

BEITRÄGE ZU DER WIRKUNG VON TIEFFREQUEMTEM LÄRM
AUF DEN MENSCHEN UND ZU EINER ABGESTIMMTEN AKTIVEN
LÄRMMINDERUNG

Von der Fakultät für Elektrotechnik, Informationstechnik und
Medientechnik der Bergischen Universität Wuppertal genehmigte
Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs

VON

Tobias Weigler

GEBOREN AM 17. MÄRZ 1981 IN WUPPERTAL

REFERENT: PROF. DR.-ING. DETLEF KRAHÉ
KORREFERENT: PROF. DR.-ING. DIETER BRÜCKMANN

Tag der mündlichen Prüfung: 28.10.2016

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20170927-095341-1

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade3Ahbz3A468-20170927-095341-1>]

Kurzfassung

Menschen reagieren unterschiedlich auf tieffrequenten Lärm (TFL). Während viele nicht beeinträchtigt werden, gibt es immer wieder Einzelpersonen, welche auch auf tieffrequente Schallereignisse mit geringem Schalldruckpegel reagieren und in manchen Fällen über Schlaflosigkeit, Konzentrationsschwäche und in seltenen Fällen sogar Angstzustände klagen. Dieses Phänomen ist schon länger bekannt, gewinnt aber immer mehr an Bedeutung, da mit vielen neuen Technologien oft auch Lärm verbunden sein kann. So rücken zum Beispiel mit Blockheizkraftwerken und Windenergieanlagen potenzielle Quellen von tieffrequentem Lärm näher in die moderne Wohnlandschaft hinein. Gerade in ruhigen Wohngebieten wird dies besonders auffällig, da hier andere Lärmquellen wie Personen- oder Verkehrslärm seltener vertreten sind.

In dieser Arbeit werden neuartige Ansätze für Hörversuche vorgestellt, welche die hervorgerufene Lästigkeit bewerten sollen. Dabei ist das Ziel der Untersuchungen zum einen Ursachen für die besondere Bewertung der empfundenen Belastung einzelner, für tieffrequenten Lärm sensitiver Personen aufzutun, zum anderen die Versuchsmethodik genauer zu betrachten und ihre Anwendbarkeit in potentiellen späteren und größer angelegten Hörtests zu bewerten. Mit Hilfe der hier vorgestellten multimodalen Testmethoden wird die kombinierte Wirkung von auditiven und visuellen Reizen ebenso untersucht wie das gemeinsame Auftreten von Lärm und Vibration. Es wird gezeigt, dass die Kombination solcher Reize sowohl verstärkende Wirkung haben, als auch die Wahrnehmung der Einzelreize verschleiern kann. In dem abschließenden Hörversuch wird das Elektroenzephalogramm (EEG) als Testmethode eingeführt, um eine von der Probandeneinschätzung unabhängigen Versuchsverlauf zu erhalten und weitere Einblicke in die Reaktion des Menschen auf tieffrequente auditive Stimuli zu gewinnen. Dabei wird deutlich, dass in den Gehirnreaktionen, welche bei einigen Probanden auffällige Unterschiede zum Rest der Versuchsgruppe aufweisen, ein Indiz auf die besondere Wahrnehmung von TFL liegen kann. Weiter wird der verstärkende Einfluss, den Eigenschwingungen in Wohnräumen (sog. Raummoden) auf tieffrequenten Schall ausüben, gezeigt. Dies kann zu einer erhöhten Belastung bei ohnehin schon empfindlicheren Personen führen. Um dem entgegen zu wirken wird die Methode der aktiven Lärmkontrolle (ANC) eingeführt. Dabei wird hier der neue Ansatz vorgestellt, ein ANC System durch lineare Prädiktionsmethoden zu erweitern, so dass für Raummoden eine verbesserte Dämpfungswirkung erzielt werden kann.

Abstract

Different people react to low frequency noise (LFN) in different ways. While some are not bothered at all, other persons react to low frequency noise even with small sound pressure levels and sometimes suffer from insomnia, lack of concentration and even anxiety states. This phenomenon is known for some time, but continuously gains importance because many new technologies are connected to new noise sources. Block-type thermal power stations and wind energy plants are becoming part of our living environment rapidly and are known to emit LFN. This becomes more of a problem for quieter areas where the noise is not masked by other, more common sources like traffic. In this thesis new approaches for listening tests considering said noises are proposed. One goal of these studies is to gain insight into some peoples special low frequency noise perception. The other is to develop and evaluate different new test methods for these listening tests for use in studies yet to be planned. Using the proposed tests the combined effect of auditory and visual stimuli are examined as well as the simultaneous presentation of low frequency noise and vibration. It will be shown that combined stimuli can enhance each others perception as well as shadow a less prominent stimulus. The last listening test conducted uses an electroencephalogram (EEG) to obtain the perceived annoyance in another then the subjects statement. Within this study occur special EEG patterns for some subjects sensitive to LFN, indicating a particular LFN perception.

Furthermore the amplification of low frequency sound pressure inside of rooms by their natural resonance is elaborated. This can lead to enhanced LFN perception in sensitive people. To counter this behaviour a new approach for active noise control (ANC) systems in closed rooms is introduced using linear prediction methods resulting in enhanced damping of dominant room modes.

Danksagung

Allen voran bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Krahé. Er hat mir nicht nur die Anfertigung dieser Arbeit ermöglicht, sondern stand mir immer mit Rat und Tat zur Seite, sowohl bei der wissenschaftlichen Arbeit, als auch bei vielfältigen Korrekturen an dieser Arbeit. Dabei sorgte er stets für ein hervorragendes Arbeitsklima am Lehrstuhl.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Dieter Brückmann dafür bedanken, dass er die Zweitkorrektur angenommen hat und mich mit einer Vielzahl von Verbesserungs- und Änderungsvorschlägen unterstützte.

Zusätzlich möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Anton Kummert bedanken. Durch seine wertvollen Tipps zu den Inhalten dieser Arbeit und allgemeinen Arbeitsstrategien hat er mir sehr geholfen diese Arbeit fertig zu stellen.

Bei Christian Kleinhenrich möchte ich mich für die vielen Jahre der Freundschaft und Zusammenarbeit bedanken. Der fachliche Austausch und die vielfältige Unterstützung waren eine große Hilfe.

Allen Kollegen am Fachbereich und beim Bergischen Schul-Technikum danke ich für die langjährige Zusammenarbeit, die moral-erhaltenden Kaffees und allgemein für die tolle Zeit am Campus Freudenberg.

Bei meinem Vater und Katharina & Paulina Flinkerbusch bedanke ich mich für die ausführlichen grammatischen Korrekturen an dieser Arbeit.

Dank gilt auch David Strzelecki, Markus Pontus und Pavel Kurgean für die Mühen bei der Erstellung ihrer Abschlussarbeiten, welche ich betreuen durfte. Genauso bedanke ich mich bei Matthias Braeunig für die gemeinsame Arbeit und die gute Zeit in Freiburg.

Nicole Krohm danke ich dafür immer da zu sein und viel Geduld mit mir bei der Fertigstellung dieser Arbeit zu haben.

Ohne meine Familie wäre ich nie an den Punkt gekommen dies Arbeit abzuschließen, vielen Dank dafür, dass ihr all die Jahre an meiner Seite steht.

Meinen Freunden will ich für die gemeinsam verbrachten Momente genauso danken wie für das Verständnis, dass ich aufgrund dieser Arbeit oft keine Zeit hatte.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	A
Abstract	C
Danksagung	E
Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielformulierung	3
1.3 Aufbau der Arbeit	3
2 Wirkung von tieffrequentem Lärm auf den Menschen	5
2.1 Das menschliche Gehör	5
2.1.1 Außenohr	6
2.1.2 Mittelohr	7
2.1.3 Innenohr	8
2.1.4 Neuronale Weiterverarbeitung	10
2.1.5 Räumliches Hören	12
2.1.6 Psychoakustik	14
2.1.6.1 Hörfläche und Ruhehörschwelle	14
2.1.6.2 Maskierung	15
2.1.6.3 Tonheit	19
2.1.6.4 Lautheit	21
2.1.6.5 Schärfe	23
2.1.6.6 Schwankungsstärke	24
2.1.6.7 Rauheit	27
2.2 Neue Untersuchungen zum Einfluß von multimodalen Effekten auf die Wirkung von TFL	30
2.2.1 Versuch 1 - Untersuchung audiovisueller Kopplung	31
2.2.1.1 Planung	32
2.2.1.2 Durchführung	33

2.2.1.3	Ergebnisse	34
2.2.1.4	Zusammenfassung	40
2.2.2	Versuch 2 - Weiterführende Untersuchung audiovisueller Kopp- lung	41
2.2.2.1	Planung	41
2.2.2.2	Durchführung	44
2.2.2.3	Ergebnisse	45
2.2.2.4	Zusammenfassung	52
2.2.3	Versuch 3 - Verbindung von tieffrequentem Lärm und Vibrationen	53
2.2.3.1	Planung	53
2.2.3.2	Durchführung	53
2.2.3.3	Ergebnisse	54
2.2.3.4	Zusammenfassung	55
2.3	Neuer Hörversuch unter Verwendung von EEG-Messungen	56
2.3.1	Planung	56
2.3.2	Durchführung	58
2.3.3	Ergebnisse	61
2.3.4	Zusammenfassung	82
2.4	Zusammenfassung und Fazit	83
3	Raummoden und deren Schwächung	85
3.1	Schallausbreitung	86
3.2	Ausbreitung in Räumen	93
3.3	Durchgeführte Messungen von Raummoden	101
3.4	Active Noise Control	108
3.4.1	Grundlagen ANC	108
3.4.2	LMS Algorithmus	110
3.4.3	Einfaches ANC System	113
3.5	Neues ANC System zur Raummodendämpfung	115
3.5.1	Neuer Ansatz für Adaptive Algorithmen	115
3.5.2	Aufbau	117
3.5.3	Messungen	117
3.6	Zusammenfassung und Fazit	123
4	Gesamtfazit und Ausblick	125
4.1	Gesamtfazit	125
4.2	Ausblick	125
5	Anhang	127

Literaturverzeichnis	148
Abbildungsverzeichnis	152
Tabellenverzeichnis	153
Eidesstattliche Erklärung	155

1 Einleitung

1.1 Motivation

In der modernen Welt wird Lärm für den Menschen immer mehr zu einem Umweltproblem. Spätestens mit Beginn der Industrialisierung am Ende des 18. Jahrhunderts führten die im Alltag immer mehr präsenten Maschinen und stetig wachsenden Ballungsräume zu einem kontinuierlichen Ansteigen der Lärmentwicklung. Lärm wird hierbei als ein unerwünschtes Schallereignis bezeichnet. Die Wahrnehmung eines solchen Schallereignisses durch den Menschen beginnt mit der physikalischen Verarbeitung im Gehör und endet mit einer spezifischen Empfindungsreaktion des betreffenden Menschen. Diese ist bei jedem Individuum unterschiedlich und ist neben der Art des Schallereignisses von vielen verschiedenen Faktoren abhängig. So wird zum Beispiel Musik von einem Menschen als beruhigend empfunden, während sein Nachbar diese im gleichen Moment als Lärm wahrnimmt und davon stark gestresst werden kann. In dem genannten Beispiel lässt sich klar trennen für welche der beiden Personen der Schall als Lärm wahrgenommen wird und für wen nicht. Sind nun zwei unterschiedliche Menschen von ein und dem selben Lärmereignis betroffen, so muss deren Reaktion darauf nicht identisch ausfallen. Besonders sichtbar wird dieser Unterschied bei tieffrequentem Lärm (TFL). Ein Schallereignis wird als tieffrequent bezeichnet, wenn die Hauptanteile des Signals zwischen 10 Hz und 200 Hz liegen. Hier ist häufig zu beobachten, dass bestimmte Einzelpersonen besonders beeinträchtigt sind, wohingegen andere kaum eine Belästigung erfahren. Die hervorgerufenen Beschwerden reichen in manchen Fällen von Schlaflosigkeit, über Konzentrationsschwäche bis hin zu Angstzuständen [BHJ96].

1.1. MOTIVATION

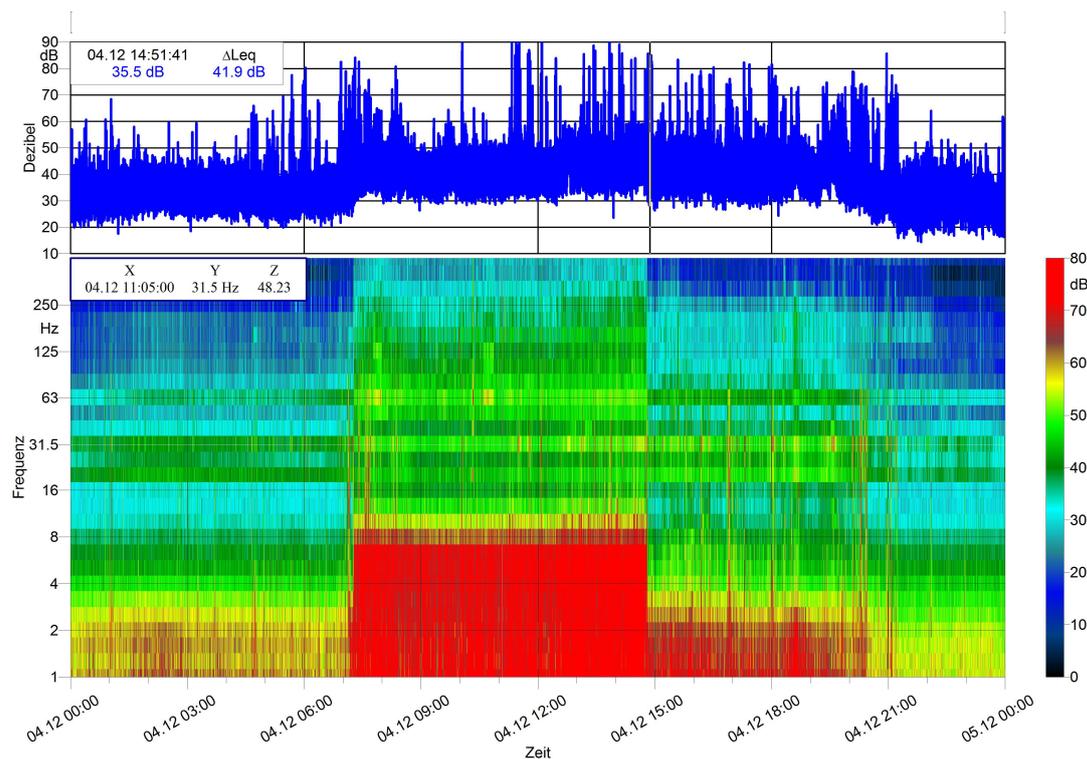


Abbildung 1.1: Spektrogramm einer Schalldruckdauermessung im Haus von Personen, die über die Belästigung durch tieffrequenten Lärm klagen. Die Messung fand während des gesamten 04. Dezember 2012 statt.

Abbildung 1.1 zeigt das Spektrogramm einer Langzeitmessung des Schalldrucks innerhalb eines Hauses. Die Personen dieses Hauses fühlen sich stark durch tieffrequenten Lärm belästigt. Im Frequenzbereich von 16 Hz bis 60 Hz sind erhöhte Schalldruckpegel gut zu erkennen. Besonders auffällig ist jedoch der sehr hohe Schalldruckpegel unter 4 Hz. Zusätzlich ist ein massives Einzelphänomen in der Zeit zwischen 09:00 Uhr und 15:00 Uhr zu erkennen.

Die Ursachen dieses TFL können vielfältig sein. Neben industriellen Anlagen und Lüftungssystemen sind in den letzten Jahren zum Beispiel mit Blockheizkraftwerken und Windenergieanlagen neue technische Einrichtungen als Ursache auszumachen. In dem Beispiel aus Abbildung 1.1 besteht die Quelle des Lärms vermutlich in nahen Windenergieanlagen. Der Nachweis einer solchen Abhängigkeit erfordert oft aufwendige, synchronisierte Messungen an verteilten Standorten. Das Auftreten von besonderen Auffälligkeiten, wie zum Beispiel eines Defektes an einer der Windenergieanlagen in dem Zeitraum einer Messung, ist selbst bei großangelegten Untersuchungen nur dem Zufall geschuldet. In vielen Fällen lässt sich zunächst die genaue Schallquelle nicht ausmachen, was zu der negativen Wirkung beiträgt. Auch die Wohnsituation hat oft einen Einfluss auf die Wahrnehmung von tieffrequentem Lärm. So klagen vor allem

in ruhigen Wohngebieten Menschen über dieses Phänomen. Durch moderne Mehrfachglasfenster abgeschirmt, dringt oft nur noch der tieffrequente Anteil des Schalls in die Wohnräume vor ohne von prominenteren Schallereignissen höherer Frequenz überlagert zu werden. Häufig wird dieser Effekt durch das Auftreten von Resonanzen im Inneren der Räume (sog. Raummoden) weiter verstärkt.

1.2 Zielformulierung

Diese Arbeit verfolgt im wesentlichen zwei Ziele. Zum einen soll die Wirkung von tieffrequentem Lärm auf den Menschen untersucht werden. Zu diesem Zweck werden verschiedene Hörversuche durchgeführt, wobei das Hauptaugenmerk darauf liegt, vielfältige Versuchsmethodiken zu beleuchten. Auch wenn dazu die Stichproben innerhalb der Hörtests relativ klein gewählt werden, so wird dennoch eine grobe Einschätzung der Wirkung unterschiedlicher akustischer Stimuli auf den Menschen möglich. Vor allem kann die Wirkung auf einzelne, für TFL sensitive Personen beobachtet und bewertet werden. Ein Teil der Versuche wird multimodal angelegt, so dass eine kombinierte Wirkung von akustischen und visuellen Reizen untersucht werden kann. Um Unabhängigkeit von der subjektiven Beurteilung durch die Probanden zu erlangen, wird einer der Hörversuche mit Hilfe von Elektroenzephalogrammen (EEG) ausgewertet.

Darüber hinaus soll die verstärkende Wirkung von Raummoden auf tieffrequente Schalle untersucht und messtechnisch erfasst werden. Davon ausgehend werden diese mittels aktiver Lärmkontrolle unterdrückt. Hierzu wird eine neue Methode vorgestellt, welche die lineare Prädiktionscodierung nutzt, um die Dämpfungswirkung auf Raummoden zu verbessern.

1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit ist in drei Kapitel aufgeteilt. In Kapitel 2 wird auf die Wahrnehmung von Schallereignissen durch den Menschen eingegangen. Zunächst werden die physiologischen Grundlagen erläutert und ein kurzer Überblick über die neuronale Verarbeitung im menschlichen Gehirn gegeben. Daraus ergeben sich psychoakustische Größen die ebenfalls vorgestellt werden.

Im Anschluss daran werden drei Hörversuche beschrieben, welche multimodale Effekte untersuchen, die sowohl die Wirkung von auditiven und visuellen Stimuli als auch von Lärm und Vibration behandeln. In einem vierten Hörversuch wird das EEG verwendet, um die Reaktion des Gehirns auf verschiedene akustische Stimuli aufzuzeichnen. Das Kapitel 3 beginnt mit der physikalischen Herleitung der Schallfeldgrößen. Aus diesen ergeben sich die Resonanzen geschlossener Räume, sogenannte Raummoden, die

dann auch messtechnisch analysiert werden. Die Auslöschung dieser Resonanzen mittels aktiver Lärmkontrolle wird danach beschrieben. Dabei wird die lineare Prädiktion zur Verbesserung des Dämpfungsverhaltens eingeführt.

Abschließend werden die Ergebnisse der vorigen Abschnitte in Kapitel 4 zusammengeführt und besprochen. Des Weiteren wird ein auf den Ergebnissen dieser Arbeit aufbauender Ausblick gegeben.

2 Wirkung von tieffrequentem Lärm auf den Menschen

In diesem Kapitel wird die Wirkung von tieffrequenten Schallereignissen auf den Menschen untersucht. Im späteren Verlauf werden Hörversuche mit unterschiedlichen, zum Teil mehrere Reize verbindenden, Ansätzen beschrieben und ausgewertet. Im Vordergrund steht hierbei die Suche nach Versuchsmethoden die Aufschluss darüber liefern können, warum einige wenige Personen deutlich empfindlicher auf tieffrequenten Lärm reagieren als ihre Mitmenschen. Hierzu ist es notwendig, zunächst die physiologischen, neuronalen und psychoakustischen Grundlagen zu betrachten und bereits auf dieser Ebene nach möglichen Erklärungen für das beschriebene Phänomen zu suchen.

2.1 Das menschliche Gehör

Das Gehör dient der Umwandlung von akustischen Signalen in einen Höreindruck und ist somit eine der Schlüsselstellen in der Wahrnehmung unserer Umgebung. Dieser auditive Rezeptor ist bei den meisten Säugetieren, im speziellen beim Menschen, in drei Hauptteile untergliedert. Das Außenohr, das Mittelohr und das Innenohr. Während das Außenohr den Schall auffängt und für die Verarbeitung weiterleitet, dient das Mittelohr hauptsächlich der Impedanzanpassung zwischen der luftgefüllten Umgebung und dem flüssigkeitsgefüllten Innenohr. In letzterem findet dann die eigentliche Umwandlung des physikalisch als Druckschwankung zu beschreibenden akustischen Ereignisses in einen elektrischen Reiz des Nervensystems statt.

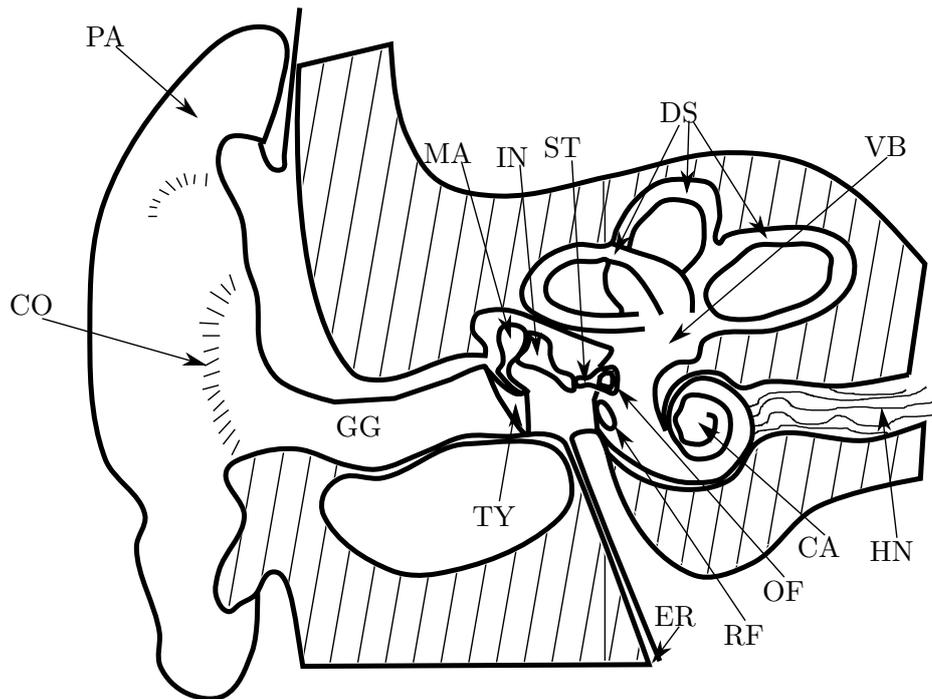


Abbildung 2.1: Querschnitt durch das Gehör. PA: *pinna*, CO: *concha*, GG: Gehörgang, TY: *tympanum*, MA: *maleus*, IN: *incus*, ST: *stapes*, CA: *cochlea*, DS: *ductus semicirculares*, VB: *vestibulum*, OF: Ovales Fenster, RF: Rundes Fenster, ER: Eustatische Röhre, HN: Hörnerv. (Frei nach [ZF90])

2.1.1 Außenohr

Das Außenohr besteht aus der *pinna* und der *concha*, welche zusammen die Ohrmuschel bilden, und dem Gehörgang. Während die *pinna* den Schall auffängt, leitet die *concha* ihn weiter in den Gehörgang. Zusätzlich zu der Weiterleitung des Schalls an das Mittelohr erfüllt das Außenohr zwei weitere Aufgaben. Zum einen erhöht es frequenzabhängig den Schalldruck des aufgenommenen Luftschalls und spielt zum anderen eine wichtige Rolle bei der Lokalisation von Schallereignissen.

Hauptsächlich aufgrund von im Gehörgang entstehenden Resonanzen wird der Schalldruck am Ende des Gehörganges im Vergleich zu den Freifeldbedingungen außerhalb des Ohres zum Teil deutlich erhöht. Im Frequenzbereich von 2,5 kHz bis 5,0 kHz kann diese Erhöhung bis zu 20 dB betragen. In den niedrigen Frequenzbereichen unterhalb von 250 Hz fällt diese Erhöhung jedoch auf wenige Dezibel ab.

Aufgrund ihrer Form hilft die Ohrmuschel bei der Lokalisation von Schallquellen. Gerade bei der Unterscheidung zwischen einer Schallquelle, die sich direkt vor dem Kopf befindet und einer direkt hinter dem Hörer, spielt die *pinna* eine wichtige Rolle, da hier der Laufzeitunterschied zwischen beiden Ohren gleich ist und die Anatomie des Kopfes und vor allem des Ohres hier die einzige Unterscheidungsmöglichkeit bietet.

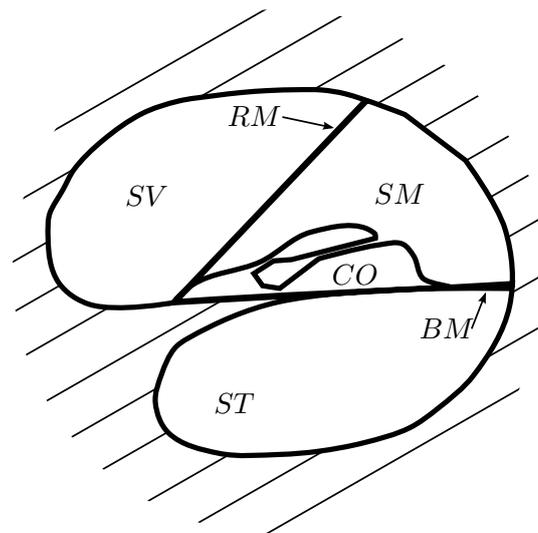
2.1.2 Mittelohr

Das Mittelohr schließt den Gehörgang des Außenohres direkt mit dem *tympanum* (Trommelfell) ab und stellt die Verbindung zum ovalen Fenster des Innenohres her. Der Schall wird hierbei von den drei Gehörknöchelchen *malleus* (Hammer), *incus* (Amboss) und *stapes* (Steigbügel) weitergeleitet, welche mit feinen Bändern und zwei Muskeln in der Paukenhöhle aufgehängt sind. Der *malleus* ist auf der einen Seite mit seinem *manubium* (Griff) mit dem *tympanum* und auf der anderen Seite mit dem *incus* verbunden. Während die Verbindung zwischen *malleus* und *incus* relativ steif ist, erlaubt die Verbindung zwischen *incus* und *stapes* einen deutlich höheren Grad an Flexibilität. Die Gesamtbeweglichkeit dieser Knöchelchenkette kann mittels zweier Muskeln, dem *tensor tympani* und dem *stapedius* situativ vom Körper verändert werden. Dieser Aufbau erfüllt neben der eigentlichen Weiterleitung des Schalls an das Innenohr weitere Aufgaben.

Die Impedanzanpassung zwischen dem luftgefüllten Außenohr und dem mit Lympfflüssigkeit gefüllten Innenohr ist hier die wichtigste. Ohne diese Anpassung würden nur 2% der Schalleistung aus dem Freifeld in das Innenohr gelangen, so sind es 67%, was eine deutliche Verbesserung darstellt. Erreicht werden kann dies durch zwei Faktoren. Das Größenverhältnis zwischen *tympanum* und dem ovalen Fenster spielt hierbei die wichtigste Rolle, da der Schalldruck sich umgekehrt proportional zu der Fläche verhält. Begünstigt wird dies durch die Hebelverhältnisse der länglichen Teile der Gehörknöchelchen. Aufgrund der unterschiedlichen Längen von *malleus* und *incus* wird die vom *stapes* ausgeübte Kraft relativ zu den Kräften direkt am Trommelfell erhöht, wohingegen die Schnelle reduziert wird.

Zusätzlich erfüllen die beiden Muskeln im Mittelohr weitere Aufgaben, die die Aufnahme von Schall durch das Innenohr beeinflussen. Durch die flexible Einstellung der Steifigkeit der Knöchelchenkette kann der Dynamikumfang der Cochlea erweitert werden. Dieser liegt eigentlich nur zwischen 20 und 50 dB. Die schalldruckabhängige Weiterleitung durch die Knochen im Mittelohr erhöht diesen allerdings beträchtlich, so dass auch Schalldrücke außerhalb dieses Bereiches aufgelöst werden können. Dieses Verhalten ist stark frequenzabhängig, so dass tiefere Frequenzen deutlich schlechter übertragen werden. Dies ermöglicht unter anderem ein besseres Sprachverständnis, da der Verdeckungseffekt durch tiefe Frequenzen stark gemindert wird. Zusätzlich dient dieses Verhalten auch dem Schutz des Gehörs. Bereits nach geringer Einwirkdauer höherer Schalldrücke tritt eine deutliche Minderung des Schalldrucks auf. Lediglich vor impulsartigen Schallereignissen kann dieser Mechanismus nicht schützen.

