz	nieder	frequentes Signal	hochfrequentes Signal			
	Zuorunung Δ1/HZ	A-Bewertung /dB	Schalldruckpegel SPL /dB	A-Bewertung /dB	Schalldruckpegel SPL /dB		
1	600	50.4	55.5	49.3	55.2		
2	1600	50.6	58.1	52.9	55.8		
3	100	50.2	55.1	49.8	54.4		
4	300	50.9	55	49.6	54.6		
5	100	50.2	66.5	49.8	55.4		
6	600	50.7	55.1	49.4	55.2		
7	50	50.2	54.9	49.9	54.1		
8	400	50.3	54.9	49.5	54.4		
9	800	50.6	54.8	49.9	54.2		
10	1600	50.8	55.2	52.9	55.7		
11	200	50.3	54.9	49.6	54.3		
12	200	50.2	54.7	49.6	54.5		
13	50	50.2	54.6	49.8	54.3		
14	800	50.7	54.9	49.7	54.4		
15	400	50.3	54.7	49.5	54.6		
16	300	50.9	54.7	49.6	54.8		
Ruhig		28.1	53.4				

Anhang 5: Kalibrierung des Schmalbandrauschens (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

	Nama	Alton	Casablaabt		Abstand der 2 Schmalbandrauschen Δf/Hz								
	Name	Alter	Geschlecht	50	100	200	300	400	600	800	1600		
	X 7'	27		-16.48	-16.48	-18.42	-20	-21.94	-30.46	-33.98	-40		
	1 III	21	W	-17.72	-15.92	-18.42	-20.92	-23.1	-30.46	-33.98	-40		
	N	20		-18.42	-18.42	-19.17	-20	-23.1	-30.46	-33.98	-33.98		
	INI	20	w	-17.72	-17.72	-18.42	-21.94	-23.1	-33.98	-33.98	-33.98		
	Wai	24		-16.48	-17.72	-18.42	-20	-23.1	-26.02	-33.98	-40		
dB	wei	24	W	-14.89	-16.48	-17.08	-20	-23.1	-30.46	-33.98	-40		
gel/	Yang	27		-14.42	-14.42	-15.39	-19.17	-21.94	-26.02	-33.98	-40		
e Pe		27	III	-14.89	-15.92	-16.48	-19.17	-21.94	-30.46	-30.46	-33.98		
ative	Zhang	26	w	-14.89	-15.92	-15.39	-18.42	-19.17	-27.96	-30.46	-40		
rel				-12.4	-15.39	-15.39	-17.72	-20.92	-30.46	-30.46	-40		
	Zhou 2	25	m	-14.89	-16.48	-17.08	-17.08	-21.94	-27.96	-33.98	-33.98		
е		23		-13.56	-15.92	-17.08	-17.72	-23.1	-27.96	-30.46	-40		
well	Cao	26		-18.42	-17.72	-18.42	-20	-23.1	-26.02	-33.98	-40		
sch	Gao	20	w	-18.42	-18.42	-17.72	-20	-23.1	-27.96	-33.98	-40		
thä	Thoma	28		-13.98	-14.89	-17.08	-18.42	-21.94	-27.96	-33.98	-40		
Mi	Zhang	20	m	-15.39	-15.39	-17.72	-20	-21.94	-30.46	-33.98	-33.98		
	Hon	20		-16.48	-15.92	-17.72	-19.17	-23.1	-26.02	-33.98	-40		
	nall	29	111	-17.72	-17.08	-17.72	-21.94	-23.1	-27.96	-33.98	-40		
	Vu	26		-14.42	-15.39	-17.72	-19.17	-20.92	-24.44	-30.46	-40		
	лu	20	W	-15.39	-16.48	-17.08	-20.92	-20.92	-27.96	-30.46	-40		
		Durchscl	hnitt	-15.849	-16.404	-17.396	-19.588	-22.2285	-28.572	-32.924	-38.495		

Anhang 6: Die Ergebnisse der Programmierung (Mittenfrequenz $f_m = 2 \text{ kHz}$)

	Nama	Alton	Casablaabt	Abstand der 2 Schmalbandrauschen Δf/Hz								
	Name Alt	Allel	Geschiecht	40	80	120	160	200	300	500	800	
	Via	27	w	-20.92	-19.17	-18.42	-20	-23.1	-27.96	-33.98	-40	
	1 111	21		-18.42	-23.1	-19.17	-20	-24.44	-26.02	-33.98	-40	
	Nj	28		-19.17	-19.17	-19.17	-20.92	-23.1	-27.96	-33.98	-33.98	
	INI	28	w	-20.92	-17.08	-18.42	-20	-23.1	-26.02	-33.98	-33.98	
	Wai	24		-20	-17.72	-20	-18.42	-21.94	-27.96	-33.98	-33.98	
dB	Wei	24	W	-18.42	-16.48	-18.42	-20	-23.1	-26.02	-33.98	-33.98	
gel/	Yang	27		-20.92	-20	-19.17	-20	-23.1	-27.96	-33.98	-33.98	
r Pe		21	111	-20	-18.42	-20	-20	-23.1	-27.96	-33.98	-40	
iiveı	Zhang	26	W	-17.08	-17.08	-18.42	-19.17	-23.1	-26.02	-30.46	-33.98	
rela				-19.17	-16.48	-19.17	-20	-21.94	-27.96	-33.98	-40	
	Zhou	25	m	-13.15	-13.15	-13.56	-14.42	-24.44	-23.1	-27.96	-30.46	
e		23		-20	-11.7	-14.42	-14.89	-15.92	-23.1	-30.46	-33.98	
well	Cas	26	W	-18.42	-18.42	-20	-19.17	-24.44	-26.02	-33.98	-33.98	
sch.	Gau	20		-19.17	-18.42	-19.17	-19.17	-24.44	-27.96	-33.98	-40	
thä	Thong	28		-19.17	-19.17	-18.42	-19.17	-26.02	-27.96	-40	-40	
Mi	Zhang	20	111	-17.72	-18.42	-18.42	-20	-23.1	-26.02	-33.98	-40	
	Uan	20		-19.17	-20.92	-18.42	-19.17	-23.1	-27.96	-33.98	-40	
	Hall	29	111	-18.42	-18.42	-19.17	-20	-24.44	-26.02	-33.98	-40	
	Yu	26		-19.17	-18.42	-17.72	-20	-24.44	-26.02	-33.98	-40	
	лu	20	W	-20	-18.42	-18.42	-20	-21.94	-27.96	-30.46	-40	
		Durchscl	hnitt	-18.9705	-18.008	-18.404	-19.225	-23.115	-26.698	-33.452	-37.115	

Anhang 7: Die Ergebnisse der Programmierung (Mittenfrequenz $f_m = 1 \text{ kHz}$)

Eidesstattliche Erklärung und Einverständnis zur Veröffentlichung

Der Verfasser erklärt an Eides statt, dass er die vorliegende Arbeit selbständig, ohne fremde Hilfe und ohne Benutzung anderer als die angegebenen Hilfsmittel angefertigt hat. Die aus fremden Quellen (einschließlich elektronischer Quellen) direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind ausnahmslos als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit ist in gleicher oder ähnlicher Form oder auszugsweise im Rahmen einer anderen Prüfung noch nicht vorgelegt worden.

Xiaoyan Yin

Cottbus, den 22.10.2012