2.1.3 Innenohr

Abbildung 2.2: Querschnitt durch eine Windung der *cochlea*. (Frei nach [BI92])

Das Innenohr besteht aus der *cochlea* (Schnecke), dem *vestibulum* (Gleichgewichtsorgan) und den *ducti semicirculari* (Bogengängen). Diese sind miteinander verbundene Hohlräume im Schläfenbein und bilden zusammen das *labyrinthus osseus* (knöchernes Labyrinth). Während die *cochlea* das eigentliche Hörorgan darstellt, sind *vestibulum* und die *ducti semicirculari* für das Gleichgewichtsempfinden zuständig. Im weiteren Verlauf wird lediglich auf die *cochlea* eingegangen.

Über das ovale und das runde Fenster ist die *cochlea* und somit das gesamte knöcherne Labyrinth mit dem Mittelohr verbunden. Beide Fenster sind mit einer Membran verschlossen, an welche im Falle des ovalen Fensters die Fußplatte des *stapes* angeschlossen ist. Hier findet die Übertragung des Schalls aus dem Mittel- an das Innenohr statt. Die *cochlea* selbst ist eine knöcherne Struktur in der Form einer Schnecke. Beim Menschen besitzt sie zweieinhalb Windungen, bei anderen Säugetieren variiert diese Zahl leicht. In Längsrichtung ist die *cochlea* in zwei Hauptteile unterteilt, die *scala vestibuli* im oberen Teil, welche an dem ovalen Fenster beginnt und die *scala tympani* im unteren Teil, welche am runden Fenster endet. Beide Teile sind in der Spitze der *cochlea*, dem sogenannten *helicotrema*, miteinander verbunden. Sie sind mit Perilymphe gefüllt und werden durch die mit Endolymphe gefüllte *scala media* voneinander getrennt. *Scala vestibuli* und *scala media* werden von der Reissner-Membran getrennt, *scala media* und *scala tympani* hingegen von der Basilarmembran.

Der Länge nach befindet sich auf der Basilarmembran und innerhalb der *scala media* das Corti-Organ. Dieses ist direkt für die Umsetzung der Druckschwankungen in elektrische Nervenimpulse verantwortlich. Innerhalb des Corti-Organes existieren die

sogenannten Inneren und Äußeren Haarzellen (IHC und OHC) welche in mehreren V-förmigen Reihen hintereinander, dem Verlauf der Basilarmembran folgend, angeordnet sind. Die Wanderwellentheorie beschreibt nun wie die Umwandlung einer auf das ovale Fenster treffenden Schallwelle in den Toneindruck einer speziellen Frequenz stattfindet.

Die in der *scala tympani* und *scala vestibuli* befindliche Endolymphflüssigkeit ist nicht kompressibel, so dass eine über den *stapes* auf das ovale Fenster eintreffende Schallwelle eine Transversalwelle auslöst, welche sich von der Basis der *cochlea* aus durch die *scala vestibuli* zum *helicotrema* fortsetzt und von dort durch die *scala tympani* zum runden Fenster gelangt, wo der Druckausgleich zum Mittelohr stattfindet. Während sich auf diesem Weg die Amplitude der Transversalwelle ändert und ein Maximum zwischen ovalem Fenster und *helicotrema* annimmt, verringert sich ihre Geschwindigkeit kontinuierlich.

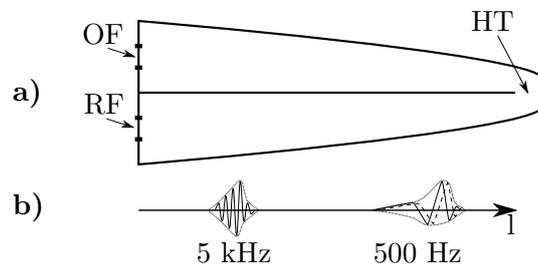


Abbildung 2.3: a) Seitenansicht der abgerollten *cochlea* b) Frequenzabhängige Position der Wanderwellenmaxima (OV: Ovale Fenster, RF: Rundes Fenster, HT: *helicotrema*; Größenverhältnisse nicht maßstabsgetreu, frei nach [ZF90]).

Diese Position dieses Maximums ist abhängig von der Frequenz der eintreffenden Schallwelle. Transversalwellen hoher Frequenz erreichen ihr Amplitudenmaximum bereits nahe des ovalen Fensters, solche tiefer Frequenz erst in der Nähe des *helicotremae*. Die Wanderwelle bewirkt eine Deformation der Basilarmembran und somit des auf ihr befindlichen Corti-Organs. Das hat zur Folge, dass die dortigen Haarzellen unterschiedlich stark ausgelenkt werden, je nach dem an welcher Stelle in der *cochlea* sie sich befinden. Die auf diese Weise stattfindende Orts-Frequenz-Zuweisung (Tonotopie) wird durch die spezielle Natur der Äußeren Haarzellen verstärkt. Diese können die von der Wanderwelle ausgehende Kraft um etwa das eintausendfache verstärken und sehr zielgerichtet den für die spezielle Frequenz „zuständigen“ inneren Haarzellen zuführen [SS06]. So existieren innerhalb der *cochlea* feste Bereiche für diskrete Frequenzen, die sogenannten charakteristischen Frequenzen (CF) bzw. Bestfrequenzen (BF). Von den betreffenden Inneren Haarzellen aus wird dann ein elektrischer Reiz zur weiteren Verarbeitung an den Hörnerv übergeben.

Während die inneren Haarzellen sehr wenig auf tieffrequenten Schall reagieren, sind

die äußeren Haarzellen jedoch dafür sensitiv und zeigen auch auf tieffrequenten Schall unter der Wahrnehmungsgrenze Reaktionen. Somit ist klar, dass auch nicht hörbarer TFL Einfluss auf das menschliche Gehör haben kann [SH10].

2.1.4 Neuronale Weiterverarbeitung

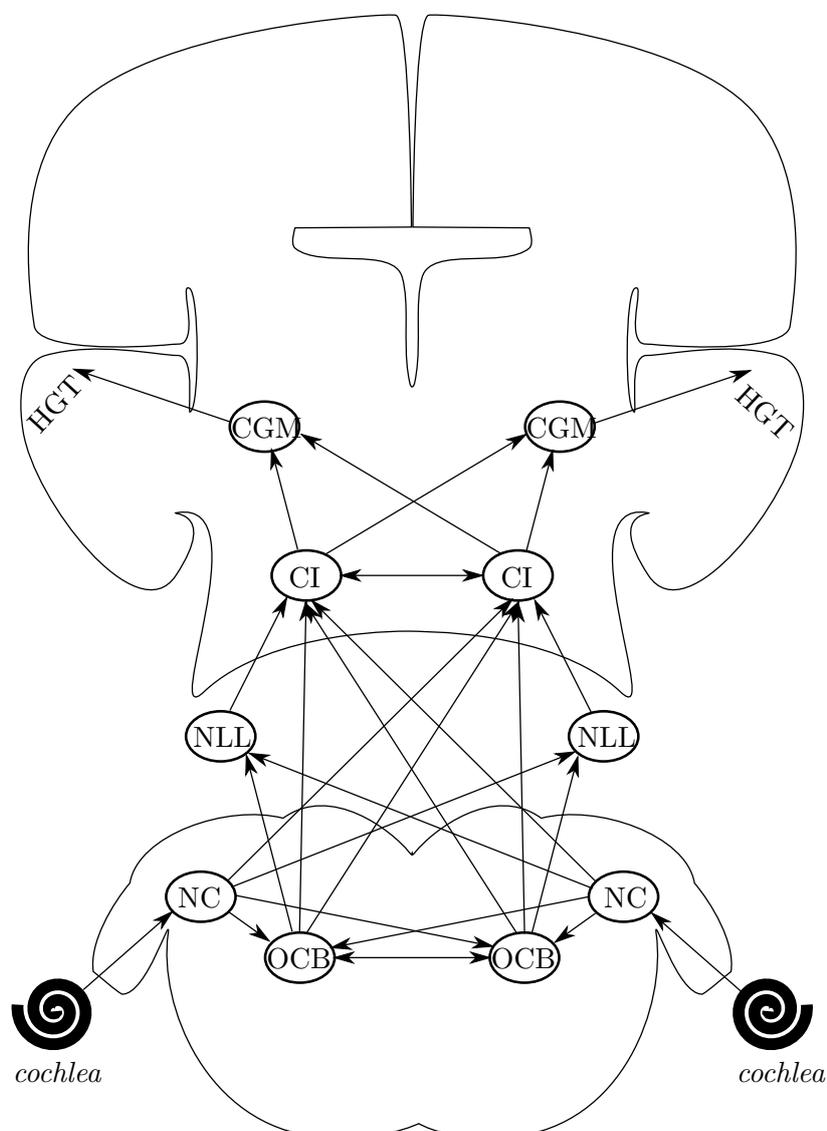


Abbildung 2.4: Schematische Ansicht der zentralen Hörbahn. NC: *nuclei cochleares*, OCB: *olivokochleäres Bündel*, NLL: *nucleus lemnisci lateralis*, CI: *colliculus inferior*, CGM: *corpus geniculatum mediale*, HGT: Hörcortex im *gyrus temporalis transversus*.

Die von den inneren Haarzellen in der *cochlea* ausgesendeten Nervenimpulse gelangen über den Hörnerv auf die Hörbahn und durch diese in das zentrale Nervensystem. In

Abbildung 2.4 ist die Hörbahn schematisch dargestellt. Zu beachten ist, dass dort nur der afferente Teil zu sehen ist, also die Weiterleitung von Informationen in Richtung des ZNS. Im gesamten System besteht zusätzlich auch ein Informationsfluss in die entgegengesetzte Richtung. Der gesamte Prozess des Hörens, der auditorischen Informationsverarbeitung und der Verarbeitung auf neuronaler Ebene ist bis heute noch nicht vollständig erforscht und Gegenstand vieler Untersuchungen. Aus diesem Grund soll hier nur ein grober Überblick über die Hörbahn und die nervöse Verarbeitung gegeben werden.

Von der *cochlea* aus gelangen die Impulse der Inneren Haarzellen über den Hörnerv zu den *nuclei cochleari*. Hier herrscht innerhalb der Nervenzellen eine starke räumliche Trennung in die verschiedenen Bestfrequenzen (Tonotopie), so dass hier eine erste Frequenzkodierung statt findet. Ebenso werden auch Intensität und zeitliche Auflösung kodiert. Von hier aus gelangen die Informationen über das akustische Ereignis in die olivokochlearen Bündel beider Gehirnseiten und sowohl in den *colliculus inferior* als auch in den *nucleus lemnisci lateralis* der gegenüberliegenden Gehirnhälfte. In den olivokochlearen Bündeln findet bei deutlicher Tonotopie eine erste Schalllokalisierung statt, was auch die gute Verbindung zwischen den Bündeln beider Gehirnhälften erklärt.

Der *nucleus lemnisci lateralis* ist eine Ansammlung von *nuclei* mit komplexen Eingängen und dient vornehmlich der Weiterleitung der Nervenimpulse, wobei die hier vorhandenen Nervenzellen ein ähnliches neuronales Verhalten aufweisen wie in den Regionen vor und hinter ihnen auf der Hörbahn. Von nahezu allen vorher genannten Bereichen der Hörbahn und beiden Gehirnhälften gelangen Impulse in den *colliculus inferior*. Er weist eine sehr komplexe Tonotopie auf und seine Aufgabe liegt aus klassischer Sicht in der Lokalisation von Schallereignissen.

Der *corpus geniculatum mediale* führt die Informationen beider *colliculi inferiori* unter einer gewissen Frequenzselektivität und Tonotopie zusammen. Neben einer hier stattfindenden ersten Mustererkennung leitet der *corpus geniculatum mediale* die Nervenimpulse hauptsächlich an den Hörkortex im *gyrus temporalis transversus* seiner Gehirnseite weiter. Ein Austausch zwischen beiden Seiten findet hier nicht mehr statt. Im Hörkortex selbst befinden sich verschiedene Gebiete mit Neuronen unterschiedlicher Aufgaben. Neben einer Weiterführung der Lokalisation findet hier eine Mustererkennung statt, die es dem Gehirn erlaubt Nutzschall von Störschall zu trennen, was unter anderem die Verständlichkeit von Sprachschallen in einem Hintergrund aus Lärm deutlich erhöht. Auch entsteht hier der erste Grundeindruck des Schalls im Hinblick auf Tonhöhe und Rhythmus.

2.1.5 Räumliches Hören

Um eine Schallquelle im dreidimensionalen Raum lokalisieren zu können sind zwei normal hörende Ohren von Nöten. Die eigentliche Lokalisation findet zum größten Teil im Zentralen Hörsystem statt. Wie in Abschnitt 2.1.4 beschrieben, existieren starke Vernetzungen zwischen den *nuclei* beider Gehirnhälften, den sich in ihnen befindlichen, stark auf die Raumorientierung spezialisierten Neuronen und letztendlich den beiden Ohren.

Prinzipiell beruht die Fähigkeit, Schallquellen im Raum zu orten auf zwei Phänomenen. Einerseits ermöglicht der Laufzeitunterschied (interaural time difference - ITD) zwischen beiden Ohren die Lokalisation eines Schallereignisses. Wie in Abbildung 2.5 zu erkennen ist, führt der Einfall einer Schallwelle von abseits der Blickachse zu einer zwischen beiden Ohren um Δt verzögerten Wahrnehmung. Diesen Laufzeitunterschied kann das Gehirn in eine Richtungsinformation umsetzen.

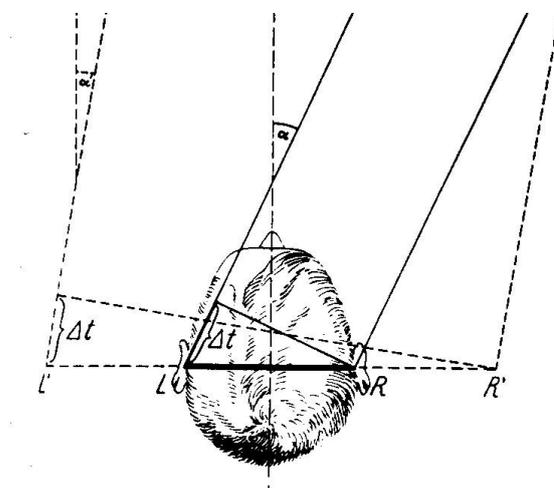


Abbildung 2.5: Richtungshören beim Menschen. Der Einfall einer Schallwelle von außerhalb der Blickachse führt zu einer Zeitverzögerung (Δt) in der Wahrnehmung durch die Ohren [Kei75].

Andererseits entsteht zwischen beiden Ohren ein Schallpegelunterschied (interaural level difference - ILD) der dem Gehirn die Schallquellenlokalisierung ermöglicht. Aufgrund der großen Wellenlänge tiefer Frequenzen scheint für Schallereignisse mit Frequenzen unterhalb von 2 kHz der Laufzeitunterschied primär für die Lokalisation zuständig zu sein, wohingegen für Frequenzen oberhalb von 4 kHz der Pegelunterschied ausschlaggebend ist. In dem dazwischen liegenden Frequenzbereich funktioniert die Schalllokalisierung deutlich schlechter [BI92].

Ein generelles Problem der Lokalisierung besteht für Schallereignisse auf der Blickachse, da hier sowohl Laufzeit, als auch Pegelunterschied zwischen beiden Ohren gleich sind, so dass nicht eindeutig zwischen „vorne“ und „hinten“ unterschieden werden kann.

Etwas abgemildert wird dieses Problem durch die speziellen Eigenschaften von *pinna* und *concha*, welche als Filter auf das Schallsignal wirken. Mit Hilfe der so in den Signalen erzeugten Muster kann später in den für die Lokalisation zuständigen *nuclei* die „Vorne-/Hinten-Ortung“ erleichtert werden. Deutlich verstärkt wird dieser Effekt bei vielen Tieren durch eine Bewegung der Ohrmuscheln. Das Pferd zum Beispiel besitzt 17 Muskeln, die nur für die Bewegung der *pinna* zuständig sind. Dem Menschen ist dies nicht möglich, so dass der Körper oft zusätzlich mit einer leichten Kopfbewegung, welche die Schallquelle aus der Blickachse herausbewegt, reagiert. Dennoch ist die Kopfanatomie des Menschen dafür verantwortlich, dass der Schall frequenzabhängig verstärkt wird (vgl. Abb. 2.6). Dies ermöglicht eine deutliche Verbesserung der Richtungswahrnehmung.

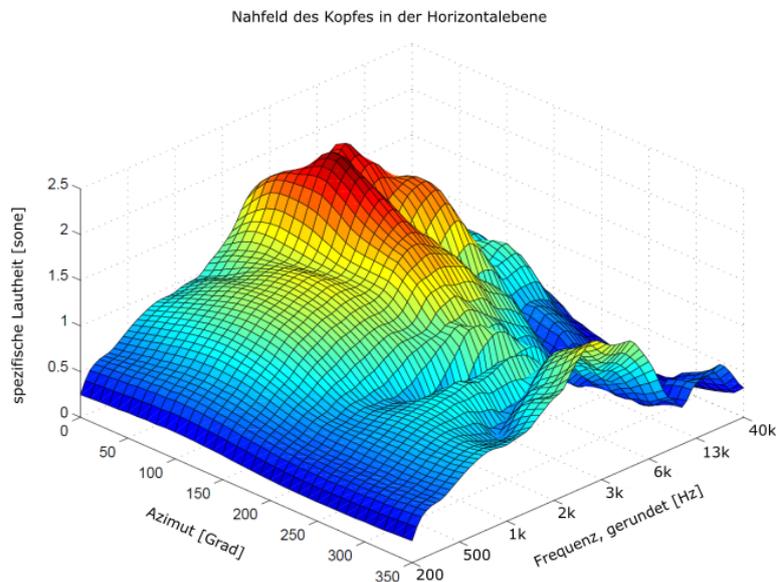


Abbildung 2.6: Durch die Kopfanatomie des Menschen bedingte, spezifische Lautheit in sone abhängig von dem Einfallswinkel in der Horizontalebene und der Frequenz [ZTL01].

Für tiefe Frequenzen wird die Lokalisation jedoch erheblich erschwert. Wie in Abbildung 2.6 zu erkennen ist, weist der Verlauf der spezifischen Lautheit schon für Werte unterhalb von 500 Hz nahezu keine Richtungsabhängigkeit auf. Zu kleineren Frequenzen hin fällt diese weiter ab. Es ist anzunehmen, dass die Verstärkung unterhalb von 200 Hz weiter abfällt. Dies führt dazu, dass das Richtungshören für tiefe Frequenzen stark beeinträchtigt ist. Der Umstand, den Ursprung des Schalls nicht ausmachen zu können, führt oft zu einer Verstärkung der negativen Wahrnehmung von TFL.

2.1.6 Psychoakustik

Diese besonderen Eigenschaften des Gehörs führen zu einigen psychoakustischen Effekten und dazu, dass physikalische Schallereignisse oft anhand ihrer psychoakustischen Eigenschaften beschrieben werden. Einige davon werden im Folgenden aufgeführt.

2.1.6.1 Hörfläche und Ruhehörschwelle

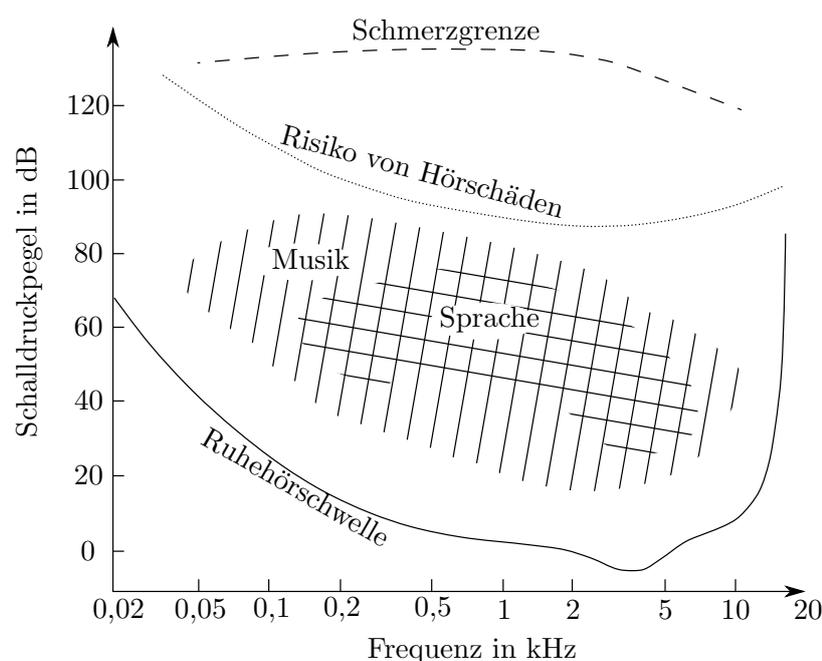


Abbildung 2.7: Die Hörfläche des Menschen. (Frei nach [ZF90])

Die Physiologie des Gehörs führt dazu, dass der Mensch unterschiedliche Frequenzen unterschiedlich laut wahrnimmt. In Abbildung 2.7 ist die Hörfläche des Menschen als frequenzabhängiger Schalldruck in Dezibel aufgetragen, also derjenige Bereich, in welchem Sinustöne eines gewissen Schalldrucks vom menschlichen Gehör wahrgenommen werden können. Nach unten hin ist die Hörfläche von der Ruhehörschwelle (durchgezogene Linie) begrenzt. Definiert wird die Ruhehörschwelle durch den Schallpegel der jeweiligen Frequenz, die ein durchschnittlicher, gesunder Mensch in ruhiger Umgebung gerade noch wahrnehmen kann. Direkt ersichtlich ist hier, dass das menschliche Gehör in dem Bereich zwischen 1 und 5 kHz besonders gut arbeitet, was, wie weiter oben beschrieben, vor allem auf Resonanzen im Gehörgang zurückzuführen ist.

Freq. in Hz	4	8	10	12,5	16	20	25	31,5
Pegel in dB	107	100	97	92	88	79	69	60
Freq. in Hz	40	50	63	80	100	125	160	200
Pegel in dB	51	44	38	32	27	22	18	14

Tabelle 2.1: Hörschwelle unterhalb von 200 Hz nach Leventhall [Lev08].

Zu beachten ist, dass die Frequenzskala in Abbildung 2.7 zwar nach unten hin bei 20 Hz endet, das Wahrnehmungsvermögen des Menschen allerdings nicht. Dieser Bereich ist lediglich deutlich schlechter erforscht, es gibt aber Untersuchungen, die zeigen, dass tiefere Töne bei höheren Schalldruckpegeln immer noch hörbar sind. In Tabelle 2.1 sind die Schallpegelwerte für eine Ruhehörschwelle unter 200 Hz zu sehen, wie in [Lev08] ausgeführt wurde. Die weniger gut zu bestimmende obere Grenze der Hörfläche bildet die Schmerzgrenze (gestrichelte Linie). Geräusche mit diesem Schalldruckpegel gehen mit Schmerzempfinden einher, eine Schädigung des Gehörs ist hier wahrscheinlich. Letztere kann sogar schon ab der Risikogrenze (gepunktete Linie) eintreten.

Innerhalb der Hörfläche liegen die Bereiche in denen sich gesprochene Sprache und elektronisch unverstärkte Musikinstrumente bewegen.

2.1.6.2 Maskierung

Werden dem Gehör mehrere Schallereignisse gleichzeitig oder in sehr kurzen Abschnitten nacheinander angeboten, so kann es dazu kommen, dass diese sich gegenseitig verdecken und so eins von beiden nicht mehr wahrgenommen werden kann. Dieses Phänomen wird auch als Maskierung bezeichnet. In einem beschränkten Umfang kann das Gehirn die Maskierung beeinflussen und unterdrücken. So ist der Mensch zum Beispiel in der Lage, sich vor dem Hintergrund mehrerer Gespräche auf die Unterhaltung mit nur einer Person zu konzentrieren und die restlichen Konversationen in den akustischen Hintergrund zu schieben, was die Sprachverständlichkeit in diesem Falle nicht unerheblich verbessern kann (Cocktailpartyeffekt). Ab einem gewissen Pegelunterschied zwischen der eigentlichen Information und dem überlagerten Störschall ist dies aber nicht mehr möglich.

Physiologisch gesehen liegt die Ursache für derartige Effekte im Aufbau der *cochlea* begründet. Die durch ein monofrequentes Signal ausgesandte Wanderwelle wirkt zwar am stärksten an der Stelle in der *cochlea* an der sich ihr Maximum ausbildet, aber auch benachbarte Haarzellen werden mit angeregt. Zusätzlich ist zu beachten, dass die höheren Frequenzen an das Ende der *cochlea* abgebildet werden und die Wanderwelle sich so über alle vorherigen Frequenzen hinweg bewegt. Am besten erforscht ist der Maskierungseffekt für Sinustöne, welche von anderen Tönen oder Rauschen überlagert

werden. Im Folgenden sollen einige Aspekte der Maskierung betrachtet werden.

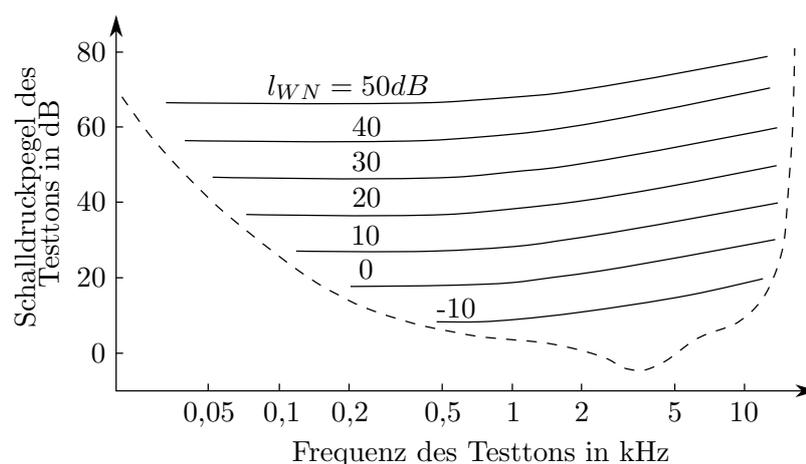


Abbildung 2.8: Frequenzabhängiger Schalldruckpegel von Testtönen, welche gerade noch von weißem Rauschen mit dem Schallintensitätspegel l_{WN} maskiert werden. Die gestrichelte Linie gibt hier die Ruhehörschwelle an. (Frei nach [ZF90])

Zunächst soll die Verdeckung von Sinustönen durch weißes Rauschen betrachtet werden. Im Alltag ist dieser Effekt zum Beispiel zu beobachten, wenn der Lärm eines vorbeifahrenden LKW das entfernte Martinshorn eines Einsatzfahrzeugs überdeckt. Hörtests, bei denen die Probanden mehrfach einen Testton so lange in seiner Lautstärke verstellen müssen, bis er gerade noch über dem maskierenden weißen Rauschen zu hören ist haben einen Zusammenhang belegt, wie er in Abbildung 2.8 von Zwicker [ZF90] dargestellt wird. Die durchgezogenen Linien in der Abbildung geben die Schwellwerte an, ab denen ein Testton, dessen Frequenz und Schalldruckpegel auf Abszisse bzw. Ordinate angegeben sind, unter der Anwesenheit von weißem Rauschen verschiedener Schallintensitätspegel (l_{WN}) gerade noch hörbar ist (Mithörschwelle). Bemerkenswert ist hier der lineare Zusammenhang im Bezug auf die Schallintensität des Maskierers, was sich darin bemerkbar macht, dass eine Erhöhung des Schallintensitätspegels um 10 dB eine Parallelverschiebung der Schwellwertkurve zur Folge hat. Für Frequenzen unterhalb von 500 Hz verlaufen die Maskierungsschwellen horizontal und weisen einen Abstand von circa 17 dB zum Pegel des jeweiligen Maskierers auf. Oberhalb von 500 Hz steigt die Kurve jedoch mit ungefähr 10 dB pro Dekade an. Bei Testtönen, welche am Rand des hörbaren Spektrums liegen, führt das dazu, dass Ruhehörschwelle (gestrichelte Linie) und Schwellwert übereinstimmen.

Zusammengenommen kann man sagen, dass Frequenzen unter 500 Hz weniger gut von weißem Rauschen verdeckt werden als Frequenzen am oberen Rand des Hörspektrums.

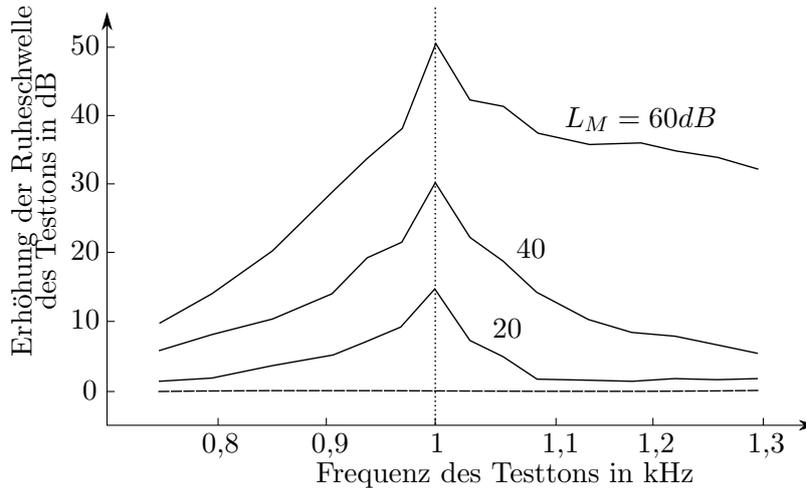


Abbildung 2.9: Mithörschwellen (durchgezogene Linien) für Frequenzen zwischen 0,7 und 1,3 kHz unter Anwesenheit eines sinusförmigen Maskierers von 1 kHz mit drei verschiedenen Schalldruckpegeln ($L_M = 20, 40$ und 60 dB). (Frei nach [ZF90])

Wenn man jetzt die Bandbreite des als Maskierer verwendeten weißen Rauschens immer weiter einengt, ähnelt es immer mehr einem reinen Ton. So gelangt man schließlich zu der Maskierung von Sinustönen durch andere Töne. Führt man Hörtests durch um den Verdeckungseffekt durch Sinustöne zu studieren, so sind einige Besonderheiten im Vergleich zu Rauschen als Maskierer zu beachten. Die auffallendste hiervon ist zu beobachten wenn Maskierer und Testton nahe bei einander liegende Frequenzen besitzen. Dann bildet sich aufgrund von Interferenzen eine Schwebung aus, die nur äußerst schwer von dem eigentlichen Testton zu unterscheiden ist. Dennoch ist es mit Hilfe von geübten Probanden durchaus möglich, die Verdeckungsschwellen auch für Töne, die nahe am Maskierer liegen, zumindest gut abzuschätzen.

Abbildung 2.9 zeigt die wahrgenommenen Schalldruckpegel von Testtönen bei der Anwesenheit eines Maskierers (Mithörschwellen) mit einer Frequenz von 1 kHz und verschiedenen Schalldruckpegeln ($L_M = 20, 40$ und 60 dB). Hier zeigt sich, dass der Maskierungseffekt stark pegelabhängig ist. Dies äußert sich besonders in der Flankensteilheit der Mithörschwellen. Bei hohen Pegeln (60 dB) des Maskierers ist zu beobachten, dass die Flanke zu den tiefen Frequenzen hin deutlich steiler ist als zu den hohen Frequenzen. Dies bedeutet, dass bei hohen Maskierungspegeln tiefe Frequenzen stärker verdeckt werden als hohe. Besitzt der Maskierer jedoch einen geringen Pegel (20 dB) so kehrt sich dieses Verhalten um und die tieferen Frequenzen werden lauter wahrgenommen. Dieses Phänomen scheint gleichermaßen für Maskierer mit anderen Frequenzen zu gelten, die in Abbildung 2.9 gezeigten Mithörschwellen werden lediglich horizontal verschoben. Für Maskierer unterhalb von 500 Hz werden die Kurven zusätzlich breiter.

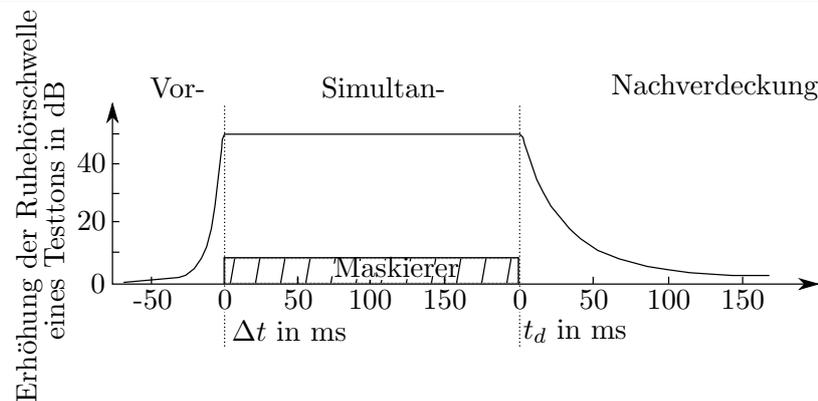


Abbildung 2.10: Schematische Darstellung der Erhöhung der Wahrnehmungsschwelle eines Testtons unter Anwesenheit eines Maskierers mit einer Dauer von 200 ms. Vor- und Simultanverdeckung benutzen hier eine andere Zeitskala (Δt) als die Nachverdeckung (t_d). (Frei nach [ZF90])

Betrachtet man zusätzlich zu den bisher beschriebenen spektralen Eigenschaften der Maskierung den zeitlichen Einfluss, so stellt man fest, dass der Verdeckungseffekt nicht nur während der Anwesenheit des Maskierers (Simultanverdeckung) auftritt, sondern auch danach (Nachverdeckung) und, was nicht unbedingt zu erwarten ist, vor dem Beginn des Maskierers (Vorverdeckung). Abbildung 2.10 gibt schematisch den zeitlichen Verlauf der Verdeckung durch einen 200 ms langen Maskierer an. Auf der Ordinate ist hier die Erhöhung der Ruheshwelle eines Testtons angegeben und wird über der Zeit dargestellt. Zu beachten ist, dass für Nachverdeckung auf der einen Seite und für Vor- und Simultanverdeckung auf der anderen Seite unterschiedliche Koordinatenursprünge auf der Zeitachse gewählt wurden. Die Nachverdeckung, also die Verminderung der Hörbarkeit eines Testtons nach Ende des Maskierers, dauert bis zu 200 ms an. Die ersten 5 ms nach Ende des Maskierers ist der Verdeckungseinfluss gegenüber der Simultanmaskierung nahezu unverändert wahrzunehmen. Die darauf folgende Abnahme ist derart von der Dauer des Maskierers abhängig, dass eine längere Maskierungsdauer eine langsamere Abnahme bedingt. In allen Fällen ist der Einfluss jedoch nach ca. 200 ms nicht mehr vorhanden.

Da das Gehör Schalleindrücke unterschiedlicher Lautstärke unterschiedlich schnell verarbeitet (laute Geräusche werden schneller verarbeitet) kommt es zu dem Effekt der Vorverdeckung. Somit werden Testtöne die 20 ms vor Beginn des Maskierers auftreten bereits nicht mehr so gut wahrgenommen. Laut [ZF90] ist die Vorverdeckungsdauer nicht von dem Schalldruckpegel des Maskierers abhängig. Ob die Dauer des Maskierers hierauf eine Auswirkung hat, ist bislang ungeklärt.

Speziell für tieffrequenten Lärm wird ist der Maskierungseffekt weiterhin Gegenstand der Forschung. So ist gezeigt worden, dass die Wahrnehmung eines reinen, tieffrequenten Tons in ihrer Lästigkeitswirkung reduziert werden kann, wenn schmalbandiges Rauschen überlagert wird [WY10]. Die Wahrnehmungsschwelle von Sinustönen unter

50 Hz kann auf diese Weise um über 20 dB erhöht werden [SYM04].

2.1.6.3 Tonheit

Während die Frequenz eines Schallereignisses objektiv messbar ist, ist die Tonhöhe eine psychoakustische Größe die subjektiv empfunden wird. Die Bestimmung der wahrgenommenen Tonhöhe erfolgt experimentell, indem Probanden aufgefordert werden Töne so einzustellen, dass sie die doppelte, bzw. halbe Tonhöhe wie ein vorgegebener Referenzton aufweisen. Dabei tritt der Effekt auf, dass die Versuchspersonen meistens keinen linearen Zusammenhang zwischen Tonhöhe und Frequenz herstellen. Zum Beispiel wird die halbe Tonhöhe von 440 Hz mit 220 Hz angegeben, die halbe Tonhöhe von 8 kHz jedoch mit 1,3 kHz. Bezieht man die so erhaltenen Werte auf eine Frequenz von 125 Hz als Referenzpunkt, so erhält man die Verhältnistönhöhe oder Tonheit. Die Einheit der Tonheit wird in 'mel' angegeben, was eine Abkürzung für Melodie darstellt, da die Tonheit stark mit unserer Wahrnehmung von Melodie verbunden ist. Abbildung 2.11 verdeutlicht das Verhältnis von Frequenz und Tonheit.

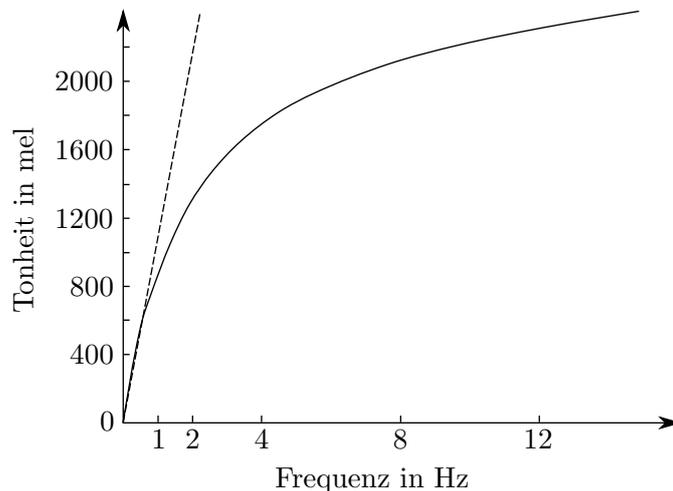


Abbildung 2.11: Zusammenhang zwischen Frequenz und Tonheit, dargestellt auf linearen Achsen. (Frei nach [ZF90])

Hier ist zu erkennen, dass das Verhältnis zwischen Frequenz und Tonheit im Frequenzbereich unter 500 Hz streng linear ist, wohingegen für Frequenzen am oberen Rand des wahrnehmbaren Spektrums deutlich tiefere Tonhöhen wahrgenommen werden. Zum Vergleich gibt die gestrichelte Linie einen linearen Verlauf an.

Dieses Verhalten des Gehörs ergibt sich direkt aus der Frequenzgruppenbildung in der *cochlea*. Hier werden bei der Verarbeitung von verschiedenen Schallereignissen die Intensitäten derjenigen Schallereignisse, welche spektral betrachtet nahe beieinander liegen, von dem Gehör zusammengefasst. Wie in Abbildung 2.12 kann man so die

2.1. DAS MENSCHLICHE GEHÖR

cochlea in 24 Frequenzgruppen aufteilen, welche einen Hörbereich von 0 bis 16 kHz abdecken.

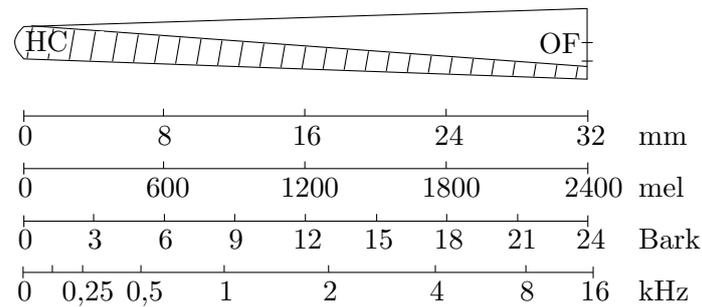


Abbildung 2.12: Zusammenhang zwischen Tonheit (in mel), Frequenzgruppen (in Bark) und Position (in mm) in der *cochlea* (hier abgerollt dargestellt) vom *helicotrema* (HC) aus zum ovalen Fenster (OF) gesehen. (Frei nach [ZF90])

Die Breite einer Frequenzgruppe wird hier als ein Bark definiert und deckt einen Abschnitt mit einer Länge von 1,3 mm ab. Der von den 150 sich in diesem Bereich befindlichen inneren Haarzellen abgedeckte Frequenzbereich ist hier von der Position innerhalb der *cochlea* abhängig. Während die vom *helicotrema* aus gesehen ersten vier Frequenzgruppen jeweils eine Bandbreite von 100 Hz abdecken, also den Frequenzbereich von 0 bis 400 Hz, nimmt die Breite zum ovalen Fenster hin logarithmisch zu und beträgt ca. 20% der betreffenden Bandmittenfrequenz. Dies führt dazu, dass die letzte Frequenzgruppe einen Frequenzbereich von 3500 Hz abdeckt.

Auf diese Weise kommt es dazu, dass eine Frequenz aus dem oberen Teil des Spektrums eine kleinere Zahl an Haarzellen anregt als eine tiefere Frequenz. So entsteht der Eindruck, dass höhere Frequenzen leiser wahrgenommen werden als niedrige Frequenzen mit gleicher Intensität. Auf das Lautstärkeempfinden wird im Abschnitt 2.1.6.4 näher eingegangen werden.

2.1.6.4 Lautheit

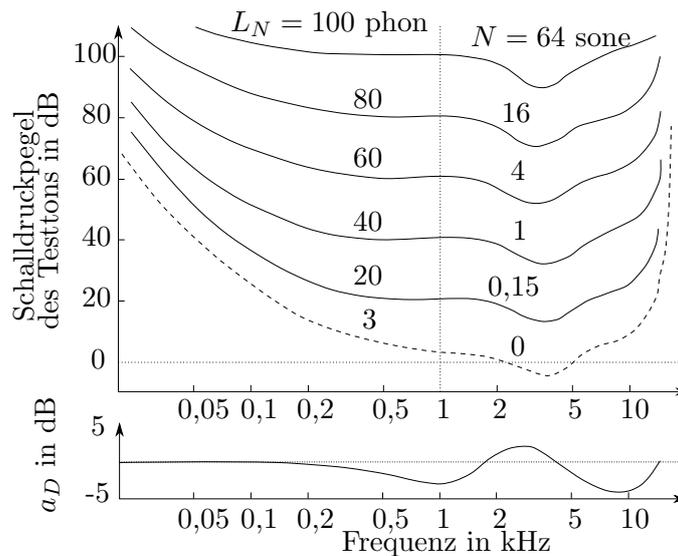


Abbildung 2.13: Oben: Kurven gleicher Lautheit für reine Töne im Freifeld mit der Lautstärkepegel L_N und der Lautheit N . Unten: Dämpfung a_D , welche benötigt wird um im Diffusfeld einen Ton mit gleicher Lautheit wie im Freifeld zu erzeugen. (Frei nach [ZF90])

Ähnlich dem in Unterkapitel 2.1.6.3 beschriebenen Empfinden von Tonhöhe kann auch die durch den Menschen empfundene Lautstärke als psychoakustische Größe beschrieben werden. Die sogenannte Lautheit, mit der Einheit 'sone', eines Tons beschreibt das Verhältnis der durch den Menschen wahrgenommenen Lautstärke zweier Töne. Sie kann genau wie die Tonheit durch Hörversuche bestimmt werden, in denen Probanden die empfundene Lautstärke zweier Töne, bzw. unterschiedliche Lautstärken des gleichen Tons vergleichen. Dies führt zu den in Abbildung 2.13 dargestellten Kurven gleicher Lautheit, welche angeben, welchen Schalldruckpegel ein einzelner reiner Ton besitzen muss, um als genauso laut wahrgenommen zu werden wie die anderen Töne auf dieser Kurve mit der gemeinsamen Lautheit N und dem Lautstärkepegel L_N . Während die Lautheit eine Größe rein auf der Wahrnehmungsebene darstellt, ist der Lautstärkepegel zu einem Teil auch physikalisch zu beschreiben. [ZF90]. Der Lautstärkepegel, angegeben in 'phon', ist der Schalldruckpegel eines 1 kHz Tons, der von einem Hörer als genauso laut empfunden wird wie ein ein anderer, reiner Ton.

Es ist zu beachten, dass diese Zusammenhänge nur für Töne gelten, welche als ebene Welle frontal auf den Hörer treffen. Für diffuse Schallfelder sind die Kurven mit dem im unteren Teil von Abbildung 2.13 gegebenen Dämpfungsfaktor a_D zu wichten. Die unterste, gestrichelte Kurve stellt die aus Abbildung 2.7 bekannte Ruheschwelle dar, welche auch eine Kurve gleicher Lautheit ist.

Da die Lautheit eine relative Größe ist, benötigt sie einen Bezugspunkt. Dieser wird in einem Sinuston von 1 kHz und einem Schalldruckpegel von 40 dB gewählt. Dieser Referenzton hat per Definition die Lautheit 1 sone.

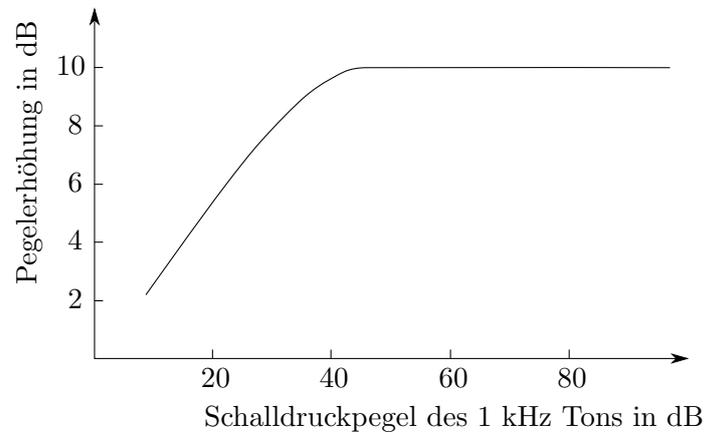


Abbildung 2.14: Benötigte Anhebung des Schalldruckpegels eines Tones um eine Verdoppelung der Lautheit zu erzielen. (Frei nach [ZF90])

Die zur Lautheitsbestimmung durchgeführten Hörversuche basieren oft auf der Betrachtung der Verdoppelung oder Halbierung der empfundenen Lautheit. Es erscheint also sinnvoll zu untersuchen, welche Vergrößerung des Schalldruckpegels eines Tones zu einer Verdoppelung der Lautheit führt. In Abbildung 2.14 ist dieses Verhältnis für einen 1 kHz Ton aufgeführt. Hier fällt auf, dass für niedrige Schalldruckpegel eine deutlich geringere Schalldruckerhöhung nötig ist um zu einer Verdoppelung der Lautheit zu gelangen. Für Pegel um 20 dB sind Pegelerhöhungen zwischen 2 und 6 dB nötig, wohingegen ab einem Pegel von 40 dB erst eine Erhöhung um 10 dB zu einer Verdoppelung der Lautheit führt.

2.1.6.5 Schärfe

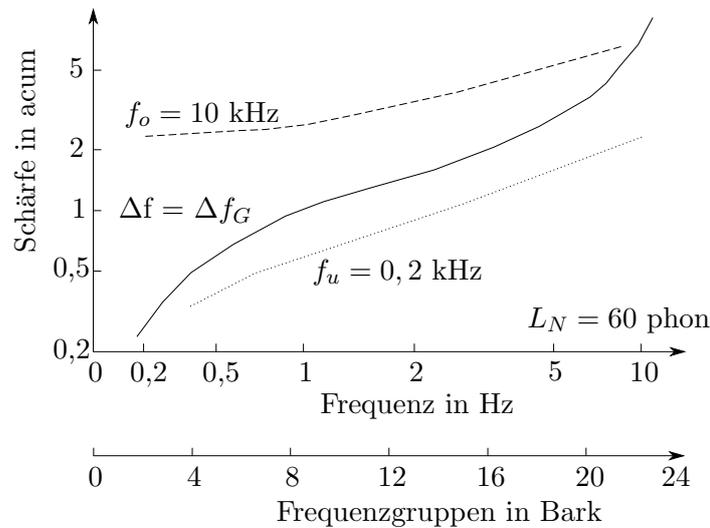


Abbildung 2.15: Durchgezogene Linie: Schärfe eines Schmalbandrauschens mit der Bandbreite von 1 Bark in Abhängigkeit von seiner Mittenfrequenz.
 Gestrichelte Linie: Schärfe eines bandbegrenzten Rauschens mit fester oberer Grenzfrequenz in Abhängigkeit von der unteren Grenzfrequenz.
 Gepunktete Linie: Schärfe eines bandbegrenzten Rauschens mit fester unterer Grenzfrequenz in Abhängigkeit von der oberen Grenzfrequenz.
 Alle Signale besitzen eine Lautstärkepegel von 60 phon. (Frei nach [ZF90])

Eine weitere, den Höreindruck von Geräuschen zu beschreibende psychoakustische Größe ist die in 'acum' angegebene Schärfe. Da auch diese dem Vergleich verschiedener Tonereignisse dient, wird ein Referenzgeräusch benötigt, auf das alle weiteren bezogen werden. Es handelt sich hierbei um Schmalbandrauschen mit einer Mittenfrequenz von 1 kHz, der Bandbreite von einem Bark und einer Lautheit von 60 phon. Die Schärfe dieses Referenzgeräusches beträgt 1 acum.

Abbildung 2.15 zeigt mit der durchgezogenen Kurve die Abhängigkeit der Schärfe eines Schmalbandrauschens (1 Bark Bandbreite) von seiner Mittenfrequenz. Die Lautheit liegt dabei konstant bei 60 phon. Hier fällt auf, dass die Schärfe für Frequenzen bis ca. 3 kHz nahezu proportional zu den Frequenzgruppen ansteigt. Bei hohen Frequenzen hingegen wächst die Schärfe allerdings deutlich stärker an, da die Frequenzgruppen bis 24 bark begrenzt sind. Dies führt dazu, dass höherfrequentes Schmalbandrauschen in seinem Höreindruck stark von der Schärfe dominiert wird.

Neben der Mittenfrequenz ist aber auch die Bandbreite des Rauschsignals für das Schärfeempfinden wichtig. Abbildung 2.15 zeigt die Schärfe eines bandbegrenzten Rauschens mit fester unterer Grenzfrequenz in Abhängigkeit von der oberen Grenzfrequenz (gepunktete Linie) einerseits und die Schärfe eines zweiten Rauschsignals mit fester oberer Grenzfrequenz abhängig von der unteren Grenzfrequenz.

Hier zeigt sich ein besonderer Effekt. Während das Hinzufügen von höherfrequenten Rauschanteilen die Schärfe erwartungsgemäß erhöht, führt die Addition von Rauschen mit tieferer Frequenz zu einer Verminderung der Schärfe.

2.1.6.6 Schwankungsstärke

Die Wahrnehmung modulierter Schallereignisse lässt sich durch zwei verschiedene psychoakustische Größen beschreiben. Signale mit einer Modulationsfrequenz unterhalb von 20 Hz werden durch die sogenannte Schwankungsstärke beschrieben. Signale mit einer größeren Modulationsfrequenz sind von der Rauheit geprägt, wie sie in Abschnitt 2.1.6.7 beschrieben wird. Der Übergang zwischen den beiden Phänomenen ist fließend. Die Schwankungsstärke ist unabhängig von anderen psychoakustischen Größen, was die Betrachtung sowohl von relativen Werten als auch von absoluten Werten ermöglicht. Daher gilt es einen festen Bezugspunkt zu definieren. Dieser wird für einen mit 4 Hz zu 100% modulierten 1 kHz Ton bei einem Schalldruckpegel von 60 dB, auf ein vacil festgelegt. Vacil ist hier die Einheit der absoluten Schwankungsstärke. Die relative Schwankungsstärke erlaubt es für eine gegebene Signalform, den Einfluß verschiedener Signalparameter auf die Schwankungsstärke darzustellen.

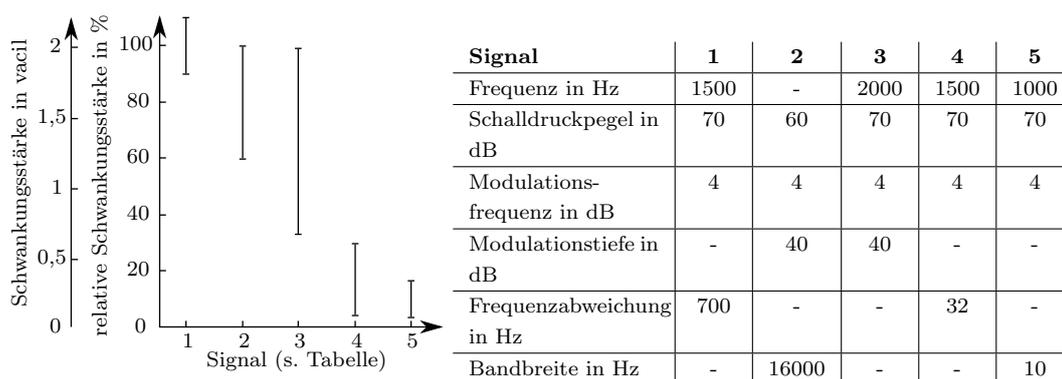


Abbildung 2.16: Absolute und relative Schwankungsstärke von fünf verschiedenen Signalformen. Signal 1: Frequenzmoduliertes Sinussignal. Signal 2: Amplitudenmoduliertes Breitbandrauschen. Signal 3: Amplitudenmoduliertes Sinussignal. Signal 4: Frequenzmoduliertes Sinussignal. Signal 5: Schmalbandrauschen. (Frei nach [ZF90])

In Abb. 2.16 sind die relative und absolute Schwankungsstärke für fünf verschiedene Signale angegeben. Hier ist zu erkennen, dass bei frequenzmodulierten Sinussignalen mit großer Frequenzabweichung die Wahrnehmung der Schwankungsstärke am deutlichsten hervortritt. Auch amplitudenmoduliertes Breitbandrauschen weist eine hohe Schwankungsstärke auf. Dieser Effekt verringert sich schon für das amplitudenmo-

dulierte Sinussignal. Die Schwankungsstärke des Schmalbandrauschens und des frequenzmodulierten Sinussignals mit geringer Frequenzabweichung wird hingegen als sehr gering wahrgenommen.

Dieses Verhalten legt nahe, dass die Schwankungsstärke über mehrere Frequenzgruppen hinweg aufaddiert wahrgenommen wird, was die geringe Wichtung der schmalbandigen Signale erklären würde.

Im weiteren wird der Einfluss verschiedener Signalcharakteristika auf die Wahrnehmung der Schwankungsstärke beschrieben. Hierbei soll lediglich das Verhalten für amplitudenmoduliertes Breitbandrauschen betrachtet werden. Für alle anderen Signalformen ist es aber ähnlich und kann genauer in [ZF90] nachgelesen werden.

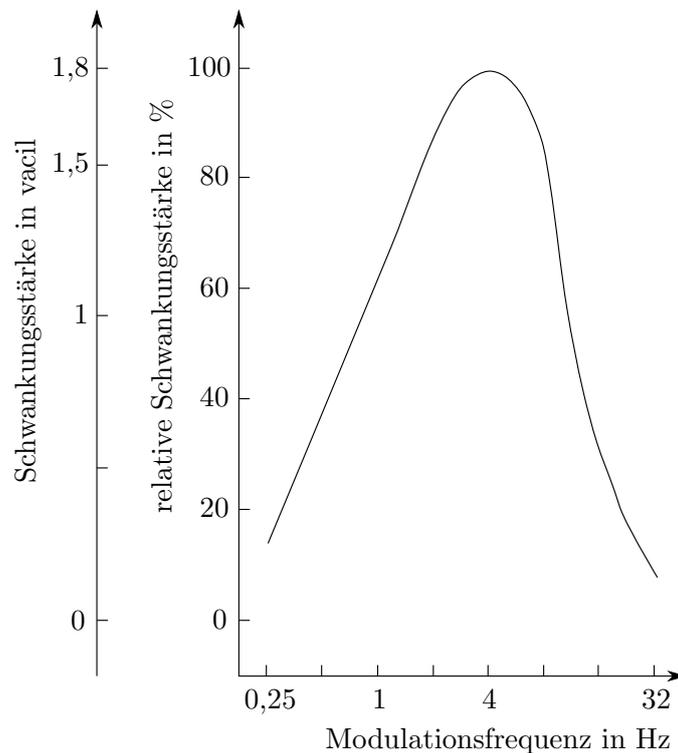


Abbildung 2.17: Schwankungsstärke eines amplitudenmodulierten Breitbandrauschens mit einem Schalldruckpegel von 60 dB und 40 dB Modulationstiefe in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz. (Frei nach [ZF90])

Abbildung 2.17 zeigt die Abhängigkeit eines amplitudenmodulierten, breitbandigen Rauschsignals von der Modulationsfrequenz. Das gezeigte Signal weist einen Schalldruckpegel von 60 dB und eine Modulationstiefe von 40 dB auf. Deutlich ist die Bandpasscharakteristik im Hinblick auf die Modulationsfrequenz zu erkennen. Die größte Schwankungsstärke wird demnach für eine Modulationsfrequenz von 4 Hz erreicht. Vor allem für höhere Frequenzen fällt die Schwankungsstärke stark ab und geht für Modulationsfrequenzen über 32 kHz gegen 0 vacil. Dieser Umstand lässt sich

vermutlich durch die Anpassung des menschlichen Gehörs an die Sprache erklären. Der Mensch erzeugt bei normaler Sprechgeschwindigkeit vier Silben pro Sekunde, was zu einer mit 4 Hz variierenden, zeitlichen Einhüllenden des Sprachsignals führt.

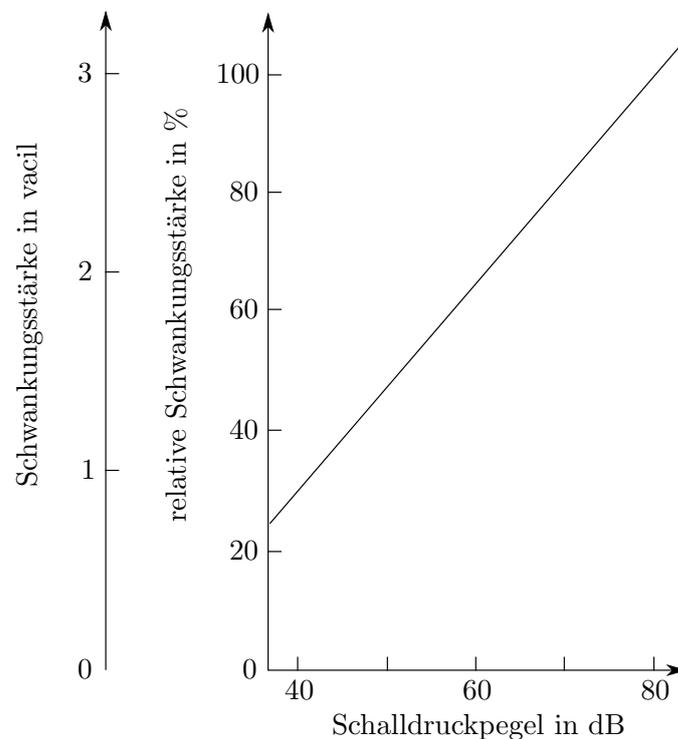


Abbildung 2.18: Schwankungsstärke eines amplitudenmodulierten Breitbandrauschens mit einer Modulationsfrequenz von 4 Hz und einer Modulationstiefe von 40 dB in Abhängigkeit von dem Schalldruckpegel des Signals. (Frei nach [ZF90])

Die Abhängigkeit der Schwankungsstärke von dem Schalldruckpegel des Signals wird in Abb. 2.18 beschrieben. Eine Erhöhung des Schalldruckpegels hat demnach immer eine Erhöhung der Schwankungsstärke zur Folge. Für amplitudenmodulierte Signale kann man sagen, dass eine Erhöhung des Schalldruckpegels um 20 dB in etwa zu einer Erhöhung der Schwankungsstärke um 1 vacil führt. Für frequenzmodulierte Signale fällt die Zunahme in der Schwankungsstärke leicht schwächer aus.

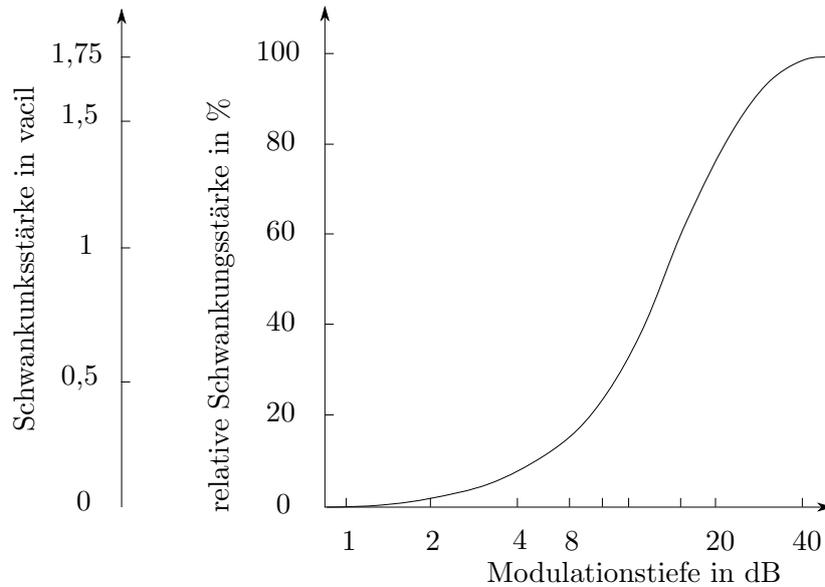


Abbildung 2.19: Schwankungsstärke eines amplitudenmodulierten Breitbandrauschens mit einem Schalldruckpegel von 60 dB und 4 Hz Modulationsfrequenz in Abhängigkeit von der Modulationstiefe. (Frei nach [ZF90])

Zuletzt wird der Zusammenhang zwischen Schwankungsstärke und Modulationstiefe in Abbildung 2.19 dargestellt. Eine Modulationstiefe unter 3 dB führt zu einer Schwankungsstärke von 0 vacil. Steigt diese weiter an, erhöht sich die Schwankungsstärke logarithmisch bis sich bei einer Modulationstiefe von ca. 30 dB das Maximum für das jeweilige Signal einstellt. Eine weitere Zunahme der Modulationstiefe führt zu keiner Änderung der Schwankungsstärke.

2.1.6.7 Rauheit

Während modulierte Signale mit einer Modulationsfrequenz bis ca. 10 Hz von dem im vorigen beschriebenen Phänomen der Schwankungsstärke geprägt sind, geht dieser Effekt für größere Modulationsfrequenzen in die Wahrnehmung von Rauheit über. Bei etwa 70 Hz erreicht sie ihr Maximum und nimmt für größere Modulationsfrequenzen dann wieder ab. Wie auch die Schwankungsstärke kann auch die Rauheit (gemessen in asper) unabhängig von anderen psychoakustischen Phänomenen betrachtet werden. Die wahrgenommene Rauheit wird hauptsächlich von der Modulationsfrequenz und für amplitudenmodulierte Signale vom Modulationsgrad bestimmt. Für frequenzmodulierte Signale sind Modulationsfrequenz und Modulationsindex ausschlaggebend. Die Rauheit eines 1-kHz-Tons, welcher zu 100% mit einer Modulationsfrequenz von 70 Hz amplitudenmoduliert ist, wird als Referenz benutzt und beträgt 1 asper.

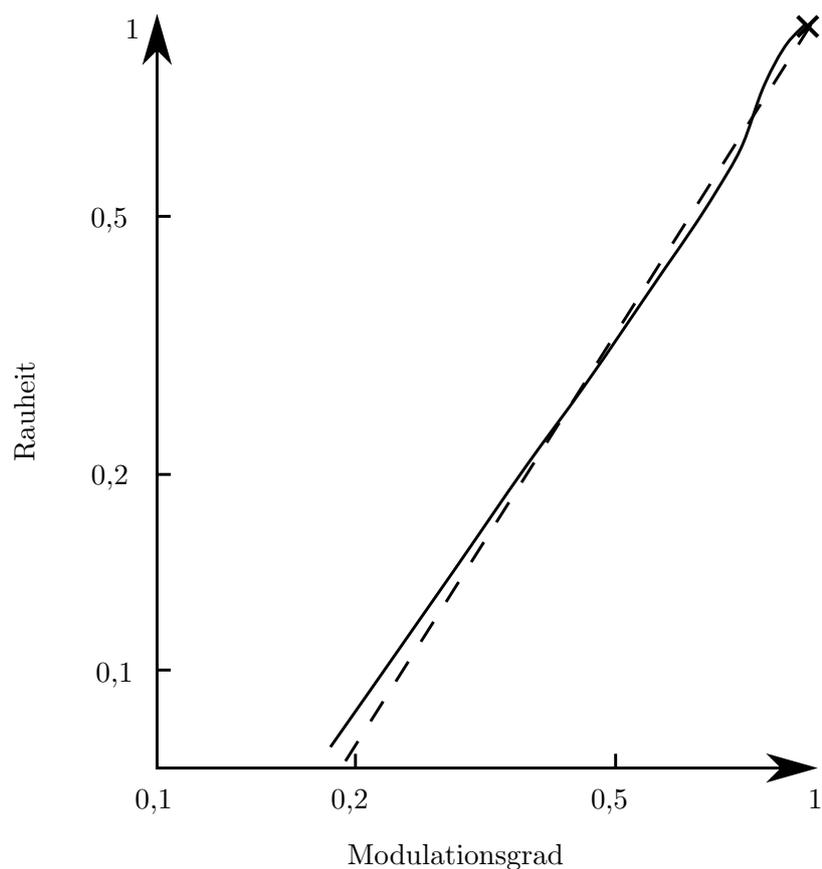


Abbildung 2.20: Rauheit eines mit 70 Hz amplitudenmodulierten 1-kHz-Tons abhängig vom Modulationsgrad. Die gestrichelte Linie gibt hier eine lineare Approximation an und das Kreuz gibt die Rauheit des Standarttons an. (Frei nach [ZF90])

Abbildung 2.20 zeigt den Zusammenhang zwischen Rauheit und dem Modulationsgrad am Beispiel eines zu 100% mit 70 Hz amplitudenmodulierten 1-kHz-Tons, gilt aber auch für andere Trägerfrequenzen. Es wird deutlich, dass ein größerer Modulationsgrad stets ein größeres Rauheitsempfinden zur Folge hat. Beträgt der Grad der Modulation weniger als 25%, so wird der Ton oft nicht mehr als rau wahrgenommen, beträgt er 100%, so wird der Ton als maximal rau empfunden.

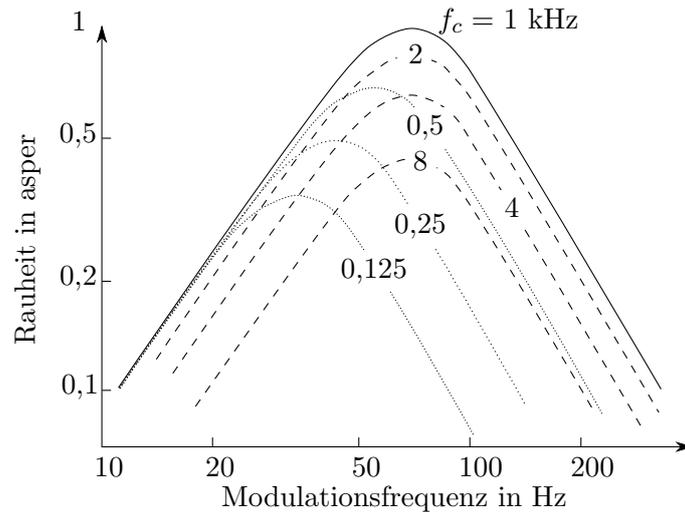


Abbildung 2.21: Rauheit von zu 100% amplitudenmodulierten Sinustönen verschiedener Frequenz in Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz. (Frei nach [ZF90])

Die Abhängigkeit der Rauheit von der Modulationsfrequenz ist im Gegensatz zu der Abhängigkeit von dem Modulationsgrad nicht annähernd linear. Wie in Abbildung 2.21 zu sehen ist, wird die Modulationsabhängigkeit der Rauheit eines zu 100% amplitudenmodulierten Tons auch von der Trägerfrequenz beeinflusst.

Für Trägerfrequenzen bis 1 kHz steigen sowohl das Maximum der Rauheit, als auch die dort erreichte Modulationsfrequenz mit zunehmender Trägerfrequenz an. Nimmt die Trägerfrequenz ab 1 kHz weiter zu, sinkt der absolute Wert der Rauheit im Maximum, allerdings wird die maximale Rauheit nun immer bei einer Modulationsfrequenz von ca. 70 Hz angenommen. Dies führt zu einem Bandpassverhalten in der Modulationsabhängigkeit der Rauheit, wobei die obere und untere Flanke in der logarithmischen Darstellung linear verlaufen.

Die Rauheitswahrnehmung von amplitudenmoduliertem Breitbandrauschen erzeugt eine ähnliche Abhängigkeit von der Modulationsfrequenz, wie die in Abb. 2.21 dargestellte. Die Zunahme der Rauheit mit steigendem Modulationsgrad ist jedoch etwas geringer.

Sowohl für Töne, als auch für Rauschsignale, ist der Einfluss des Schalldruckpegels auf die Rauheit sehr gering. So führt eine Erhöhung des Schalldruckpegels von 50 dB auf 90 dB lediglich zu einer Verdoppelung der Rauheit für Sinustöne und auch bei Rauschsignalen ist der Anstieg nicht viel größer.

2.2 Neue Untersuchungen zum Einfluß von multimodalen Effekten auf die Wirkung von TFL

Wie im vorigen Kapitel gezeigt, lässt sich die besondere Wirkung, die tieffrequenter Lärm auf einige Menschen ausübt, bislang nicht an physiologischen Gegebenheiten alleine ausmachen. Aus diesem Grund werden hier Hörtests vorgestellt, welche diesen Aspekt weiter untersuchen sollen. Das Hauptaugenmerk dieser Versuche ist zweigeteilter Natur. Zum einen sollen Anzeichen für die Ursache der besonderen Belästigung von Einzelpersonen aufgezeigt werden. Zum anderen sollen neue Versuchsmethoden auf ihre Tauglichkeit für die Lösung der gerade genannten Problemstellung hin untersucht werden. Die in diesem Kapitel vorgestellten Methoden vereinen verschiedene auditive Stimuli mit jeweils einem weiteren Sinnesindruck. Auf diese Weise sollen Indizien für einen verstärkenden multimodalen Effekt bei der Wahrnehmung von tieffrequentem Lärm aufgezeigt werden. Es muss hervorgehoben werden, dass die vorgestellten Hörversuche aufgrund der kleinen Stichproben lediglich als Voruntersuchungen aufzufassen sind, die Methodiken untersuchen und Tendenzen aufzeigen sollen.

Daten	1	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Anzahl	1	3	4	5	12	13	4	3	3	1

Tabelle 2.2: Daten zur Verwendung in dem Beispielboxplot in Abbildung 2.22.

Die Auswertung der von den verschiedenen Probanden gegebenen Antworten und auch der passiven Daten werden hier in der Regel durch Boxplots beschrieben. Aus diesem Grund wird dieser im Folgenden vorgestellt. Zu dem Zweck wird eine Versuchsreihe angenommen, in der Antworten zwischen 1 und 100 möglich sind. Insgesamt werden dabei 49 Antworten abgefragt, welche in Tabelle 2.2 zu sehen sind. Die Verteilung dieser Daten ist in Form eines Boxplots in Abbildung 2.22 dargestellt.

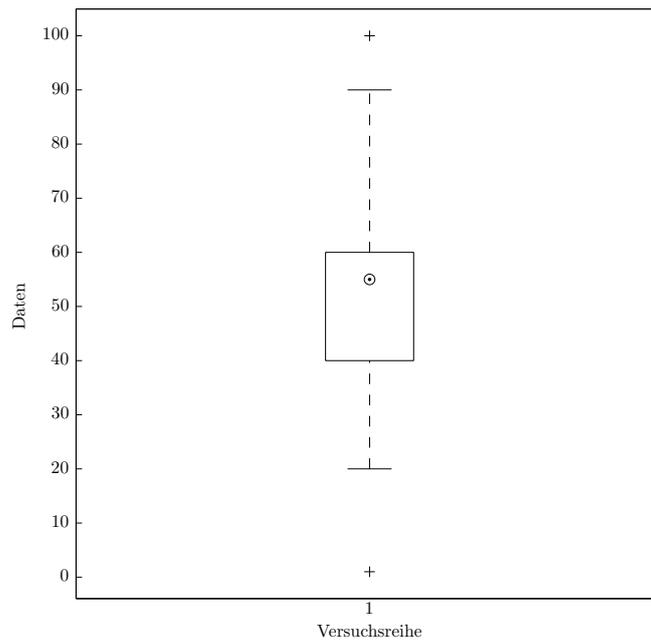


Abbildung 2.22: Boxplot der Beispieldaten aus Tabelle 2.2.

Die namensgebende Box wird durch das obere und untere Quartil begrenzt. Das heißt 25% der Daten liegen sowohl oberhalb als auch unterhalb der Box, so dass folglich 50% der Daten innerhalb der Box liegen. Die beiden gestrichelt dargestellten Antennen umfassen, in der in dieser Arbeit gewählten Darstellung, das 1,5-fache des Interquartilabstandes, also des Abstandes der beiden Quartile der Box, und enden bei dem letzten Wert der noch innerhalb dieses Bereiches liegt. Daten außerhalb der Antennen werden als Ausreißer behandelt und durch Kreuze dargestellt. Fallen oberes oder unteres Quartil auf die Datengrenzen, so sind die Antennen nicht sichtbar. Der Median der gesamten Datenreihe ist als gepunkteter Kreis zu erkennen.

2.2.1 Versuch 1 - Untersuchung audiovisueller Kopplung

In diesem Hörversuch soll in einer ersten Untersuchung der Einfluss von Synchronität auf gleichzeitige auditive und visuelle Wahrnehmung untersucht werden. Das Hauptaugenmerk liegt hierbei auf der Wirkung von tieffrequentem Schall bei gleichzeitiger Aufnahme von visuellen Stimuli, die aus dem akustischen Signal abgeleitet wurden. Die Wiedergabe von Audio- und Videosignal erfolgte in zwei Gruppen, von der die erste eine zeitsynchrone Kombination der beiden Stimuli vorgespielt bekam, während bei der zweiten Gruppe eine nicht synchrone Wiedergabe erfolgte.

2.2.1.1 Planung

Ziel der Untersuchung war es, einen ersten Eindruck zu erhalten ob und gegebenenfalls wie die akustische Wahrnehmung von tieffrequentem Schall durch visuelle Eindrücke verstärkt werden kann und inwieweit zeitliche Synchronität der Stimuli diese beeinflusst. Daher stand die Auswahl eines geeigneten akustischen Stimulus an erster Stelle. Die Wahl fiel hierbei auf ein braunes Rauschen, welches mit einem steilflankigen Filter mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz tiefpassgefiltert wurde. Innerhalb von Untersuchungen [Kra10] wurde dieser Stimulus von der Mehrzahl der Probanden als besonders belästigend beschrieben, was vorangegangene, ähnliche Beschreibungen [LPB03] bestätigen. Hier dient dieser Stimulus als Repräsentant von tieffrequentem Lärm. Das Spektrum des Signals ist in Abbildung 2.23 zu sehen.

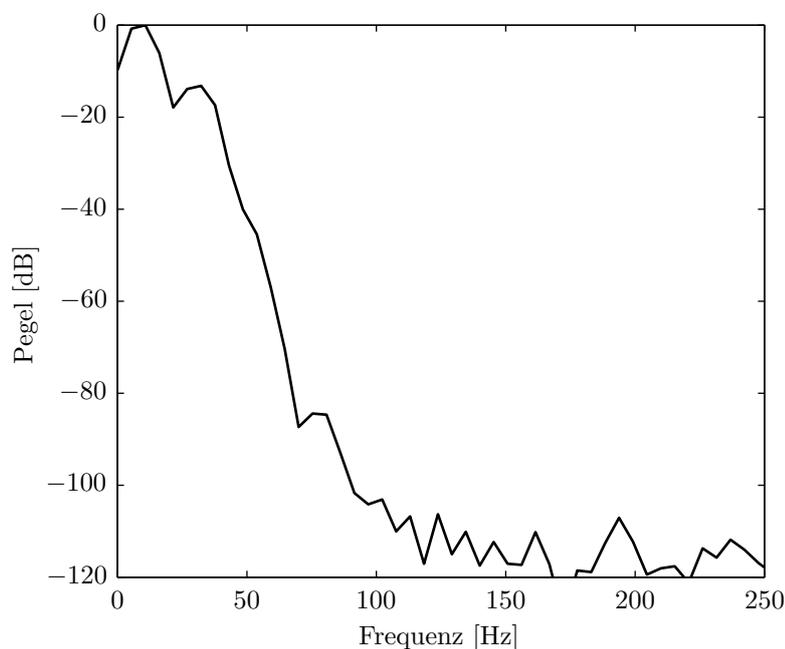


Abbildung 2.23: Spektrum des verwendeten akustischen Stimulus. (Mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz tiefpassgefiltertes, braunes Rauschen.)

Der visuelle Stimulus bestand aus einem Videosignal von zwei Minuten Länge, welches sich aus einer Abfolge von Flächen mit jeweils unterschiedlichem Grauwert zusammensetzte. Um die Grauwerte der einzelnen Bilder zu erhalten wurde das Audiosignal zunächst über ein Dezimationsfilter von der Abtastrate von 48 kHz auf die Bildwiederholfrequenz des Videosignals (60 fps) überführt. Die Momentanwerte des so erzeugten Signals ergeben, abgebildet auf den Wertebereich von 0 (Schwarz) bis 1 (Weiß), die Grauwerte der einzelnen Bilder. Die Kombination beider Stimuli erfolgte nun durch das Zusammenfügen dieser Signale in einer Videodatei. Dabei entstand ein zeitsyn-

chrones Signal, bei dem beide Stimuli zum gleichen Zeitpunkt starteten und ein asynchrones Signal, für das beide Stimuli zeitlich leicht um einen zufällig gewählten Versatz gegeneinander verschoben wurden. Um den möglichen unterschiedlichen Einfluss dieser Verschiebung festzustellen wurden die Probanden in zwei Gruppen unterteilt. Die Testgruppe sah das zeitlich synchrone Video und die Kontrollgruppe das asynchrone Video. Die verwendeten Stimuli bzw. Stimuluskombinationen sind in Tabelle 2.3 zu sehen.

Nummer	Stimulus
1	Audio
2	Video
3 - Testgruppe	Audio + Video, synchron
3 - Kontrollgruppe	Audio + Video, asynchron

Tabelle 2.3: Aufstellung der im ersten Hörversuch verwendeten Stimuli.

Insgesamt wurden im Rahmen dieses Versuches 42 Probanden befragt. Das Alter der Testpersonen lag zwischen 15 und 73 Jahren. Fünfzehn Probanden waren weiblich und 27 männlich. Die weiblichen und die männlichen Probanden wurden zu gleichen Teilen zufällig auf zwei Gruppen aufgeteilt, so dass die Geschlechterverteilung in den einzelnen Gruppen in etwa der der Gesamtstichprobe entsprach (Gesamt: 35%, Testgruppe: 38%. Kontrollgruppe: 33%).

2.2.1.2 Durchführung

Die Durchführung des Hörtests fand im reflexionsarmen Halbraum des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik, Audiosignalverarbeitung und InCar Noise Control der Bergischen Universität Wuppertal statt. Die Wahl dieses Ortes sollte den von außen kommenden Schall minimieren und so eine möglichst unbeeinflusste Aufnahme der akustischen Stimuli gewährleisten. Dort saßen die Probanden auf einem bequemen Bürostuhl vor einer Leinwand, auf die die visuellen Stimuli und das interaktive Begleitprogramm, das den Probanden durch den Versuch führte, von dem im selben Raum befindlichen Beamer projiziert wurden. Die Wiedergabe der Audiosignale erfolgte über einen Tieftonlautsprecher der sich in einer Ecke des Raumes befand.

Die Ergebnisse wurden auf drei Arten erfasst: Die subjektive Wahrnehmung der Probanden wurde während des Versuchs im Rahmen des Begleitprogramms anhand mehrerer Fragen abgefragt. Diese beschäftigten sich mit die Stimuli betreffenden Assoziationen, dem allgemeinen Befinden und vor allem der Frage, wie die Probanden den Stimulus auf einer Skala von 'angenehm' (0) bis 'äußerst störend' (5) empfanden. Die

Abfrage der semi-objektiven Wahrnehmung erfolgte über einen Reaktionstest in dem die Probanden sich nacheinander zwei Abfolgen von aufblinkenden Farben merken und danach richtig wiedergeben mussten. Während des gesamten Versuchs wurden Hauttemperatur und Puls der Probanden durch ein corpuls-Biodaten-Messsystem aufgezeichnet, um so ein objektives Bild der Reaktion der Testpersonen auf die Stimuli zu erhalten.

Der Ablauf des Hörversuchs ist in Abbildung 2.24 zu sehen. Er beginnt mit einleitenden Fragen zu den Probanden. Darauf folgen die drei in 2.2.1.1 beschriebenen Stimuli, wobei sowohl vor als auch nach der Wiedergabe des Stimulus ein Reaktionstest, wie er weiter unten beschrieben ist, durchgeführt wurde. Nach dem jeweils zweiten von diesen waren Fragen zu dem speziellen Stimulus zu beantworten.

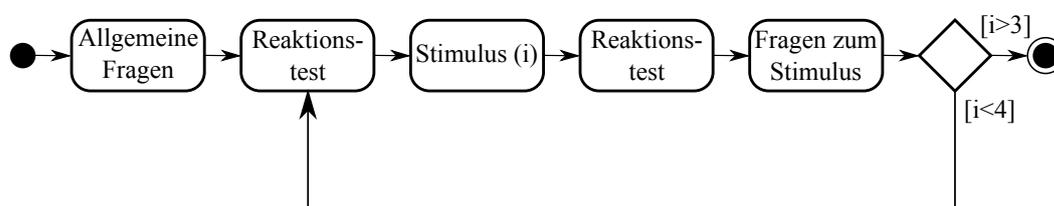


Abbildung 2.24: Verlaufsdiagramm des ersten Hörversuchs.

Der im Rahmen dieses Hörversuches verwendete Reaktionstest besteht im wesentlichen aus vier aneinandergrenzenden Quadraten der Farben Rot, Gelb, Blau und Grün, welche mittels des Begleitprogramms über den Beamer ausgegeben werden. Nachdem diese Quadrate in zufällig bestimmter Reihenfolge nacheinander aufleuchten (vier bis sechs mal, zufällig bestimmt), sollte der Proband diese Abfolge möglichst schnell und richtig mit Hilfe des Eingabegerätes wiederholen. Dabei wurden von dem Programm sowohl die Richtigkeit als auch die Geschwindigkeit der Antwort aufgezeichnet. Jeder einzelne der Tests bestand aus je zwei Durchläufen, um den Einfluss von einfach zu merkenden Abfolgen zu verringern. Ziel dieser Reaktionstests sollte es sein einen möglichen Einfluss der verschiedenen Stimuli auf die Reaktions- und Erinnerungsfähigkeit der Probanden festzustellen.

2.2.1.3 Ergebnisse

Die Auswertung der subjektiven Versuchsergebnisse fußt hauptsächlich auf der Frage, für wie störend die Probanden die drei Stimuli befanden. Wie in Abbildung 2.25 auf der linken Seite zu sehen ist, empfand der Großteil der Probanden beider Gruppen den auditiven Stimulus lediglich als leicht belästigend, der Median liegt jeweils bei '2', bzw. 'neutral'. Auffallend ist, dass ein Proband aus der Testgruppe den rein auditiven Reiz als 'äußerst störend' ('4') wahrnahm und sich hier deutlich von den anderen

Teilnehmern unterschied. Eine Aufschlüsselung der Einzelantworten der verschiedenen Probanden ist im Anhang in Abb. 5.1 bzw. Abb. 5.2 zu finden. Diese Gegebenheit kann als Indiz auf die Existenz von Personen mit besonderer Wahrnehmung von tiefrequentem Schall gesehen werden. Sie ist alleine sicher nicht aussagekräftig, lässt jedoch weitere Untersuchungen in diese Richtung sinnvoll erscheinen.

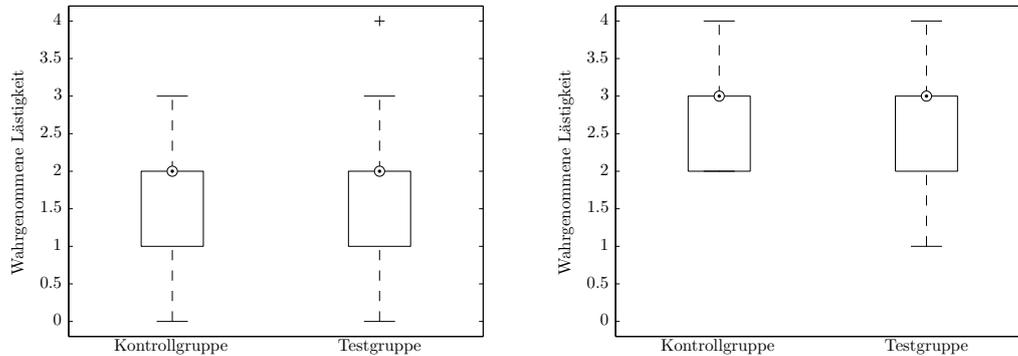


Abbildung 2.25: Boxplots der empfundenen Lästigkeit des auditiven Stimulus (links) und des visuellen Stimulus (rechts) auf einer Skala von 0 bis 4.

Der visuelle Stimulus wurde von den Teilnehmern im Verhältnis zu dem auditiven, bei einem Median von '3', bzw. 'neutral/äußerst störend' als deutlich unangenehmer eingestuft. Der im obigen Absatz erwähnte Proband gab die Belästigung durch den visuellen Stimulus mit '2' an.

Es wird erkenntlich, dass der Einfluss des visuellen Stimulus auf die Testpersonen in den meisten Fällen stärker ausfällt, als der des auditiven Stimulus. Von den 42 Probanden empfanden nur drei beide Stimuli als im gleichen Maße störend und einer den auditiven als größere Belästigung. Dieser Umstand leitet sich mit großer Wahrscheinlichkeit aus dem sehr eindringlichen Effekt her, den der visuelle Stimulus in dem reflexionsarmen Halbraum hatte. Die schnellen Wechsel des Videosignals zwischen hell und dunkel wurde von den weißen Absorbern des Raums verstärkt und führten bei den Probanden zu der Wahrnehmung, dass der ganze Raum 'flackerte'. Die Vermutung, dass der Effekt des visuellen Stimulus deutlich in den Vordergrund getreten ist, wird durch die Auswertung des kombinierten Stimulus bestärkt.

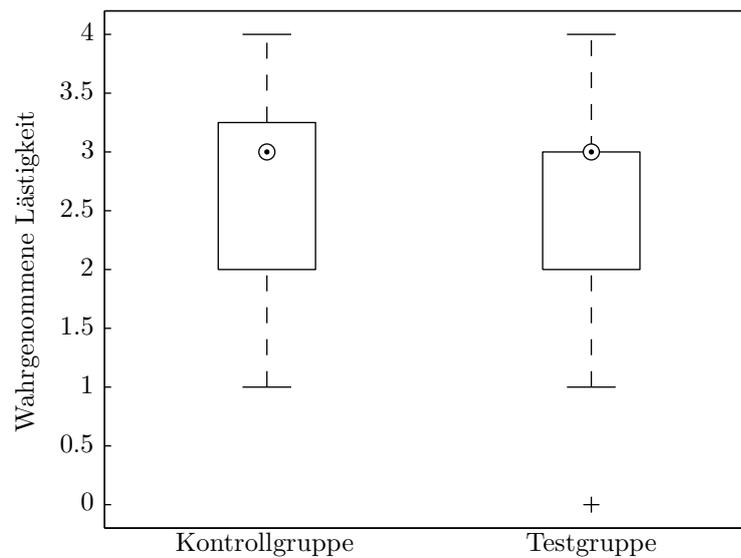


Abbildung 2.26: Boxplot der empfundenen Lästigkeit des audiovisuellen Stimulus.

Vergleicht man die Ergebnisse für den kombinierten Stimulus, welche in Abbildung 2.26 zu sehen sind, mit denen der einzelnen Stimuli, so fällt auf, dass die Kombination von auditivem und visuellem Signal von den Probanden insgesamt für genauso störend befunden wurde wie der visuelle Stimulus alleine. Beide Stimuli besitzen einen Median von '3' und weisen nahezu den gleichen Interquartilsabstand auf. Die Ursache hierfür ist sicher in der Dominanz des visuellen Signals zu sehen. Der auditive Reiz war nicht "stark genug" um im Zusammenspiel mit dem visuellen noch Einfluss nehmen zu können. In den Voruntersuchungen zu diesem Hörversuch war dies nur ansatzweise zu erkennen, da in diesem Fall die Testpersonen ausschließlich aus Mitarbeitern bestanden, die sich sehr auf den tieffrequenten Lärm als Gegenstand des Versuchs konzentrierten.

Bei Betrachtung sowohl der Ergebnisse der Einzelstimuli, als auch des kombinierten Stimulus wird kein Unterschied in der Wahrnehmung durch Kontrollgruppe und Testgruppe erkennbar. Dies legt den Schluss nahe, dass die Synchronität zwischen auditivem und visuellem Stimulus, im Rahmen dieses Hörversuchs, keinen Einfluss auf die Wahrnehmung der Probanden hat. Unterstützt wird diese Aussage durch die Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnow-Tests für zwei Wahrscheinlichkeitsverteilungen. Hier wird die Nullhypothese, dass die Ergebnisse von Kontroll- und Testgruppe der selben Wahrscheinlichkeitsverteilung entstammen, für alle drei Stimuli mit hohem Signifikanzniveau (Stimulus 1: $p = 0,5746$, Stimulus 2: $p = 0,8323$, Stimulus 3: $p = 0,4178$) angenommen.

2.2. NEUE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON MULTIMODALEN EFFEKTEN AUF DIE WIRKUNG VON TFL

Die Ergebnisse der semi-objektiven, so wie die der objektiven Messwerterfassungen untermauern diese Aussage.

Abbildung 2.27 zeigt, wie groß der Anteil richtiger Antworten an den zwölf Reaktionstests war. Zu beachten ist dabei dass die Länge der einzelnen Reaktionstests nicht gleich war, sondern zufällig zwischen vier und sechs nötigen Antworten schwankte. Dies führte folglich dazu, dass die kürzeren Reaktionstests mit größerer Wahrscheinlichkeit richtig beantwortet wurden als die längeren.

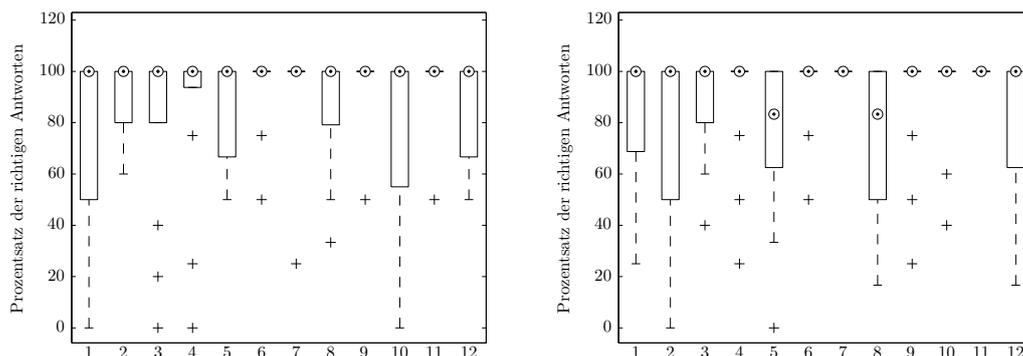


Abbildung 2.27: Prozentuale Anzahl richtiger Antworten in den einzelnen Reaktionstests. Links: Kontrollgruppe. Rechts: Testgruppe.

Die Länge der einzelnen Reaktionstests ist Tabelle 2.4 zu entnehmen. Immer vier Tests beziehen sich auf einen Stimulus, jeweils zwei davon vorher und zwei nachher. Deutlich ist so die Korrelation zwischen Länge des Tests und prozentualer Richtigkeit der Antworten zu erkennen.

Nummer des Reaktionstests	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Anzahl benötigter Antworten	4	5	5	4	6	4	4	6	4	5	4	6

Tabelle 2.4: Übersicht über die in den zwölf Reaktionstests mögliche Anzahl an richtigen Antworten.

Einzig der erste Reaktionstest weist deutlich mehr falsche Antworten auf als der Rest der Tests mit vier Antworten. Dies trägt der nötigen Eingewöhnung in diese Testmethode Rechnung und war zu erwarten. Dennoch wurde auch dieser von mehr als 50% der Probanden vollständig richtig beantwortet. Wobei die kürzeren Tests, wie zu erwarten, zu besseren Ergebnissen führten.

2.2. NEUE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON MULTIMODALEN EFFEKTEN AUF DIE WIRKUNG VON TFL

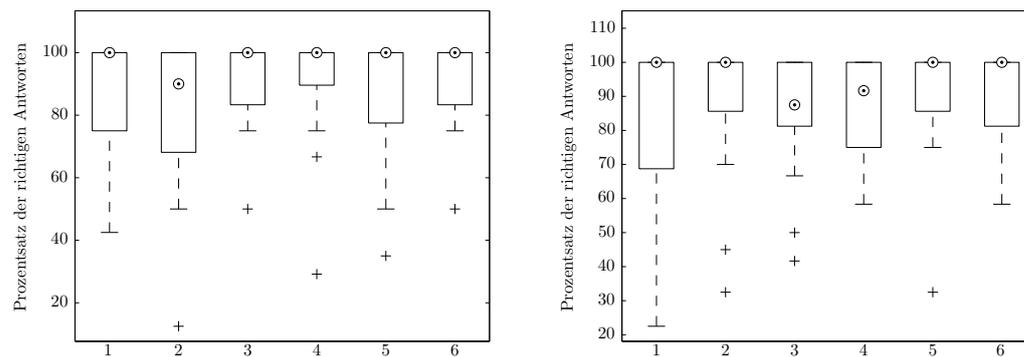


Abbildung 2.28: Prozentuale Anzahl richtiger Antworten, gemittelt über je zwei Reaktionstests. Links: Kontrollgruppe. Rechts: Testgruppe.

Der Einfluss der unterschiedlichen Reaktionstestlänge auf die Auswertung konnte minimiert werden, indem jeweils die zwei Tests vor bzw. nach dem jeweiligen Stimulus zusammengefasst und gemittelt worden, was zu der in Abbildung 2.28 beschriebenen Verteilung richtiger Antworten führt.

Die Durchführung der Reaktionstests sollte überprüfen, inwieweit die Stimuli Einfluss auf Reaktionsfähigkeit und Konzentration der Probanden nehmen können. Vergleicht man den Prozentsatz richtiger Antworten vor den Stimuli mit dem nach den Stimuli, wird deutlich, dass die Fähigkeiten der Probanden, den Test richtig zu lösen, nicht beeinträchtigt wurden. Die prozentuale Anzahl richtiger Antworten nach den einzelnen Reizen hätte deutlich nach unten abweichen müssen um diese These zu bestätigen. Da dies nicht beobachtet werden konnte, kann man davon ausgehen dass die in diesem Hörtest verwendeten Stimuli keinen negativen Einfluss auf die Reaktions- und Erinnerungsfähigkeit der Probanden hatten.

Genauso wie die semi-objektiven Daten konnte auch die Auswertung der Biodaten der Probanden keinen Hinweis auf derartige Effekte liefern. Abbildung 2.29 zeigt, von links nach rechts, die Raumtemperatur zu Beginn des Hörversuchs, die durchschnittliche Körpertemperatur der Probanden nach den drei Stimuli und die Raumtemperatur am Ende des Hörversuchs für die Kontrollgruppe in der rechten Grafik und die Testgruppe in der linken.

Die Körpertemperatur der Probanden steigt ausgehend von dem Wert nach dem ersten Stimulus leicht (im Durchschnitt um knapp ein Grad Celsius) an, verändert sich jedoch bis zum Ende des Hörtests nicht weiter. Dies ist weniger auf die Reaktion auf die verschiedenen Stimuli, als auf die Raumtemperatur zurückzuführen. Letztere steigt im Verlauf eines einzelnen Durchlaufs durchschnittlich um 5°C an und hat so direkten Einfluss auf die Testpersonen.

2.2. NEUE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON MULTIMODALEN EFFEKTEN AUF DIE WIRKUNG VON TFL

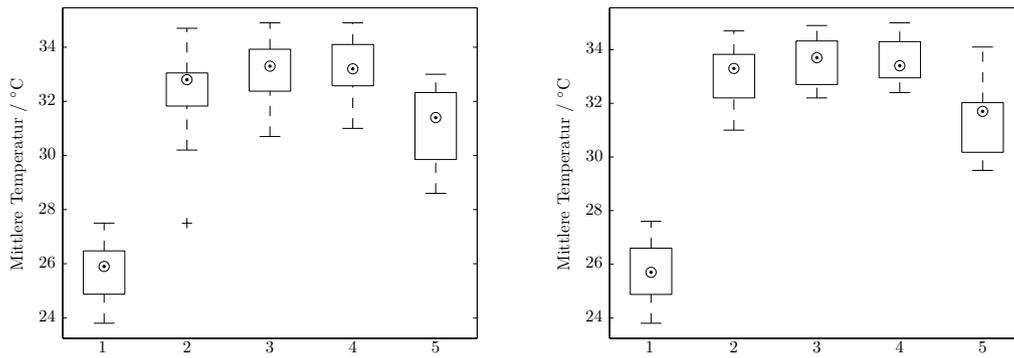


Abbildung 2.29: Mittlere Temperatur während des Hörtests. 1: Raumtemperatur vor dem Hörversuch, 2-4: Körpertemperatur nach den jeweiligen Stimuli, 5: Raumtemperatur am Ende des Hörtests. Links: Kontrollgruppe. Rechts: Testgruppe.

Genau wie die Körpertemperatur zeigt auch der in Abbildung 2.30 zu sehende Puls der Probanden keine Beeinflussung durch die verschiedenen Stimuli. Der mittlere Puls beider Gruppen verändert sich kaum im Verlauf des Hörversuchs. Im Zusammenhang damit deutet die Verkleinerung der Interquartilsabstände und der Antennen darauf hin, dass sich die Probanden bis zum Ende hin immer weiter beruhigen.

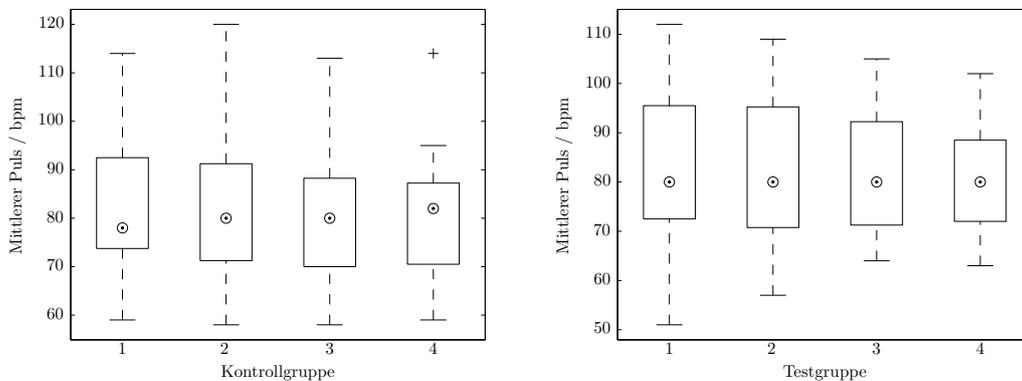


Abbildung 2.30: Mittlerer Puls während des Hörtests. 1: Ruhepuls vor dem Hörversuch, 2-4: Puls nach den jeweiligen Stimuli. Links: Kontrollgruppe. Rechts: Testgruppe

Die Betrachtung des Pulses der einzelnen Probanden in Abbildung 5.7 zeigt eine Testperson für die dies nicht zuzutreffen scheint. Während der Puls der Anderen sich im Verlauf des Versuchs entweder beruhigt oder gleich bleibt, erhöht sich bei dieser einen Person der Puls ausgehend von einem niedrigen Ruhepuls. Die Auswertung

von Körpertemperatur und Antworten auf die Reaktionstests zeigen keine weiteren Auffälligkeiten, jedoch gehört dieser Proband zu den Teilnehmern, die den kombinierten Stimulus als deutlich lästiger als die vorigen empfunden haben. Anzumerken ist hier, dass dieser Proband nicht der selbe ist, der den auditiven Stimulus als besonders lästig beschrieben hatte. Dennoch kann auch dieser Umstand als weiterer Hinweis auf die These, dass es Einzelpersonen gibt auf die tieffrequenter Schall als besondere Belästigung wirkt, gesehen werden.

2.2.1.4 Zusammenfassung

Auf der einen Seite konnte die These, dass die zeitsynchrone Aufnahme von auditiven und visuellen Signalen zu einer verstärkten Wahrnehmung des tieffrequenten Stimulus führt, im Rahmen dieses Hörversuches nicht bestätigt werden, da keine Unterschiede in der Wahrnehmung der kombinierten Signale zwischen Kontroll- und Testgruppe zu erkennen waren. Auf der anderen Seite kann sie jedoch auch nicht ausgeschlossen werden, da, aufgrund der Dominanz des visuellen Signals, die Wahrnehmung des tieffrequenten Stimulus durch die Probanden soweit in den Hintergrund trat, dass keine Rückschlüsse auf eine verstärkte Wahrnehmung des auditiven Stimulus gezogen werden konnten. Dies hebt hervor, dass in weiteren Versuchen verstärkt auf den Abgleich verschiedener Reizformen geachtet werden muss. Vor allem die Präsentation von Videosignalen über einen Beamer ist in Frage zu stellen. Eben diese führte mit großer Wahrscheinlichkeit in Verbindung mit den weißen Wänden des reflexionsarmen Halbraums zu der deutlichen Dominanz des visuellen Stimulus. Bei der Auswertung des Versuchs fielen zwei Probanden auf. Der erste bewertetet das auditive Signal im Gegensatz zu den restlichen Testpersonen als deutlich unangenehmer als die anderen Stimuli. Ein zweiter zeigte, anders als die übrigen Probanden, einen über den Verlauf des Hörversuchs steigenden Puls. Beide Auffälligkeiten können durchaus als Zufälle angesehen werden, geben dennoch weitere Indizien auf die Richtigkeit der These, dass es Einzelpersonen gibt, auf welche tieffrequenter Lärm deutlich störender wirken kann als auf andere Menschen.

2.2.2 Versuch 2 - Weiterführende Untersuchung audiovisueller Kopplung

Der im Folgenden beschriebene Hörversuch beschäftigt sich mit der kombinierten Wirkung von visuellen und tieffrequenten auditiven Reizen. Er greift die Ergebnisse der in Abschnitt 2.2.1 beschriebenen Untersuchung auf und führt diese weiter. Dort wurde festgestellt, dass ein über Beamer und Leinwand wiedergegebenes Videosignal eine äußerst belästigende Wirkung auf die Probanden haben kann, welche den Einfluss eines auditiven Stimulus deutlich maskiert. Daher wird in diesem Versuch das visuelle Signal den Testpersonen mittels einer Videobrille präsentiert.

2.2.2.1 Planung

Das Ziel dieses Hörversuchs war es, weitere Erkenntnisse über die gleichzeitige Wirkung von visuellen Reizen und tieffrequentem Lärm zu erhalten. Ausgehend von den Ergebnissen des vorhergegangenen Hörversuchs wurde wiederum braunes Rauschen, welches zusätzlich ein steilflankiges Filter durchlaufen hatte, als auditiver Stimulus verwendet. Zusätzlich fand ein ähnliches Audiosignal Verwendung, welches mittels eines flachflankigen Filters generiert wurde. Auf diese Weise sollte einerseits die, aus vorangegangenen Untersuchungen [Kra10] bekannte, stärkere Wirkung eines steilflankigen Signals gezeigt werden und andererseits ein eventuell vorhandener Unterschied in der audiovisuellen Wirkung untersucht werden. Die Spektren beider Signale sind in Abbildung 2.31 zu sehen.

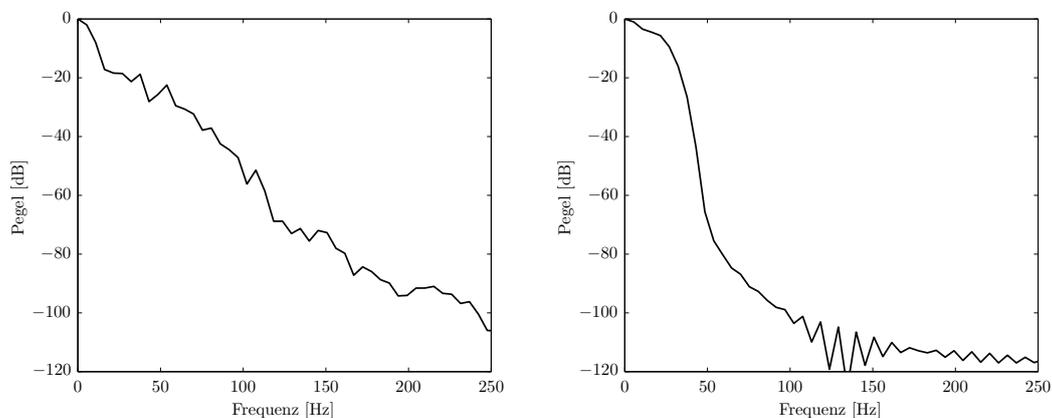


Abbildung 2.31: Spektren der verwendeten akustischen Stimuli. (Mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz tiefpassgefiltertes, braunes Rauschen. Links: Filter mit flacher Flanke. Rechts: Filter mit steiler Flanke.)

Die visuellen Signale wurden wie in 2.2.1.1 beschrieben aus den Audiodaten gewonnen und stellten sich als schnelle Abfolge wechselnder Grauwert-Bilder da. Da in dem vorangegangenen Hörversuch die Videosignale von den Probanden als im Vergleich

zu den Audiostimuli deutlich lästiger empfunden wurden, kamen hier zusätzlich eine weitere Form von visuellem Stimulus zum Einsatz. Diese wurde nicht direkt aus den Audiodaten gewonnen, sondern aus deren Einhüllenden. Das Ergebnis entsprach einer tiefpassgefilterten Version der ursprünglichen Daten. Aus diesem Grund enthielt die zweite Stimulusart nur sehr langsame Wechsel zwischen hellen und dunklen Flächen und hatte nicht den "flackernden" Charakter der den ursprünglichen Videodaten zu eigen war und wurde daher von den Probanden als deutlich weniger lästig empfunden. Die Audiosignale blieben unverändert. Die Kombination auditiver und visueller Signale sowohl mit als auch ohne zeitliche Verzögerung erzeugte auch in diesem Versuch einen synchronen und einen asynchronen Stimulus.

Der Hörversuch sollte mit insgesamt 29 Personen durchgeführt werden, deren Alter zwischen 24 und 66 Jahren lag. Nach Teilnahme von 16 Probanden, acht davon weiblich und acht männlich, stellte sich heraus, dass die Kombination von auditiven Reizen und den aus der Einhüllenden gewonnenen visuellen Stimuli nicht als belastigender empfunden wurde als die auditiven Signale alleine. Den verbleibenden 13 Testpersonen (drei weiblich und zehn männlich) wurde daher in einem zweiten Durchgang eine veränderte Version des Hörtests präsentiert, um auf diese Weise in einem ersten Vorversuch wirkungsvollere, aus der Einhüllenden gewonnene, Stimuli zu testen.

Zur Gewinnung der visuellen Reize für den zweiten Durchgang wurde ebenfalls die obere Einhüllende des jeweiligen Audiosignals gebildet. Diesmal folgte die Enveloppe mehr dem ursprünglichen Signalverlauf. Auf diese Weise wurde das Tiefpassverhalten deutlich abgeschwächt ohne die Lästigkeit der Videosignale aus dem vorherigen Hörversuch (s. Abschnitt 2.2.1) zu erzielen.

Die audivisuellen Stimuli entstanden für diesen Versuch durch Überlagerung der beiden Einzelstimuli. Wie im vorhergegangenen Hörtest wurden die kombinierten Reize zum einen mit und zum anderen ohne zeitlichen Versatz zwischen Audio- und Videosignal erzeugt. Im Folgenden werden die Stimuli ohne Versatz als zeitlich synchron oder nur als "synchron" und diejenigen Reize mit zeitlichem Versatz als "asynchron" bezeichnet. Den Tabellen 2.5 und 2.6 sind die verschiedenen Kombinationen der Stimuli für Durchgang 1 und respektive Durchgang 2 zu entnehmen.

Nummer	Stimulus
1	Audio (steil)
2	Video (steil)
3	Audio (steil) + Video (steil), synchron
4	Audio (steil) + Video (steil), asynchron
5	Audio (flach) + Video (flach), synchron
6	Audio (flach) + Video (flach), asynchron
7	Audio (steil) + Video (steil, Enveloppe), synchron
8	Audio (steil) + Video (steil, Enveloppe), asynchron
9	Audio (flach) + Video (flach, Enveloppe), synchron
10	Audio (flach) + Video (flach, Enveloppe), asynchron

Tabelle 2.5: Aufstellung der in Durchgang 1 verwendeten Stimuli.

Nummer	Stimulus
1	Video (steil, Enveloppe)
2	Video (flach, Enveloppe)
3	Audio (steil)
4	Audio (flach)
5	Audio (steil) + Video (steil, Enveloppe), synchron
6	Audio (steil) + Video (steil, Enveloppe), asynchron
7	Audio (flach) + Video (flach, Enveloppe), synchron
8	Audio (flach) + Video (flach, Enveloppe), asynchron
9	Audio (flach) + Video (steil, Enveloppe), synchron
10	Audio (steil) + Video (flach, Enveloppe), asynchron

Tabelle 2.6: Aufstellung der in Durchgang 2 verwendeten Stimuli.

In beiden Durchgängen betrug die Dauer der verschiedenen Stimuli zwei Minuten. Diese ergab sich vor allem aus praktischen Gründen. Eine längere Wirkungsdauer wäre wünschenswert gewesen, um mögliche Langzeitwirkungen zu beobachten. Jedoch hätte dies die Gesamtdauer des Hörversuchs bei insgesamt zehn verwendeten Stimuli enorm verlängert. Ebenfalls aus diesem Grund wurde im ersten Durchgang darauf verzichtet das flachflankige Video- und Audiosignal einzeln als Stimulus zu verwenden.

2.2.2.2 Durchführung

Der Hörtest wurde im reflexionsarmen Halbraum des Lehrstuhls für Nachrichtentechnik, Audiosignalverarbeitung und InCar Noise control der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt, um den Einfluss externer Geräusche auf die Probanden so gering wie möglich zu halten. In dem vorangegangenen Hörversuch (2.2.1) erwies sich die Wiedergabe von Videosignalen über einen Beamer innerhalb des weißen Raumes als ein Umstand, welcher die visuellen Stimuli erheblich verstärkte. Aus diesem Grund wurden die visuellen Reize in dieser Untersuchung den Testpersonen über eine Videobrille dargeboten. Die Audiosignale wurden über zwei Tieftonlautsprecher in der Ecke des Raumes wiedergegeben.

Die Reaktionen der Probanden auf die Stimuli wurden sowohl subjektiv, als auch semi-objektiv erfasst. Auf eine Aufzeichnung von Puls und Hauttemperatur wurde verzichtet, da die Resultate im vorhergegangenen Versuch keinen nennenswerten Einfluss der Stimuli auf die Biodaten der Probanden nachwiesen. Nach jedem Stimulus wurde der Proband gebeten, die subjektive Lästigkeit dieses Reizes auf einer Skala von 'nicht störend' (1) bis 'sehr störend' (5) einzuordnen.

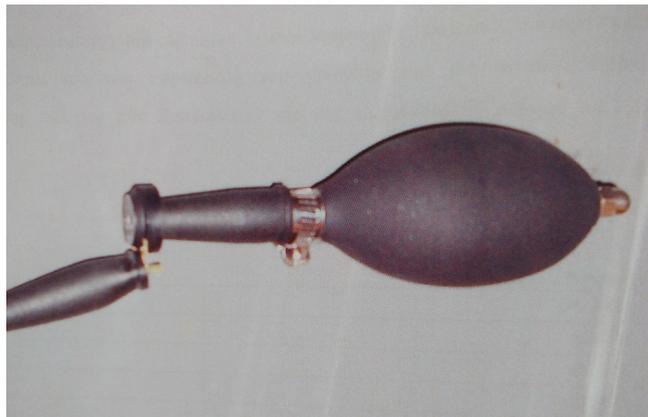


Abbildung 2.32: Foto des zur Erfassung der Probandenreaktion verwendeten Quetschballs.

Da die Erfassung der semi-subjektiven Lästigkeit über einen Reaktionstest im vorhergegangenen Hörversuch als nicht günstig und zu störanfällig befunden wurde, sollte hier ein Quetschball zur Anwendung kommen. Die Probanden hatten diesen während des ganzen Versuchs in der Hand und waren instruiert, diesen je nach Belästigungsempfinden zusammenzudrücken, wobei eine starke Belästigung auch einen starken Druck zur Folge haben sollte. Die Messwerte wurden dabei über ein Oszilloskop erfasst und am PC über eine MATLAB basierte Schnittstelle gespeichert. Um die Grenzwerte des Drucks im Quetschball für jeden Probanden einzeln zu ermitteln, drückten die Testpersonen den Ball vor Beginn der Testreihe sowohl sehr leicht als auch sehr stark. Damit waren die Randwerte für die spätere Auswertung und Normierung festgelegt.

Wie in Abschnitt 2.2.2.1 beschrieben fand der Hörversuch in zwei Durchgängen statt. Der Versuchsablauf war in beiden Fällen sehr ähnlich und ist in Abbildung 2.33 zu sehen.

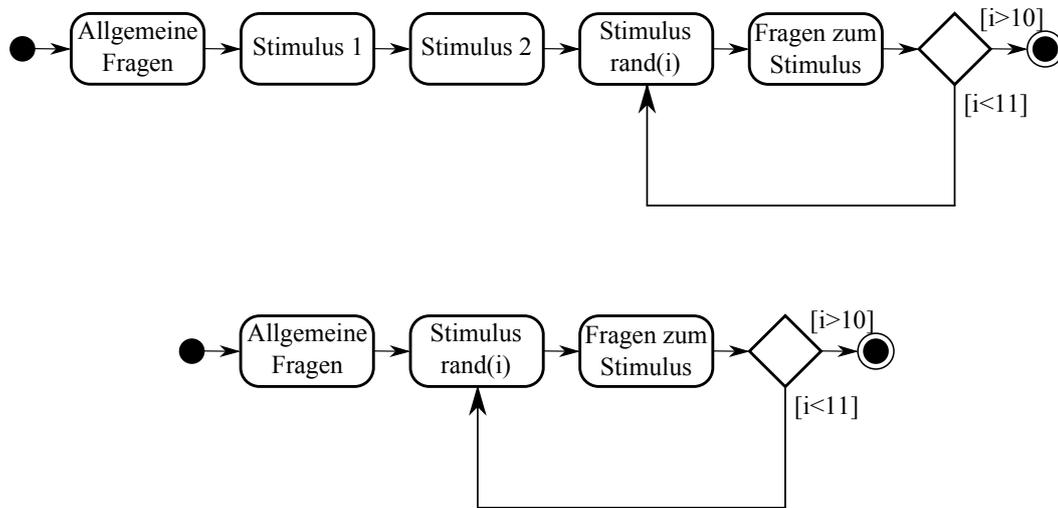


Abbildung 2.33: Verlaufsdiagramme des zweiten Hörversuchs. Oben: Erster Durchgang. Unten: Zweiter Durchgang.

In beiden Durchgängen wurden erst allgemeine Fragen zu den Probanden und deren Befinden gestellt, der Versuchsablauf erläutert und die Verwendung des Quetschballs erklärt. Danach wurde den Testpersonen der Quetschball in die Hand gegeben und die Videobrille aufgesetzt. Dann startete der Hörversuch. Im ersten Durchgang wurde erst der steilflankige auditive und danach der, aus dem originalen Audiosignal gewonnene, visuelle Stimulus präsentiert. Darauf folgte die Wiedergabe der verschiedenen Kombinationen von visuellem und auditivem Stimulus in zufälliger Reihenfolge. Im zweiten Durchgang fand die Präsentation aller Signale in zufälliger Reihenfolge statt.

2.2.2.3 Ergebnisse

Zu Beginn des Hörversuchs wurden den Probanden der auditive, steilflankige Stimulus (vgl. 2.31) und der direkt aus diesem generierte visuelle Stimulus jeweils einzeln präsentiert. In Abbildung 2.34, welche einen Boxplot der Antworten der Testpersonen auf die gefühlte Lästigkeit der Stimuli zeigt, ist zu erkennen, dass der auditive Einzelstimulus (Nummer eins) mit einem Median von '2' als deutlich weniger störend empfunden wurde als sein visueller Konterpart (Nummer zwei, Median: '2,75'). Dies war nach den Ergebnissen des vorangegangenen Hörversuchs aus Abschnitt 2.2.1 zu erwarten und bestätigt dessen Ergebnis, dass die schnellen Hell-Dunkel-Wechsel das Videosignal störender wirken lassen. Dort entstand das Problem, dass die Kombination der beiden Stimuli aufgrund der Dominanz des visuellen Stimulus nicht als

belastender wahrgenommen wurde, was maßgeblich mit der Reflexion des Lichts an den weißen Raumwänden zusammenhing.

In dem aktuellen Hörtest sollte dieser Effekt durch die Verwendung einer Videobrille verringert werden. Der Erfolg dieser Maßnahme zeigt sich darin, dass sämtliche, aus einer Kombination von Audio- schnell wechselndem Videosignal gewonnener, Stimuli als deutlich lästiger bewertet wurden als die jeweiligen Einzelsignale.

Zu beachten ist bei der Auswertung in den Abbildungen 2.34 und 2.35 das Proband Nummer 5 im ersten Durchgang alle Stimuli mit '1' bewertete, somit als Ausreißer behandelt und in dieser Untersuchung nicht weiter berücksichtigt wurde.

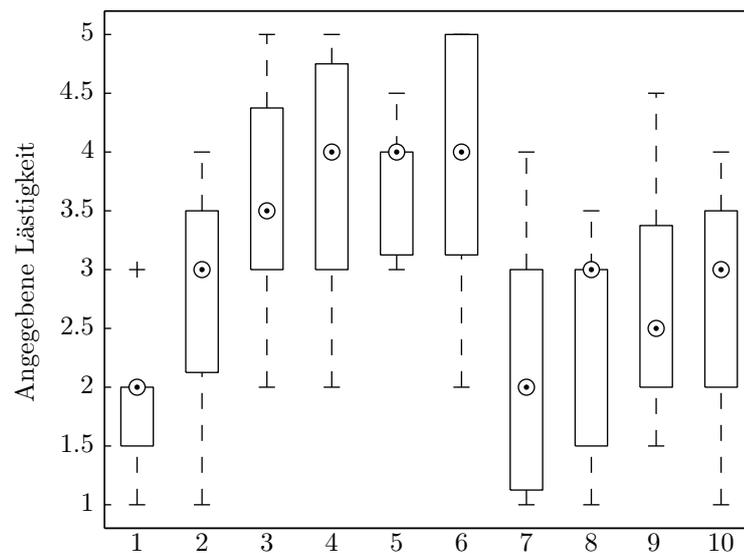


Abbildung 2.34: Boxplot der empfundenen Lästigkeit der einzelnen Stimuli im ersten Durchgang. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.5.

Für alle vier kombinierten Stimuli mit schnell wechselnden Videosignalen (vgl. Nummern drei, vier, fünf und sechs in Abb. 2.34) lag die Bewertung für deutlich mehr als 50% der Probanden zwischen '3' und '5' bei einem Median zwischen '3,25' und '4' und wurde somit als störender als die vergleichbaren Einzelsignale beschrieben. Diese Bewertung entspricht allerdings nicht einer einfachen Addition der Lästigkeiten beider Stimuli, sondern eher einer Zunahme um eine Lästigkeitsstufe. Betrachtet man den Einfluss der Flankensteilheit auf diese vier Stimuli, so fällt auf, dass dieser als gering zu bezeichnen ist. Für den Vergleich der steilflankigen Stimuli mit den Nummern drei und vier zu den flachflankigen Stimuli mit den Nummern fünf und sechs liegen die Antworten alle in einem ähnlichen Bereich.

Der Einfluss der zeitlichen Synchronität von Audio- und Videosignal ist ein wenig größer. Für das steilflankige Signal ist der Bereich, in welchen die Antworten des synchronen Stimulus (Stimulus drei) fallen, ähnlich dem des asynchronen (Stimulus vier), jedoch ist der Median bei ersterem um beinahe eine Belästigungsstufe geringer. Bei dem flachflankigen Signal ist ein ähnlicher Effekt zu beobachten. Zwar besitzen beide mit '3,75' den gleichen Median, jedoch liegen für das asynchrone Signal (Stimulus sechs) deutlich mehr Antworten oberhalb der Belästigungsstufe '4'. Dieser Umstand lässt zwar nicht die Aussage zu, dass eine asynchrone Kombination der Stimuli allgemein als lästiger empfunden wird, deutet dennoch auf den Zusammenhang hin, dass Dischronie bei einzelnen Menschen verstärkend auf die Aufnahme von Störeinflüssen wirken kann.

Die vier Stimuli deren Videosignale aus der Enveloppe des jeweiligen auditiven Stimulus entstanden, wurden insgesamt als deutlich weniger belästigend beschrieben als die zuvor genannten Signale (vgl. Nummern sieben, acht, neun und zehn in Abb. 2.34). Da auch hier die durchschnittliche Belästigung deutlich oberhalb der durch das reine Audiosignal hervorgerufenen liegt, ist die verstärkende Wirkung der visuellen Stimuli zu erkennen. In diesem Fall ist ein kleiner, durch die Flankensteilheit hervorgerufener Unterschied zwischen den Stimuli zu erkennen. Die flachflankigen Stimuli (Nummern neun und zehn) werden in geringem Maße von den Testpersonen als störender empfunden. Der Unterschied in den Medianen, '2' und '3' bei den steilflankigen Signalen (Nummern sieben und acht) sowie '2,5' und '3' für die flachflankigen, ist sehr klein, allerdings liegt, wie im rechten Bereich der Abbildung 2.34 zu erkennen ist, für letztere ein größerer Teil der Antworten über '3', was als leichtes Zeichen der stärkeren Wirkung des flachflankigen Signals gesehen werden kann. Wie bei den vorigen vier Stimuli ist auch in diesem Fall der Einfluss der Synchronität auf die Wahrnehmung größer als der der Flankensteilheit. Der Median der den synchronen Stimulus betreffenden Antworten liegt um eine, respektive eine halbe Stufe, unter dem zu den asynchronen Signalen gehörigen. Auch die Verteilung der Antworten legt diesen Schluss nahe. Es liegen für die asynchronen Signale (Nummern acht und zehn) jeweils über 50% der Antworten bei '3' oder noch höher, für die synchronen Stimuli (Nummern sieben und neun) ist dies nicht zu beobachten. Auch wenn dies ein deutlicher Hinweis auf die stärker belästigende Wirkung durch asynchrone Stimuli darstellt, ist hervorzuheben, dass die maximalen Belästigungswerte bei den synchronen Stimuli erzielt wurden. Dies ist durchaus als weiteres Indiz auf die Existenz von durch tieffrequenten Lärm mehr oder besonders beeinflussten Individuen zu werten. Die Antworten der einzelnen Personen sind im Anhang in den Abbildungen 5.9 und 5.10 zu finden. In diesen sind zwar Personen zu finden die einzelne Stimuli relativ zu ihrer restlichen Bewertung als störender empfanden, eine konsistente Aussage lässt sich jedoch so nicht treffen.

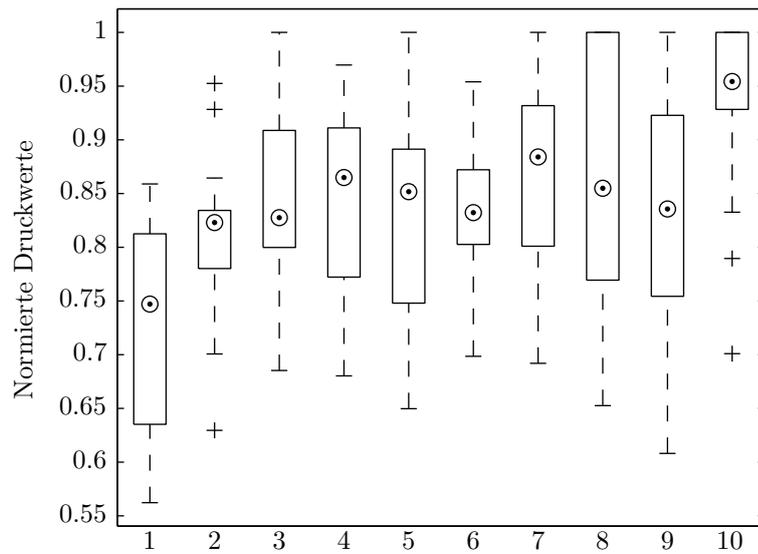


Abbildung 2.35: Boxplot der mittleren Druckwerte für die einzelnen Stimuli im ersten Durchgang. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.5.

Die Auswertung der Messdaten des Drucksensors unterstützt den aus den subjektiven Antworten der Testpersonen gewonnenen Eindruck. Die Druckdaten wurden für jeden Probanden und jeden einzelnen Stimulus über die gesamte Dauer des jeweiligen Signals aufgezeichnet. Die Analyse der einzelnen Zeitverläufe ergab für beinahe alle Probanden keine aufschlussreichen Daten. Aus diesem Grund wurden für jede Testperson die Druckdaten der einzelnen Stimuli über der Zeit gemittelt. Um die Daten der verschiedenen Testpersonen zueinander in Relation setzen zu können war es, aufgrund der deutlich unterschiedlichen Handkraft der Probanden, nötig die Messwerte für jede Testperson zu normalisieren. Abbildung 2.35 zeigt die Ergebnisse dieser Mittelungen für alle Probanden. Vergleicht man die Abbildungen 2.34 und 2.35 bzw. die Ergebnisse der Auswertung von subjektiven Antworten und Druckmessung, so fällt auf, dass der Verlauf beider Boxplots sich für die ersten sechs Stimuli stark ähnelt. Wurde ein Stimulus für lästiger als ein anderer beurteilt, so waren auch die Druckwerte höher und umgekehrt. Besonders deutlich wird dies bei Betrachtung der beiden Einzelstimuli zu Beginn des Hörversuchs. In diesem Kontext fallen die vier Stimuli deren Videoanteil aus der Einhüllenden des Audiosignals gewonnen wurde auf. Während sie in der subjektiven Bewertung als deutlich weniger lästig beschrieben wurden, zeichnen die Daten des Drucksensors ein anderes Bild. Hier erscheinen diese vier Stimuli als mindestens ebenso lästig wie der Rest ('ein wenig störender'). Innerhalb der Gruppe dieser vier Stimuli ist das Ergebnis der Druckmessung mit dem der subjektiven

Antworten vergleichbar. Besonders hervorzuheben ist hier die durch den Drucksensor gegebene Antwort der Probanden auf den Stimulus der aus Kombination des flachflankigen Audiosignals mit dem aus dessen Einhüllender erzeugten Videosignal entstand. Dieser wird bei den subjektiven Antworten, im Vergleich zu den aus der Einhüllenden entstandenen Signale, zwar als lästiger beschrieben, jedoch nicht im Gesamtkontext. Der für diesen Stimulus bestimmte Druckwert hingegen ist deutlich größer als der der anderen Stimuli. Dieser Umstand tritt in einem Maße auf, der einen Zufall unwahrscheinlich erscheinen lässt. Die Auswertung der Druckdaten wirft somit zwei Fragen auf. Zum einen ist zu klären inwieweit sich die subjektive Wahrnehmung der Probanden bezüglich der aus der Enveloppe gewonnen Signale von der semi-subjektiven, durch den Drucksensor wiedergegebenen, unterscheidet. Zum anderen bleibt die durch die Druckdaten aufgezeigte Besonderheit des aus Kombination des flachflankigen Audiosignals mit dem aus dessen Einhüllender erzeugten Videosignal Stimulus (Audio) zu untersuchen.

Wie in 2.2.2.1 bereits beschrieben wurde der Hörversuch nach der Befragung von 15 Probanden aufgrund der zu geringen Lästigkeit der aus der Einhüllenden entstandenen Videosignale abgebrochen und mit neuen Stimuli und zehn weiteren Probanden neu aufgenommen. Die Ergebnisse der subjektiven Befragung der Testpersonen sind in Abbildung 2.36 zu sehen.

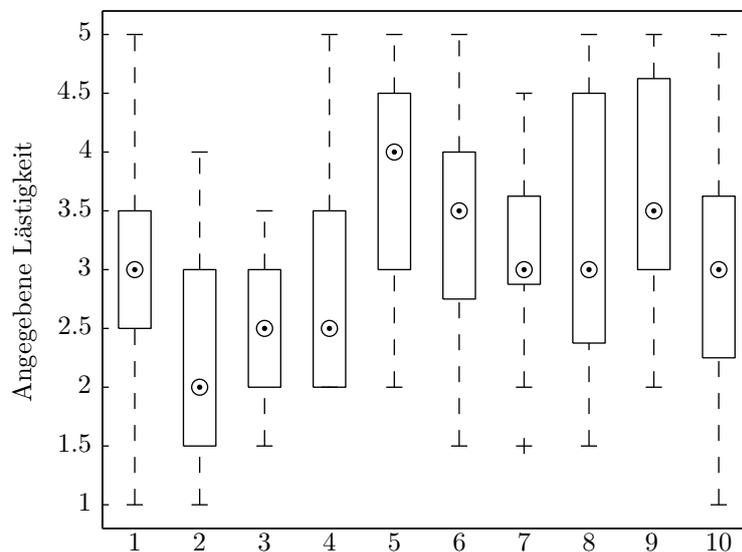


Abbildung 2.36: Boxplot der empfundenen Lästigkeit der einzelnen Stimuli im zweiten Durchgang. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.6.v

2.2. NEUE UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON MULTIMODALEN EFFEKTEN AUF DIE WIRKUNG VON TFL

Aufgrund der geringen Teilnehmerzahl in diesem Durchgang sind die Ergebnisse von geringer Aussagekraft. Dennoch ist zu erwarten, dass sie grob den Ergebnissen bereits zuvor durchgeführter Untersuchungen entsprechen, außerdem sollte ein Eindruck über das Potential der erstmals in diesem Durchgang verwendeten Stimuli gewonnen werden. Die Auswertung der Einzelstimuli zeigte, dass der neu kreierte, aus dem steilflankigen Signal gewonnene, visuelle Stimulus (vgl. Nummer eins in Abb. 2.36) von den Probanden im Gegensatz zu dem aus dem flachflankigen Audiosignal (Nummer zwei) erzeugten als deutlich störender wahrgenommen wurde. Dies deutet darauf hin, dass die, wie in Abschnitt 2.2.2.1 beschriebene, unterschiedliche Erzeugung der Einhüllenden von steil- und flachflankigem Audiosignal nicht zu dem gewünschten Ergebnis von zwei in etwa gleich störenden Videosignalen geführt hat. Auch die rein auditiven Stimuli wurden von den zehn Testpersonen nicht wie erwartet bewertet. Für beide liegt der Median mit '2,5' auf dem gleichen Belästigungswert. Das flachflankige Testsignal (Nummer vier) wird im Gegensatz zu dem steilflankigen Stimulus (Nummer drei) von mehreren Probanden als störender als '3' eingeschätzt. Somit scheinen die Testpersonen dieses zweiten Durchgangs unempfindlicher gegen tieffrequenten Lärm zu sein als die Probanden in vorangegangenen Versuchen, was in der weiteren Auswertung in Betracht gezogen werden muss.

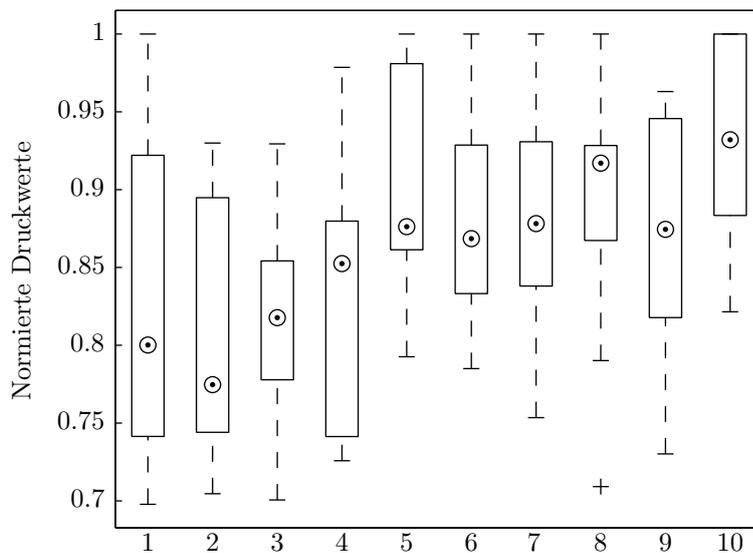


Abbildung 2.37: Boxplot der mittleren Druckwerte für die einzelnen Stimuli im zweiten Durchgang. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.6.

Im ersten Durchgang wurde für die visuellen Stimuli aus den Einhüllenden, welche

für sich eine geringe Belästigung darstellten, beobachtet, dass die asynchrone Wiedergabe der Signale bei den Probanden zu einer störenderen Wirkung führte. Dies ist im zweiten Durchgang für das flachflankige, wenig störende Videosignal ebenfalls zu erkennen. Die Mediane beider Signale (Nummern sieben und acht in Abb. 2.36) liegen zwar bei '3', es werden jedoch für den asynchronen Stimulus deutlich mehr Antworten zwischen '3,5' und '4' gegeben so wie ausschließlich bei diesem der Maximalwert von '5' erreicht. Für das kombinierte, steilflankige Signal fällt das Ergebnis im Gegensatz zu den vorigen Vergleichen anders aus. In diesem Fall wird die zeitlich synchrone Wiedergabe der Stimuli (Nummer fünf) von den Probanden sehr deutlich als größere Belästigung eingestuft. Bei einer Probandin wurde dies sehr deutlich. Sie empfand jeweils den steilflankigen Einzelstimulus als lästiger und in der Kombination führte die Synchronität zu einer verstärkten Lästigkeitswahrnehmung (Vgl. Tabelle 2.7, Zeile eins).

Prob.	Stim 1	Stim 2	Stim 3	Stim 4	Stim 5	Stim 6	Stim 7	Stim 8	Stim 9	Stim 10
29	3	1	3	2	5	4	3	2	3	3
22	3	3	3	2,5	4,5	3	2,5	2,5	4,5	3
23	1	2	2	2	4	1,5	3	2	5	2,5

Tabelle 2.7: Antworten dreier Probanden auf die Frage nach der Belästigung der einzelnen Stimuli. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.6.

Besonders auffällig waren jedoch die Reaktionen zweier Probanden (Vgl. Tabelle 2.7, Zeilen zwei und drei). Sie bewerteten die Lästigkeit der Einzelstimuli nur leicht überdurchschnittlich mit '3' oder sogar unterdurchschnittlich. Die Lästigkeit der kombinierten Stimuli weicht nicht stark ab. Die Ausnahme davon bildet die steilflankige und synchrone Kombination beider Stimuli. Damit erfüllen sie die im Vorfeld an den Versuch gestellten Erwartungen sehr genau.

Die Kombination von steilflankigem Audiosignal mit flachflankigem visuellen Stimulus bzw. deren Umkehrung diente der Überprüfung der Konsistenz der Antworten. Erwartungsgemäß wurde die Kombination der beiden, für sich alleine störenderen Stimuli (flachflankiges Audiosignal plus steilflankiges Videosignal, Nummer neun), deutlich als störender bewertet.

Die Ergebnisse der Auswertung der Druckmessungen in Abbildung 2.37 bestätigen die aus der Befragung gewonnenen Antworten, wobei der Unterschied zwischen den beiden visuellen Stimuli im Vergleich zu der Befragung nicht so groß ausfällt. Für die beiden gemischten Stimuli (9 und 10 s. Tabelle 2.6) ist dies allerdings nicht der Fall. Hier fällt die Druckauswertung genau gegenteilig zu den Ergebnissen der Befragung aus.

2.2.2.4 Zusammenfassung

Das Hauptziel dieses Hörversuches, das Auffinden von Hinweisen bezüglich der gleichzeitigen Wirkung von auditiven und visuellen Stimuli, konnte erreicht werden. In den meisten Fällen erwies sich die asynchrone Präsentation als für die Probanden unangenehm. Der Unterschied in der Lästigkeit synchroner und asynchroner Stimuli fällt nicht immer sehr stark aus. Ein geringerer Einfluss des Videosignals scheint diesen Effekt jedoch zu verstärken bzw. weniger zu vermindern.

Dies zeigt die Wichtigkeit, die verschiedenen Stimuli sehr definiert aufeinander abzustimmen. Dabei tritt eine Art "Audio-Visuelle Maskierung" auf. Ist die belästigende Wirkung eines der Stimuli zu groß, so wird der andere Stimulus nicht weiter negativ aufgenommen. Bei genauer Abstimmung erhöht sich der negative Effekt um in etwa eine Belästigungsstufe. Hierbei erwies sich die Gewinnung des visuellen Stimulus aus der Einhüllenden des Audiosignals als gute Lösung. Wichtig ist dabei den Verlauf der Einhüllenden im richtigen Maße dem Signalverlauf folgen zu lassen und den Tiefpasscharakter des gewonnenen Signals nicht zu stark auszubilden.

Die Ergebnisse dieses Hörversuches lassen die Vermutung zu dass Synchronität dann eine verstärkende Wirkung auf die Belästigungswirkung hat, wenn der Gesamtreiz eher schwach wahrgenommen wird. Für einen stärkeren Gesamtreiz ließe sich dann das Gegenteil annehmen. Hierbei kann sicherlich auch die Aufmerksamkeit des Hörenden eine Rolle spielen. Bei bewusster Auseinandersetzung mit den dargebotenen Reizen scheint eine asynchrone Präsentation negativer zu wirken. Zusätzlich belegte der Hörversuch, dass die Verwendung eines Quetschballs zur Druckmessung geeignet ist, die Belästigung des Probanden zu beschreiben. Mit der Ausnahme der Bewertung der Stimuli neun und zehn in Durchgang zwei folgte der gemessene Druck im Mittel der subjektiven Bewertungen der Probanden. Ob diese Messmethode wirklich einer unterbewussten Einschätzung der Stimuluslästigkeit entspricht kann abschließend nur in weiteren Untersuchungen gezeigt werden.

2.2.3 Versuch 3 - Verbindung von tieffrequentem Lärm und Vibrationen

Ausgehend von dem im vorigen Hörtest indizierten Zusammenhängen zwischen der Synchronität bzw. Asynchronität des audiovisuellen Stimulus und der belastigenden Wirkung auf die Probanden, sollte in diesem Versuch die Wirkung von tieffrequentem Lärm in Verbindung mit Vibrationen im Hinblick darauf untersucht werden, ob in diesem Fall ähnliche Effekte zu beobachten sind.

2.2.3.1 Planung

Analog zu dem in Abschnitt 2.2.2 beschriebenen Hörversuch soll hier die kombinierte Wirkung von tieffrequentem Schall und Vibrationen mit besonderem Blick auf zeitliche Synchronität zwischen den jeweiligen Stimuli untersucht werden. Als auditive Signale kommen die steil- und die flachflankig gefilterten Rauschsignale des letzten Hörversuchs, wie sie in Abbildung 2.31 beschrieben sind, zum Einsatz. Im Gegensatz zu der Generation der visuellen Stimuli im vorigen Hörtest war in diesem Fall keine Änderung der Stimuli für den Einsatz als Signal für die Erzeugung von Vibrationen nötig, da der hierfür verwendete Bass-Shaker direkt mit dem Audio-Signal versorgt werden konnte. Voruntersuchungen ergaben, dass die Wirkung der Vibrationen auf eine Versuchsperson im Vergleich zu den auditiven Stimuli relativ gering ausfiel. Aus diesem Grund wurde das den Shaker speisende Signal zusätzlich mit höherer Amplitude wiedergegeben.

Nummer	Stimulus
1	Audio (flach) + Vibration (flach), synchron
2	Audio (steil) + Vibration (steil), synchron
3	Audio (flach) + Vibration (flach), asynchron
4	Audio (steil) + Vibration (steil), asynchron

Tabelle 2.8: Aufstellung der im dritten Hörversuch verwendeten Stimuli.

Diese beiden Stimuli wurden, wie in Tabelle 2.8 beschrieben, so miteinander kombiniert, dass der steilflankig respektive flachflankig gefilterte Stimulus einmal zeitlich synchron und einmal zeitlich asynchron über Lautsprecher und Shaker abgespielt wurde. Im Rahmen dieses Hörversuchs wurden zehn weibliche und 18 männliche Probanden befragt, deren Alter zwischen 20 und 47 Jahren lag.

2.2.3.2 Durchführung

Wie auch die vorherigen Hörversuche, wurde auch dieser im reflexionsarmen Halb-raum des Lehrstuhls fürs Nachrichtentechnik, Audiosignalverarbeitung und InCar

Noise control der Bergischen Universität Wuppertal durchgeführt, so dass der Einfluss externer Geräuschquellen minimiert werden konnte. Die Wiedergabe der Schwingungen erfolgte über einen Bass-Shaker, welcher unter dem Stuhl, auf dem die Probanden während des Versuches saßen, montiert war. Aus Gründen der Vibrationsübertragung kam hier im Gegensatz zu den in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 beschriebenen Hörtests kein bequemer Bürostuhl zum Einsatz, sondern ein eher harter Holzstuhl. Das Feedback der Probanden stellte heraus, dass dieser Umstand nicht zu einer weiteren Belästigung führte. In den Voruntersuchungen erwies sich trotz dieser Maßnahme der Vibrationsstimulus im Gegensatz zu dem auditiven Stimulus als spürbar weniger belästigend. Aus diesem Grund wurde zum einen das den Shaker speisende Signal verstärkt und zum anderen der Tieftonlautsprecher nicht in der Ecke des Raumes, sondern in der Mitte der Längsseite platziert. Der Stuhl war gegenüber dem Lautsprecher platziert, neben ihm befand sich ein Monitor, auf welchem die Einführung in den Hörtest präsentiert wurde und der Proband mittels der Eingabekonsole die Lästigkeit der einzelnen Stimuli auf einer Skala von 'angenehm' ('1') bis 'Stress' ('7') bewerten konnte.

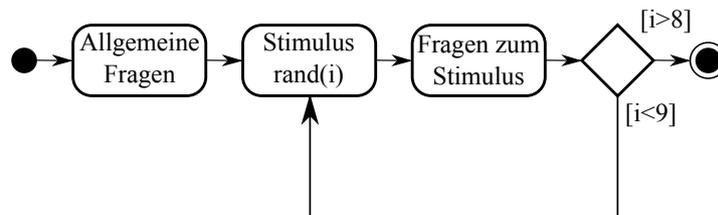


Abbildung 2.38: Verlaufsdiagramm des dritten Hörversuchs.

Der Ablauf des Hörtests fand wie in Abbildung 2.38 gezeigt statt. Nach einleitender Befragung des Probanden und Erklärung des Versuchsablaufs wurden die vier aus Tabelle 2.8 bekannten Stimuli jeweils zweimal in zufälliger Reihenfolge wiederholt. Um den Einfluss einer längeren Abspieldauer der einzelnen Stimuli zu vermeiden war die Zufälligkeit soweit eingeschränkt, dass nur Zufallsreihen verwendet wurden, in denen kein Stimulus zweimal hintereinander auftrat. Nach der Wiedergabe jedes Stimulus wurde von den Probanden dessen Lästigkeit bewertet und die Antwort in das Erfassungssystem eingetragen.

2.2.3.3 Ergebnisse

Die Auswertung der Ergebnisse der von den Probanden abgegebenen Einschätzung der Lästigkeit der vier verschiedenen Stimuli ist in Abbildung 2.39 zu sehen. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Beurteilungen für alle Stimuli nahe beieinander liegen. Dennoch ist ein auffälliger Unterschied zwischen der synchronen und asynchronen Darbietung der Stimuli zu erkennen. Während 50% der Probanden die synchronen

Reize mit '5' oder höher bewerteten, trifft dies nur für 25% der asynchronen Stimuli zu. Gleichzeitig wurden erstere nur von 25% der Testpersonen als 'nicht angenehm' ('3') oder weniger störend beschrieben, wohingegen dies für die asynchronen Stimuli bei mehr als 50% der Probanden der Fall war.

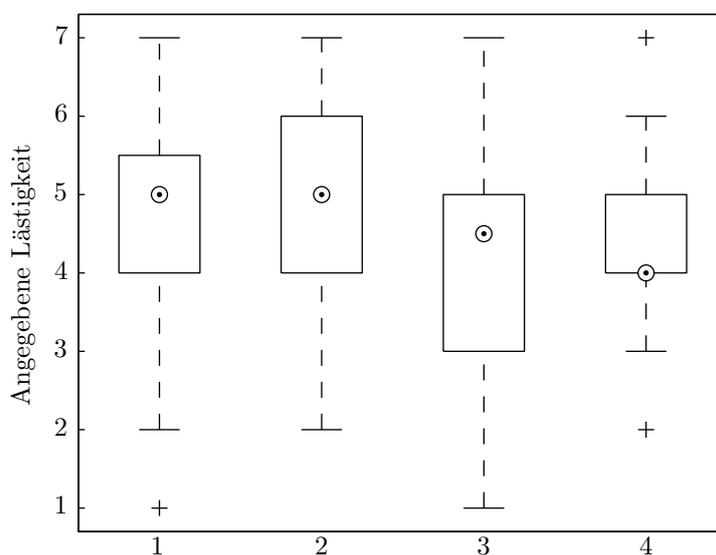


Abbildung 2.39: Boxplot der Antworten der Probanden für die einzelnen Stimuli. Nummerierung der Stimuli gemäß Tabelle 2.8.

Daraus lässt sich, auch wenn die Datenbasis mit lediglich 28 Teilnehmern klein ausfällt, erkennen, dass eine synchrone Präsentation von Audiosignalen und Vibrationen im Rahmen dieses Versuches stärker wirkt als dies bei asynchroner Wiedergabe der Fall ist.

Die Art des Stimulus hatte keinen nennenswerten Einfluss auf die Wahrnehmung durch die Probanden. In Abbildung 2.39 ist zu erkennen, dass der Bereich in welchen jeweils im Mittel 50% der Antworten der Probanden fallen, für die steilflankigen Signale leicht nach oben verschoben ist. Diese Beobachtung ist statistisch jedoch nicht relevant und kann bestenfalls als Vermutung für eine stärkere Wirkung der Signale mit tieffrequenteren Anteilen gedeutet werden.

2.2.3.4 Zusammenfassung

Das Ziel dieses Hörversuches war es, einen ersten Eindruck bezüglich der Wirkung einer gleichzeitigen Präsentation von auditiven Reizen und Vibrationen zu erhalten. Dabei wurde die Sitzgelegenheit der Testpersonen über einen Bass-Shaker, welcher von

dem selben Audiosignal gespeist wurde wie es zur Wiedergabe über einen Tieftonlautsprecher verwendet wurde, zum Schwingen gebracht. Die hier befragten Probanden werteten die zeitlich synchrone Wiedergabe der jeweiligen Stimuli im Gegensatz zu der asynchronen als lästiger. Das Ziel dieser Untersuchung konnte somit erreicht werden.

2.3 Neuer Hörversuch unter Verwendung von EEG-Messungen

Die in 2.2.1 bis 2.2.3 beschriebenen Hörversuche beschäftigten sich alle mit der Wirkung von tieffrequentem Lärm in Kombination mit anderen Reizen. Dabei war es nicht immer möglich zwischen der Wirkung der Einzelstimuli, dem Zusammenspiel beider Effekte und einer potentiellen Anfälligkeit einzelner Probanden im Hinblick auf tieffrequenten Lärm zu unterscheiden. Aus diesem Grund sollte in einem vierten Hörtest noch einmal der Unterschied in der Wahrnehmung von tieffrequenten Signalen unterschiedlicher Flankensteilheit untersucht werden. Zusätzlich sollte die Theorie, dass manche Individuen deutlich anfälliger für tieffrequenten Lärm seien könnten, weiter untersucht werden. Daher bestand die Hälfte der Versuchspersonen aus Menschen, die sich stark von dieser Art von Schall belästigt fühlen und sich mit der Bitte um Hilfe an den Lehrstuhl für Nachrichtentechnik, Audiosignalverarbeitung und InCar Noise Control gewandt haben.

Gerade im Hinblick auf diese besondere Belastung einiger Probanden erscheint es wichtig, die Reaktion der Versuchspersonen möglichst objektiv zu erfassen. Die vorangegangenen Versuche enthielten mit Reaktionstests und einem Quetschball nur beschränkt nutzbare Ergebnisse für die Erfassung objektiver Messergebnisse. Daher wurde für diesen Hörtest das Elektroenzephalogramm *EEG* als Evaluationsmethode verwendet.

2.3.1 Planung

Das Ziel dieses Hörversuches war zweigeteilt. Zum einen sollte noch einmal der Einfluss der Flankensteilheit eines Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von 40 Hz, welches von braunem Rauschen durchlaufen wird, auf die durch die Probanden wahrgenommene Lästigkeit auf objektive Weise untersucht werden. Zum anderen sollte die These, dass gewisse Einzelpersonen tieffrequenten Lärm anders wahrnehmen als die meisten Menschen, genauer untersucht werden. Die beiden verwendeten akustischen Stimuli wurden nach ähnlichen Kriterien, wie die in Hörversuch zwei (s. Abschnitt 2.2.2.1) verwendeten, erstellt. Der Unterschied zwischen beiden Stimuli sollte jedoch für den aktuellen Versuch noch deutlicher hervorgehoben werden.

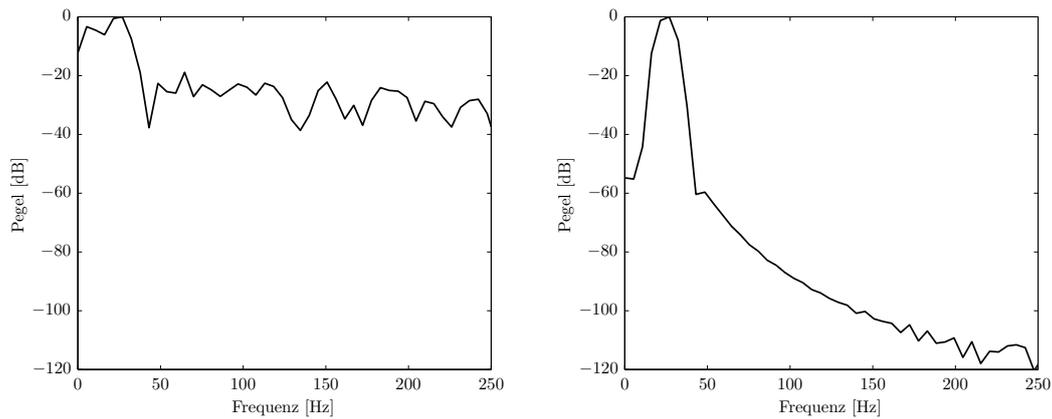


Abbildung 2.40: Spektrogramme der im vierten Hörversuch verwendeten Stimuli. Links: 25Hz Sinussignal mit braunem Rauschen überlagert. Rechts: 25Hz Sinussignal.

Aus diesem Grund wurde der als belastigender anzunehmende Stimulus als monotonaler Sinus von 25 Hz erzeugt. Der weniger belastigende Stimulus bestand aus dem selben 25 Hz Sinussignal, welchem zusätzlich braunes Rauschen überlagert wurde. Die Spektrogramme beider Stimuli sind in Abbildung 2.40 zu sehen. Auf diese Weise sollte der Unterschied in der "Flankensteilheit" beider Signale deutlicher in Erscheinung treten. Die Stimuli wurden wie in Abschnitt 2.3.2 beschrieben abgespielt und mittels Pausen und Rauschsignalen voneinander getrennt. Das Spektrum des dafür verwendeten rosa Rauschens ist in Abbildung 2.41 zu sehen.

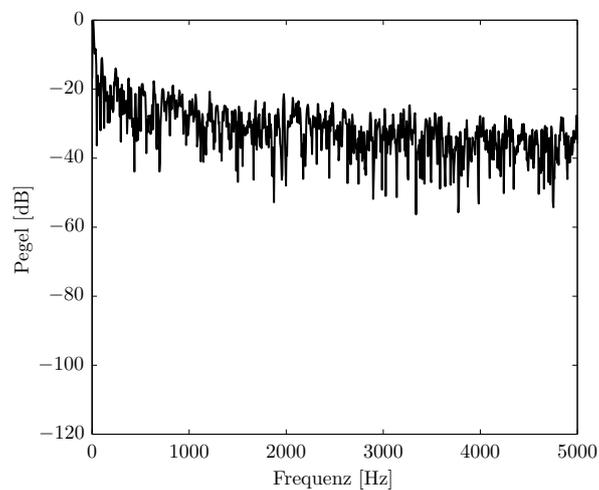


Abbildung 2.41: Spektrum des zur akustischen Trennung der verschiedenen Stimuli verwendeten rosa Rauschens.

Der Hörversuch wurde mit insgesamt elf Probanden durchgeführt, von denen fünf sich nach eigener Angabe in ihrem Alltag stark von tieffrequentem Lärm belastigt fühlen.

Fünf weitere Probanden geben keine besondere Belästigung durch dieses Phänomen an, ein Proband ist gesondert zu betrachten, da er sich wissenschaftlich mit TFL beschäftigt. Tabelle 2.9 gibt eine Übersicht über die Probanden. Die Geschlechterverteilung in der Gruppe der Probanden die als nicht-sensitiv für tieffrequenten Lärm zu sehen sind, ist leider nicht gut, da hier nur eine Versuchsperson weiblich ist. Insgesamt erreicht die Studie dennoch ein Verhältnis von vier weiblichen zu sieben männlichen Probanden.

Nummer des Probanden	Geschlecht	Sensitiv für LFN
1	männlich	Sonderfall
2	männlich	nein
3	männlich	nein
4	männlich	nein
5	weiblich	nein
6	männlich	nein
7	männlich	ja
8	männlich	ja
9	weiblich	ja
10	weiblich	ja
11	weiblich	ja

Tabelle 2.9: Probanden, die an Hörversuch Nummer vier teilgenommen haben in der Reihenfolge, in der sie untersucht wurden.

2.3.2 Durchführung

Wie die vorigen Hörversuche fand auch diese Untersuchung im reflexionsarmen Messraum der Bergischen Universität Wuppertal statt. Die Wiedergabe der tieffrequenten Stimuli erfolgte über einen KH 870 Tieftonlautsprecher der Firma Klein und Hummel, welcher gegenüber der Sitzposition des Probanden aufgestellt war. Da das Übertragungsverhalten des KH 870 sich nicht für die Wiedergabe von Breitbandrauschen eignet, wurden die Rauschsignale über einen weiteren Lautsprecher (Canton POPsmart) abgespielt, der sich auf dem Tieftöner befand.

Die objektive Erfassung der Reaktionen der Probanden erfolgte mittels des 32-Kanal EEG Systems BrainVision actiCHamp der Firma Brain Products GmbH. Nach den einführenden Erklärungen zu dem Hörversuch nahm die jeweilige Versuchsperson auf einem bequemen Stuhl vor den Lautsprechern Platz. Dann wurde die Kappe des EEG Systems angelegt und deren Elektroden mit Leitgel versehen. Die Verteilung der Elektroden auf der Kappe bzw. dem Kopf des Probanden ist Abbildung 2.42 zu entnehmen.

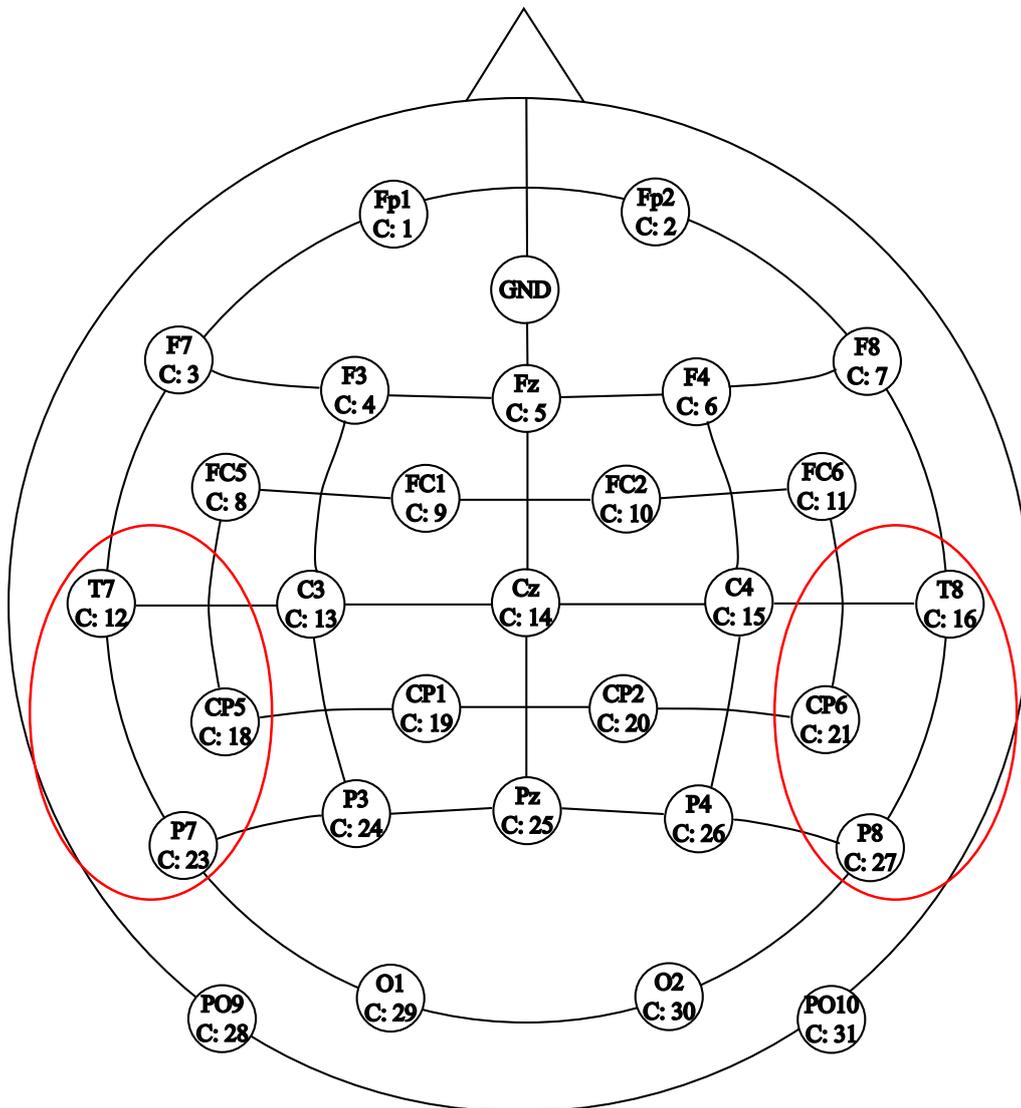


Abbildung 2.42: Verteilung der Elektroden des EEG-Systems über den Kopf. Jede Elektrode ist mit ihrem Namen und dem zugeordnetem Messkanal (C: X) beschrieben. Die Elektroden, welche die beiden auditiven cortices abdecken sind zusätzlich rot markiert.

Abbildung 2.43 zeigt die mit Elektroden bestückte EEG-Kappe auf dem Kopf eines

Probanden. Hier ist zu erkennen, dass die Kanäle 16, 21 und 27 (T8, CP6 und P8) in der Nähe des auditiven Cortex des Gehirns liegen. Diesen Kanälen kommt daher in der folgenden Auswertung eine besondere Bedeutung zu. Gleiches gilt für die Kanäle 12, 18, 23 (T7, CP5, P7) auf der gegenüberliegenden Kopfseite.

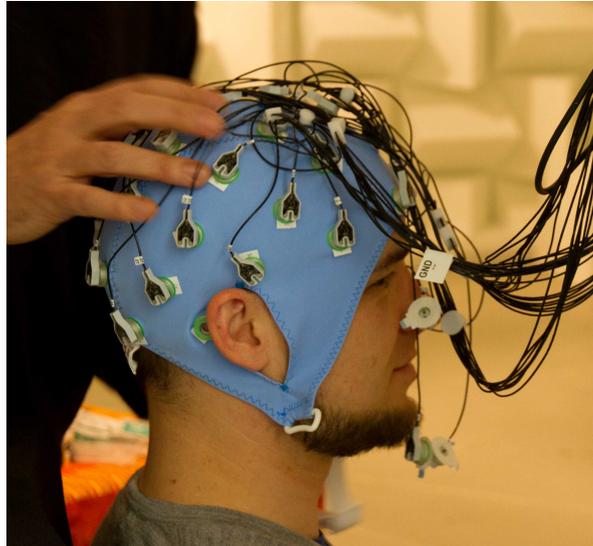


Abbildung 2.43: Seitenansicht der EEG-Kappe am Kopf eines Probanden.

Nach erfolgter Anpassung der Elektroden an die Probanden startete der Hörversuch. Während der gesamten Versuchsdauer waren die Augen der Versuchspersonen geschlossen. Die beiden verschiedenen Stimuli (s. Abb. 2.31) wurden jeweils dreimal abgespielt. Der Ablauf des gesamten Versuches ist in Abbildung 2.44 zu sehen. Vor jedem Stimulus lag ein Rauschsignal mit einer zufällig zwischen 30 und 60 Sekunden gewählten Länge. Die unterschiedliche Dauer dieses Signals sollte den Einfluss einer Erwartungsreaktion des Probanden auf den beginnenden Stimulus verringern. Gefolgt wurden die jeweiligen Stimuli von einer 120-sekündigen Pause und einem 30s andauernden Rauschen.

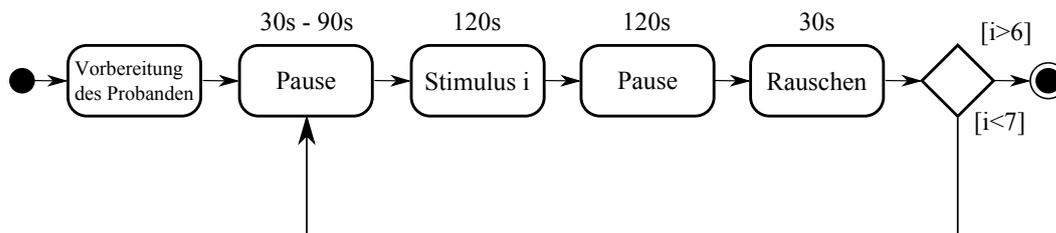


Abbildung 2.44: Verlaufsdiagramm des vierten Hörversuchs. Über den verschiedenen Phasen ist die jeweilige Abspieldauer zu sehen.

Auf diese Weise sollten zwei Ziele erreicht werden. Einerseits minimierte die relativ zur Stimulusdauer lange Unterbrechung den Einfluss, den ein Stimulus auf den

folgenden ausüben konnte. Vor allem im Hinblick auf eine vermutete Langzeitwirkung von tieffrequentem Lärm erschien diese Maßnahme wichtig. Andererseits sollten die Rauschsignale eine eventuell im Gehirn erfolgende Synchronisierung durch die tieffrequenten Signale aufheben und so ebenfalls die Wechselwirkung zwischen den Einzelstimuli vermindern.

Nummer des Stimulus	Flankensteilheit
1	flach
2	steil
3	steil
4	flach
5	flach
6	steil

Tabelle 2.10: Reihenfolge der im vierten Hörversuch verwendeten tieffrequenten Stimuli

Die Reihenfolge in der die beiden Stimuli wiedergegeben wurden, war für alle Probanden die selbe. Sie wurde zufällig bestimmt und ist in Tabelle 2.10 dargestellt. Zufallsfolgen, bei denen dreimal nacheinander der selbe Stimulus hätte abgespielt werden sollen, wurden nicht in Betracht gezogen, um auch hier dem möglichen Einfluss eines Langzeiteinflusses entgegenzuwirken.

2.3.3 Ergebnisse

Die im Elektroenzephalogramm sichtbare Aktivität des Gehirns wird in der Regel in verschiedenen Spektralbereichen betrachtet. Wie [SS06] zu entnehmen ist, kann man das EEG in verschiedene Frequenzbänder aufteilen. Dabei geht man von einer Person in einem ruhigen Zustand mit geschlossenen Augen aus. Das Alpha-Band (8 Hz - 13 Hz, im Durchschnitt 10 Hz) ist die vorherrschende Wellenform bei entspannter Wachheit. Mit dem Öffnen der Augen oder bei erhöhter geistiger Aktivität (z.B. beim Lösen leichter Kopfrechenaufgaben) wird die Aktivität im Alpha-Band ausgesetzt und durch Aktivität im Beta-Band (15 Hz - 30 Hz, durchschnittlich 20 Hz) ersetzt. Dies wird auch als Berger-Effekt oder Alpha-Blockade bezeichnet. Das Auftreten von Wellen oberhalb von 30 Hz, im sogenannten Gamma-Band, deutet auf angestrengte Lern- und Aufmerksamkeitsprozesse hin. Delta- (0,5 Hz - 3,5 Hz) und Theta-Wellen stellen sich bei gesunden erwachsenen Menschen außerhalb des Schlafes nicht ein.

Die EEG-Daten der verschiedenen Testpersonen besitzen eine Dauer von ca. 30 Minuten, je nach Länge der variablen Pausen (vgl. 2.44). Einen ersten Überblick über diese vergleichbar große Datenmenge lässt sich gewinnen, wenn man die Spektrogramme der

Daten der einzelnen Elektroden eines Probanden betrachtet. Die Abbildungen 2.45, 2.46 und 2.47 zeigen die Spektrogramme der Elektroden CP6, T8 und FC6 für die Probanden fünf, acht und elf, welche sich über dem auditorischen Kortex der rechten Gehirnhälfte befinden. Die Spektrogramme aller Probanden weisen wie erwartet dominante Aktivitäten im Alpha-Band auf, da der Hörversuch bei geschlossenen Augen durchgeführt wurde. Anhand der Spektrogramme lässt sich keine Aussage über die mutmaßlich unterschiedliche Wahrnehmung der beiden Stimuli treffen. Auch zwischen den zwei Versuchsgruppen besteht kein eindeutiger Unterschied. Es sind allerdings Auffälligkeiten in den Spektrogrammen einzelner Versuchspersonen zu erkennen, die den Schluss zulassen, dass die EEG Aktivität unter Einfluss von tieffrequentem Lärm stark individuellen Charakter hat. Während die Aktivität im Alpha-Band bei sowohl normal hörenden als auch für tieffrequenten Lärm empfindlichen Probanden kontinuierlich verläuft (vgl. z.B. Proband acht in Abb. 2.46), ist dies bei Testperson elf, welche nach eigener Aussage unter dem Einfluss tieffrequenten Lärms leidet, nicht der Fall. In Abbildung 2.47 ist zu erkennen, dass während des ersten, flachflankigen Stimulus und der darauf folgenden Pause lediglich allgemeine Aktivität im Frequenzbereich zwischen 5 Hz und 20 Hz zu beobachten ist. Die erwarteten, ausgeprägten Alpha-Wellen bleiben aus. Mit dem Einsetzen des rosa Rauschens nach der zweiminütigen Pause des ersten Stimulus tritt plötzlich ausgeprägte Aktivität im Frequenzbereich zwischen 4 Hz und 8 Hz auf, welcher dem Theta-Band zuzuordnen ist. Diese Aktivität dauert bis kurz vor das Ende des dritten Stimulus an und tritt dann nicht mehr auf. In der Regel deuten Theta-Wellen auf leichten Schlaf oder Schläfrigkeit hin. Dies ist in dem vorliegenden Fall vermutlich auszuschließen, da das Eintreten des im Vergleich zu der vorangehenden Pause lauten Rauschens von den Probanden allgemein als ein aufweckender Reiz beschrieben wurde. Daher deutet dieses Phänomen stark auf eine Eigenart der Testperson hin. Proband fünf (vgl. Abb. 2.45) reagierte anders auf die verschiedenen Stimuli. Hier war die Aktivität innerhalb des Alphabandes im allgemeinen konstant. Während und kurz nach der Präsentation der tieffrequenten Stimuli kam es zu einer Abnahme in der Alphabandaktivität, was auf Unruhe hindeutet.

Um tieferen Einblick in die Besonderheiten einzelner Probanden zu erhalten, werden im Folgenden die über jeden Stimulus gemittelten EEG-Daten der einzelnen Versuchsteilnehmer betrachtet. Dazu wurden diese zunächst von Artefakten befreit. Der größte Anteil an Artefakten ist auf Muskelaktivitäten der Probanden zurückzuführen. Ein Beispiel hierfür ist im Spektrogramm von Proband fünf zum Zeitpunkt bei 800 s in Form von über das ganze aufgenommene Spektrum auftretender Aktivität zu beobachten. Die Bereinigung erfolgte mittels Unabhängigkeitsanalyse bzw. Independent Component Analysis (ICA). Diese zerlegt, wie in [HO00] beschrieben, ein Gesamtsignal in die lineare Mischung einzelner statistisch unabhängiger Signale. Auf diese

Weise lassen sich Artefakte erkennen und von dem Gesamtsignal subtrahieren. Die bereinigten EEG-Daten sind in den Abbildungen 2.48 bis 2.58 dargestellt. Jede dieser Grafiken stellt eine Übersicht über die EEG-Reaktion eines Probanden auf die sechs Stimuli des Hörversuches dar. Die einzelnen Stimuli sind nach ihrem Auftreten im Versuchsablauf nummeriert und nach Art des Stimulus sortiert. Auf der linken Seite sind die flachflankigen und auf der rechten Seite die steilflankigen Signale angeordnet. Für jeden Stimulus werden drei separate Frequenzbänder dargestellt. Es ist jeweils, von links nach rechts die Mittlung des Alpha-, Beta- und Gamma-Bandes zu erkennen. Alle drei werden in ihrer Verteilung über den Kopf gemäß der Elektrodenkarte aus Abbildung 2.42 farblich in der Stärke des Signals kodiert.

Wie auch schon bei Betrachtung der Spektrogramme erweist sich die Probandin Nummer elf als besonders auffällig. Hier werden deutliche Unterschiede zwischen der Reaktion des EEGs auf die beiden verschiedenen Stimuli sichtbar. In Abbildung 2.58 ist klar zu erkennen, dass während der steilflankigen Stimuli (zwei, drei, sechs auf der rechten Seite) starke Aktivität im Beta-Band der frontalen Elektrode Fz vorherrscht. Im Gegensatz dazu tritt während der flachflankigen Stimuli keine dominante Aktivität in diesem Bereich auf. Ein ähnliches Phänomen ist im Alpha-Band während der Stimuli zwei und drei zu erkennen. Hier bildet sich starke Dipolaktivität zwischen den FC und den CP Elektroden aus. Dies bleibt während der flachflankigen Stimuli und dem letzten steilflankigen Stimulus aus. Beide Beobachtungen, vor allem aber erstere, deuten stark darauf hin, dass tieffrequenterer Stimuli im Vergleich zu den anderen Probanden eine deutlich abweichende EEG-Reaktion bei der speziellen Probandin hervorrufen.

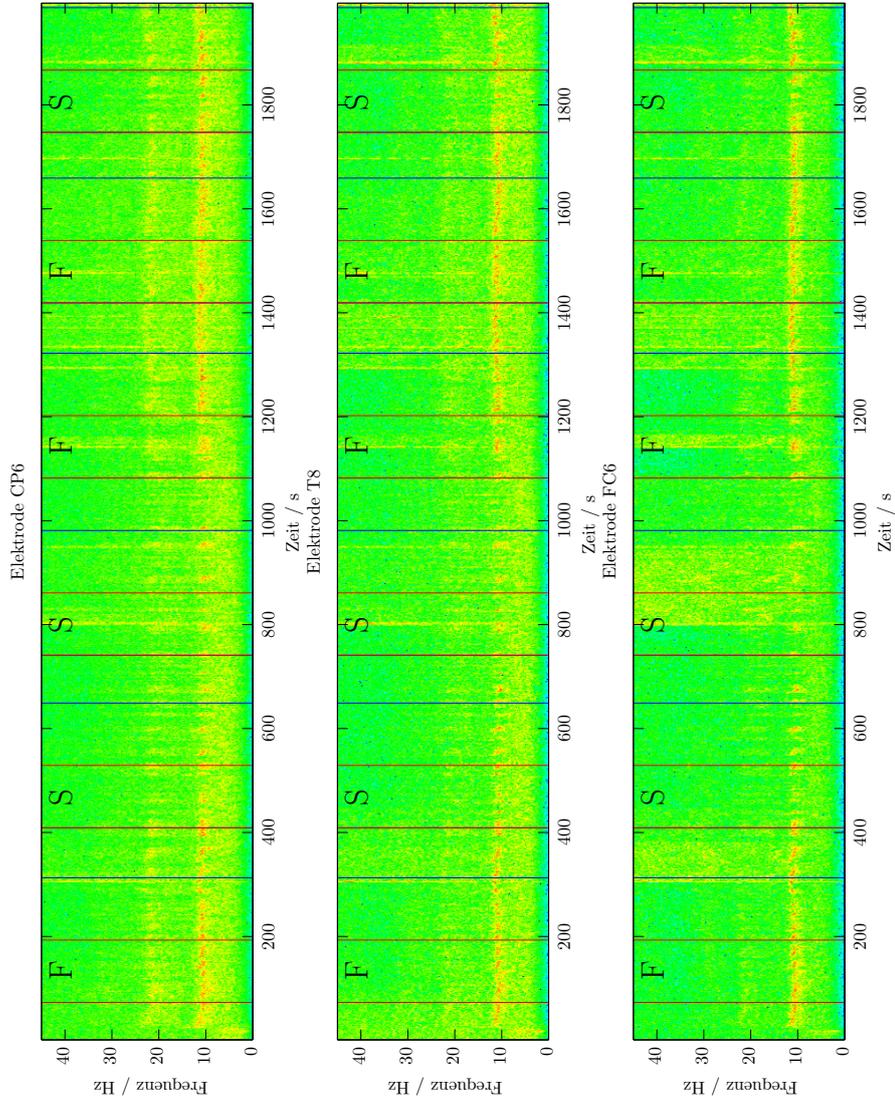


Abbildung 2.45: Spektrogramm des EEGs von Proband fünf. Start und Ende Stimuli (vgl. Abb. 2.10) sind mit roten Linien markiert. Die jeweils direkt folgende Pause endet an der blauen Linie.

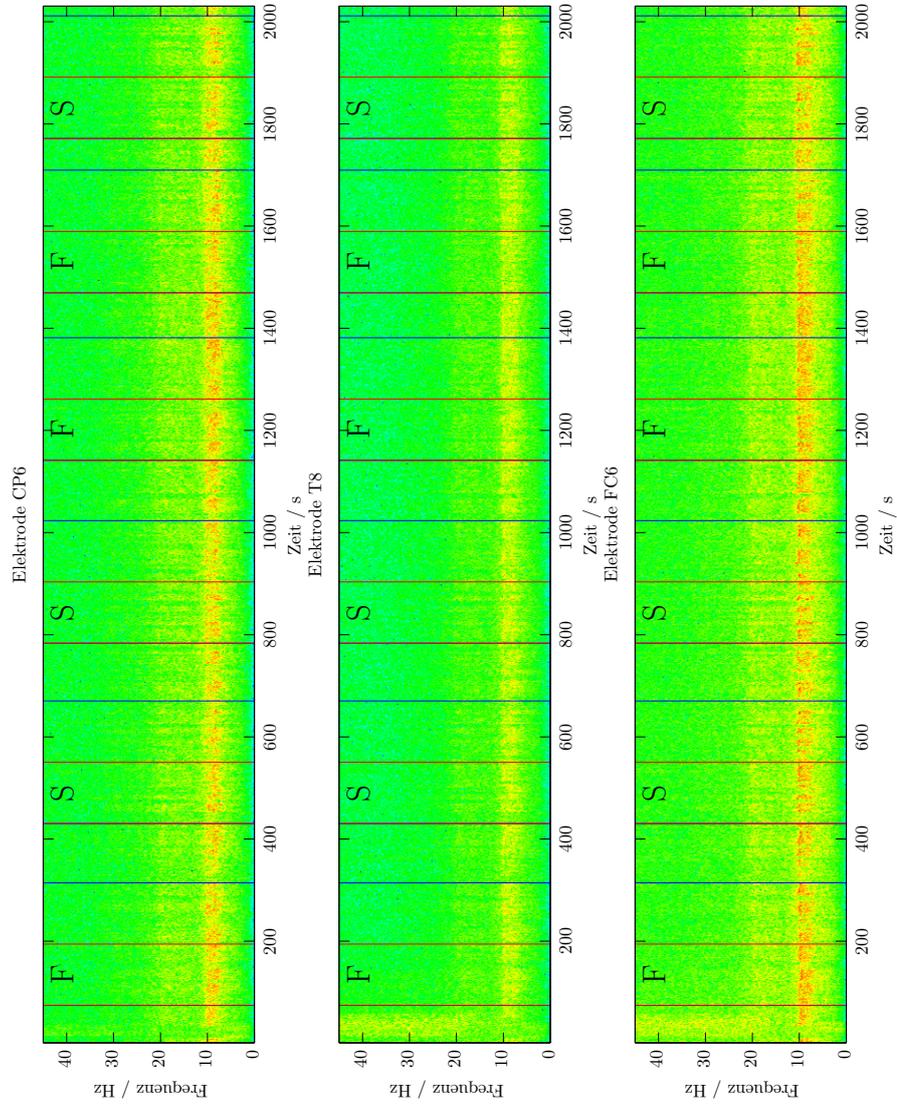


Abbildung 2.46: Spektrogramm des EEGs von Proband acht. Start und Ende Stimuli (vgl. Abb. 2.10) sind mit roten Linien markiert. Die jeweils direkt folgende Pause endet an der blauen Linie.

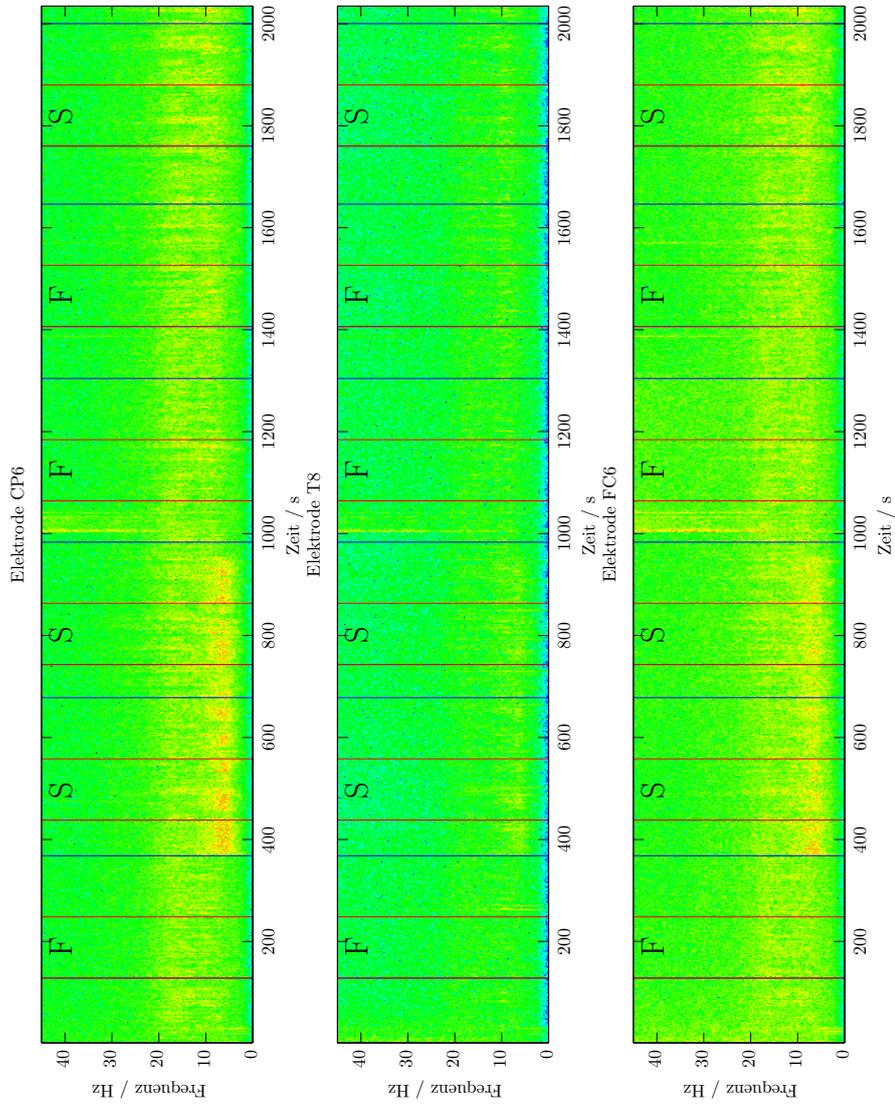


Abbildung 2.47: Spektrogramm des EEGs von Proband elf. Start und Ende Stimuli (vgl. Abb. 2.10) sind mit roten Linien markiert. Die jeweils direkt folgende Pause endet an der blauen Linie.

Zusätzlich zu den auffälligen Beobachtungen bei Testperson elf lassen sich zwischen der Gruppe der für tieffrequenten Lärm anfälligen Personen im Gegensatz zu den nicht anfälligen leichte Unterschiede in der Reaktion der EEGs auf die beiden verschiedenen Stimuli festmachen. Die Aktivitäten im Alpha-Band der Probanden drei, sieben, neun, zehn und elf fallen während der tieffrequenten Stimuli zum Teil leicht, zum Teil auch deutlich ausgeprägter aus. Dieses Verhalten ist bei den Probanden eins, zwei, vier, fünf, sechs und acht nicht zu beobachten (vgl. Abb. 2.48 bis 2.58). Auch wenn die Trennung beider Gruppen in diesem Fall nicht eindeutig erscheint, so ist doch eine leichte Tendenz zu erkennen, die einen Zusammenhang zwischen dem Belästigungsgrad und erhöhter Alpha-Wellen Aktivität unter dem Einfluss tieffrequenten Lärms möglich erscheinen lässt.

Bei einzelnen Probanden ist eine weitere Auffälligkeit zu beobachten, welche aber weniger ausgeprägt erscheint als bei der weiter oben erwähnten Probandin elf. Am deutlichsten ist dies bei Testperson Nummer neun zu erkennen. Hier fällt auf, dass bei den steilflankigen Stimuli zwei und drei die Aktivität im Alpha-Band der Elektroden im Bereich der auditiven cortices beider Gehirnhälften (F7, CP5 und P7 bzw. F8, CP6 und P8) stark ausfällt, wohingegen bei den flachflankigen Stimuli die Reaktion beider Gehirnhälften unterschiedlich stark ausfällt. Dasselbe Verhalten tritt bei Proband drei in abgeschwächter Form auf und ebenso bei Testperson elf, hier allerdings im Gamma-Band. Die Aktivität innerhalb des Gamma-Bandes bei den Versuchspersonen sieben und acht ist in den oben erwähnten Bereichen über alle Stimuli hinweg konstant hoch und weist keinen Unterschied zwischen den Reaktionen auf steil- bzw flachflankige Signale auf. Für Proband zwei lässt sich dies schwach innerhalb des Alpha-Bandes erkennen. Der Umstand, dass lediglich eine Versuchsperson deutliche Auffälligkeiten der beschriebenen Art zeigt, lässt sich als weiteres Indiz deuten, dass gewisse Einzelpersonen eine sich von der Allgemeinheit abhebende Verarbeitung tieffrequenten Schalls besitzen.

Aufgrund dieser Besonderheiten soll im Folgenden die Korrelation zwischen einzelnen Elektroden unterschiedlicher Gehirnhälften im Bereich der auditiven cortices untersucht werden.

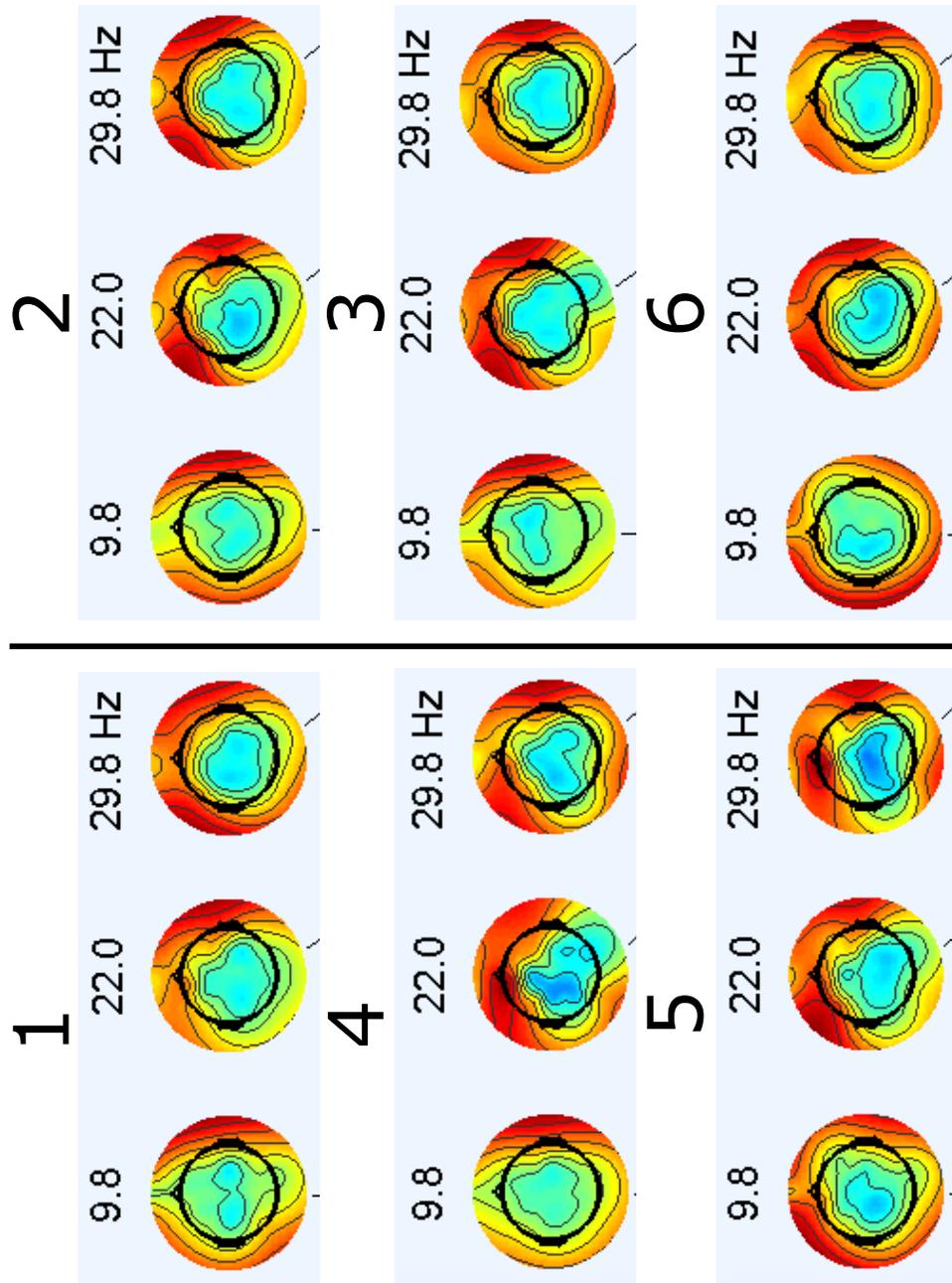


Abbildung 2.48: Karte des EEGs von Proband 1 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

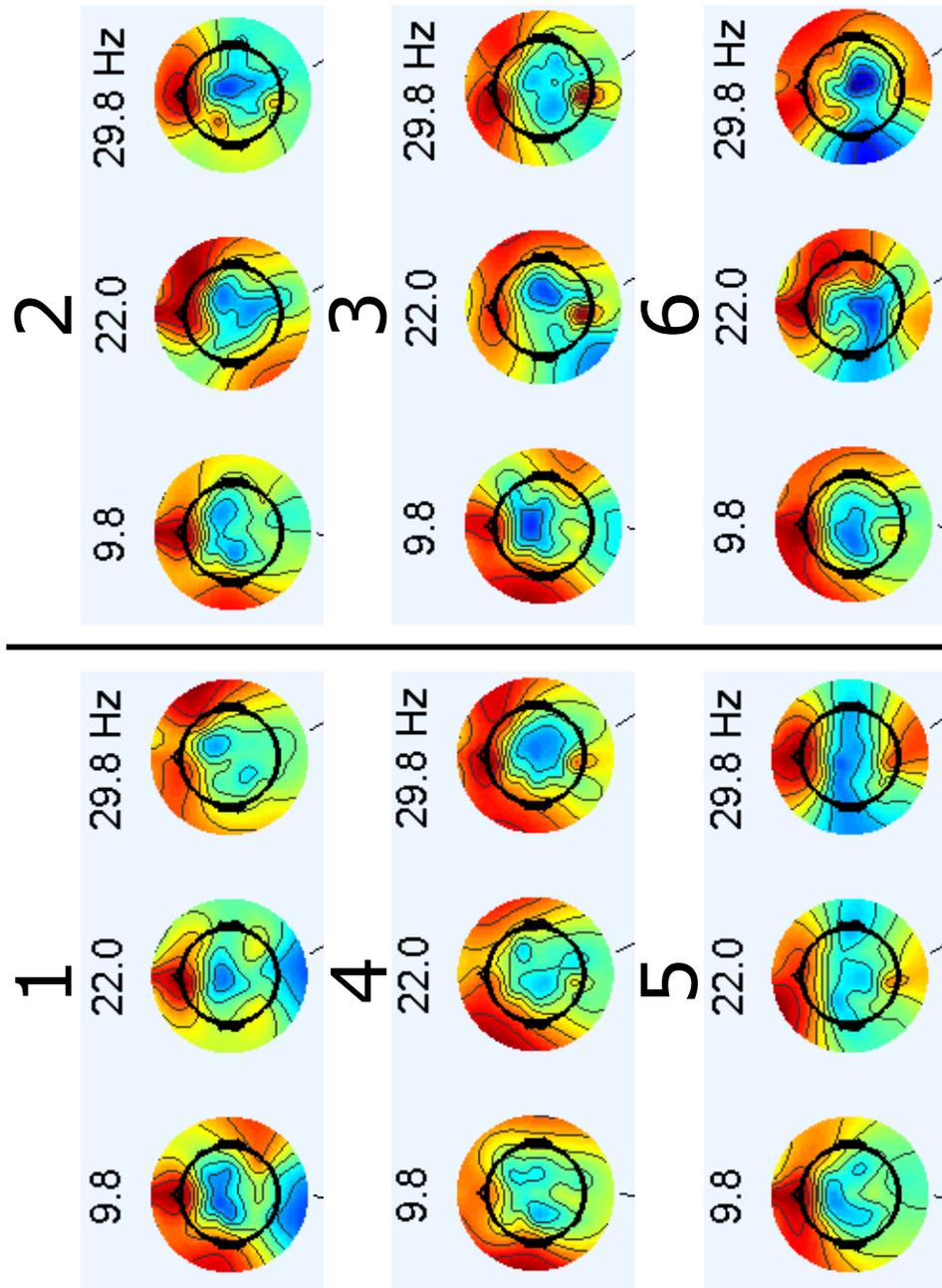


Abbildung 2.49: Karte des EEGs von Proband 2 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma- Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steilflankigen auf der rechten.

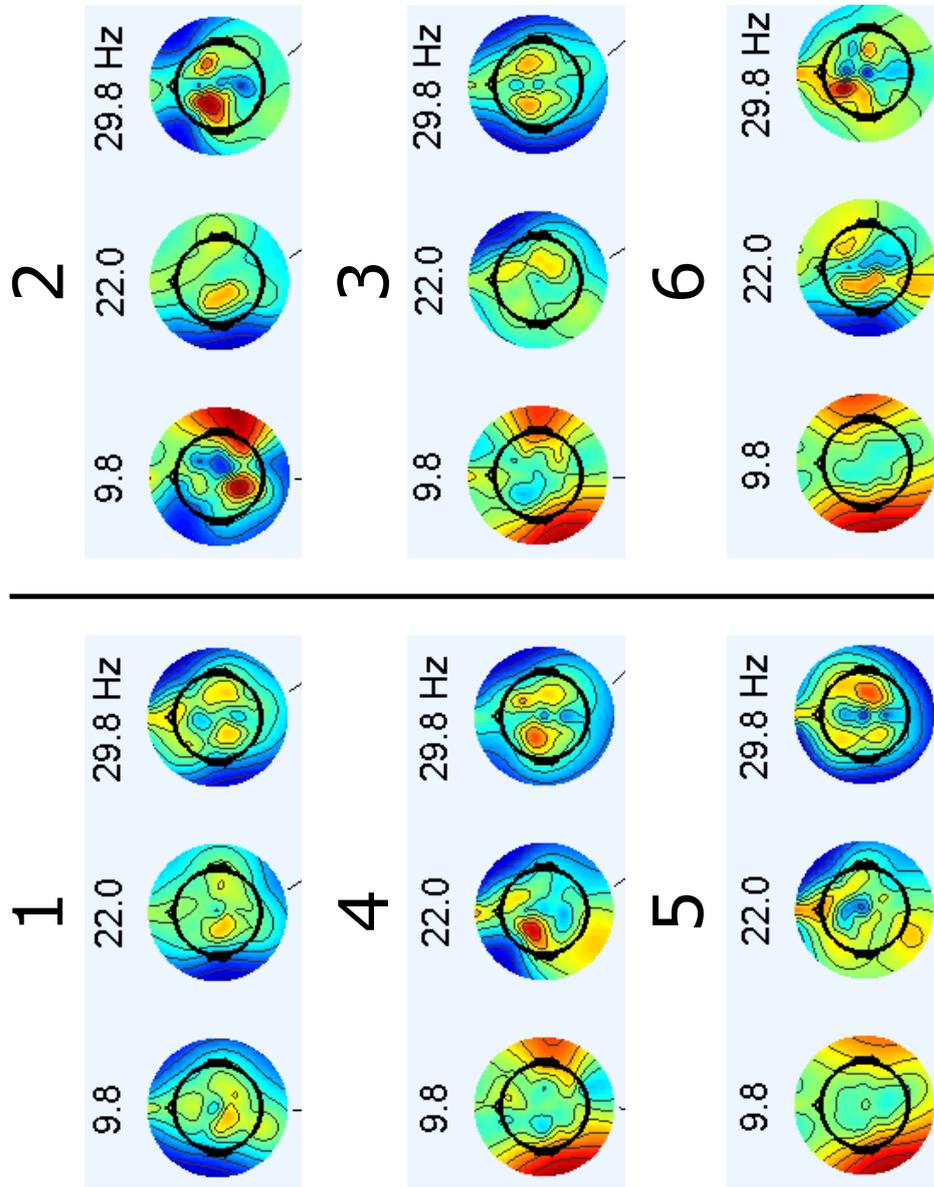


Abbildung 2.50: Karte des EEGs von Proband 3 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steilflankigen auf der rechten.

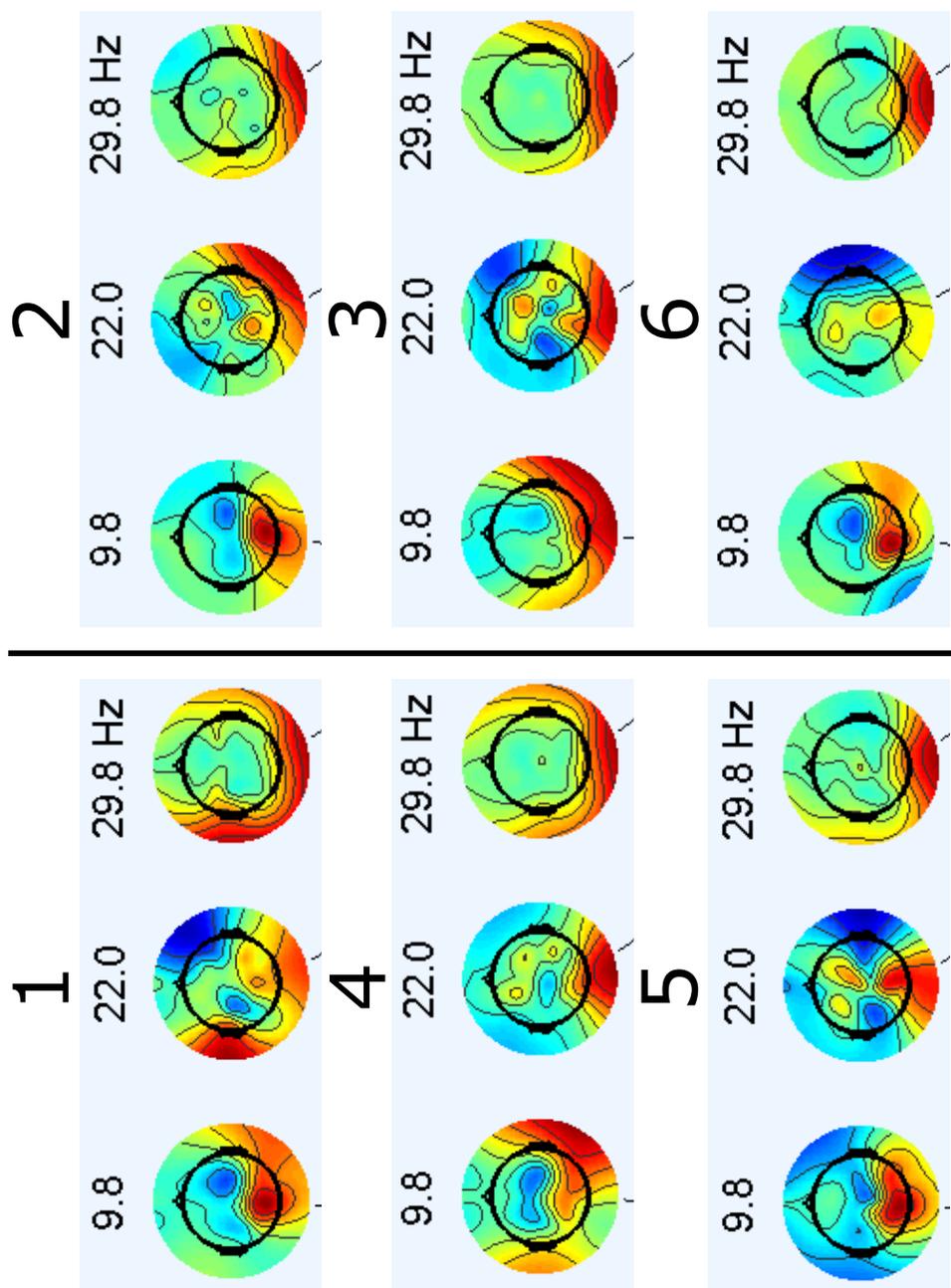


Abbildung 2.51: Karte des EEGs von Proband 4 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

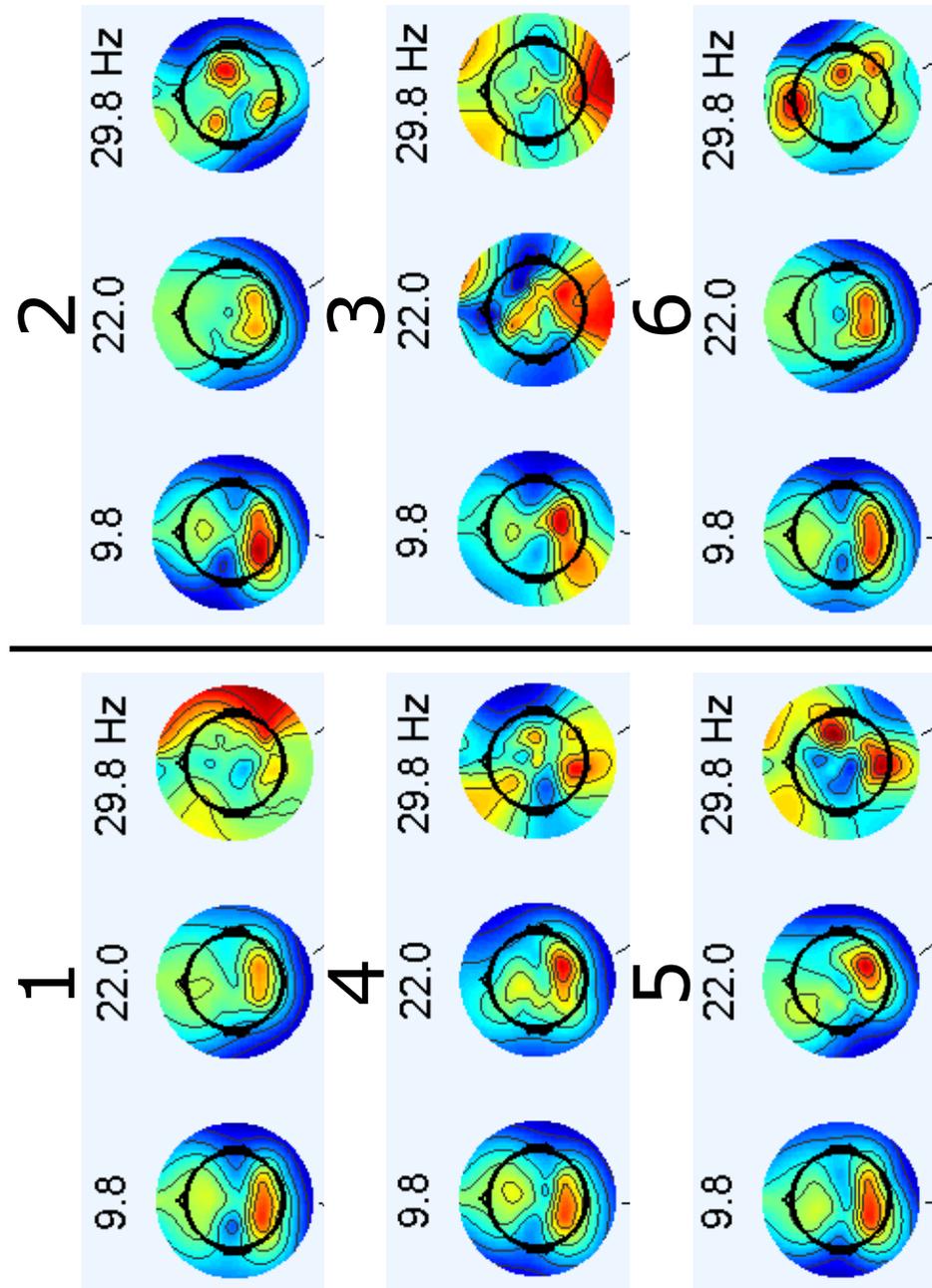


Abbildung 2.52: Karte des EEGs von Proband 5 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steilflankigen auf der rechten.

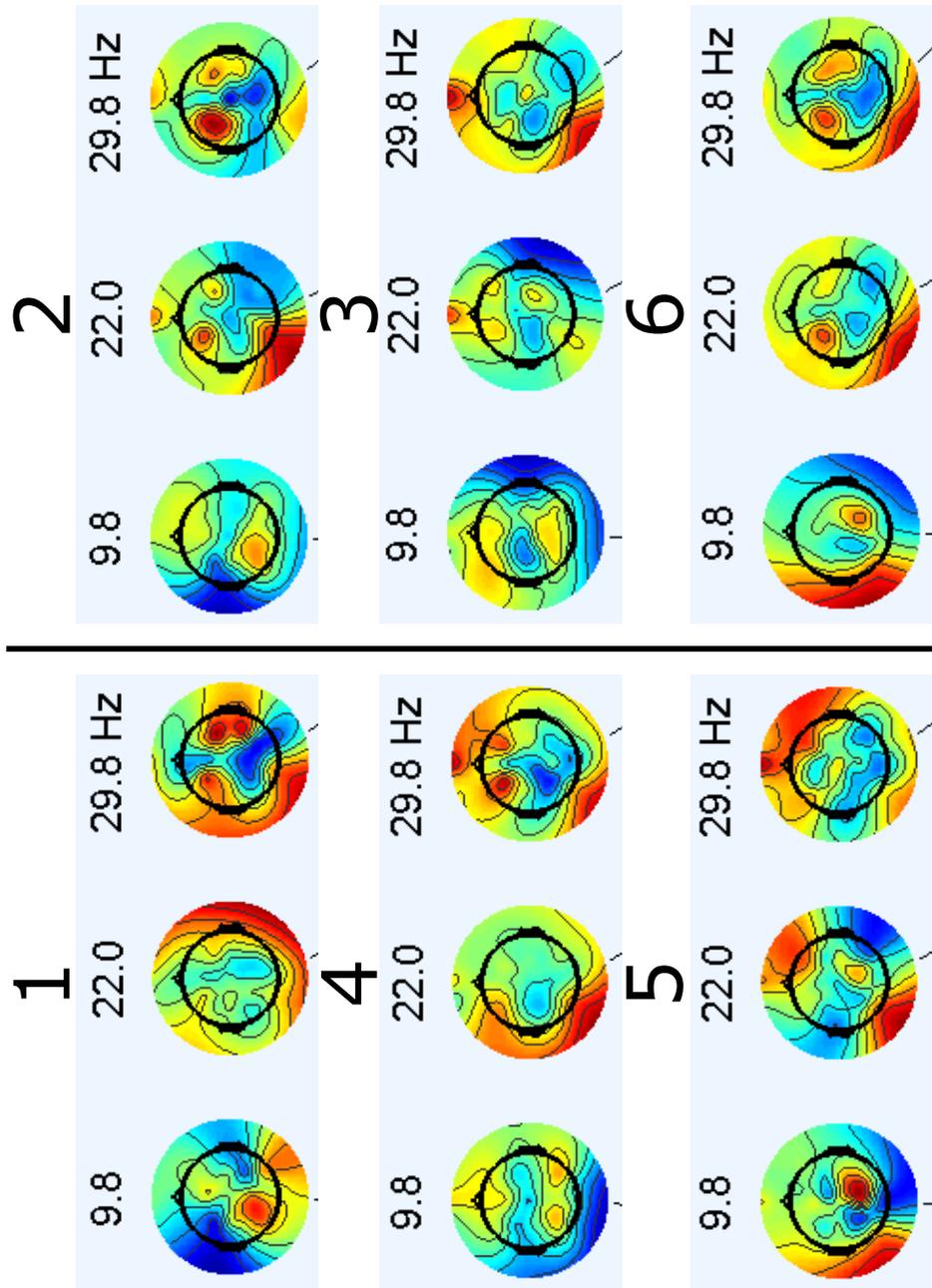


Abbildung 2.53: Karte des EEGs von Proband 6 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

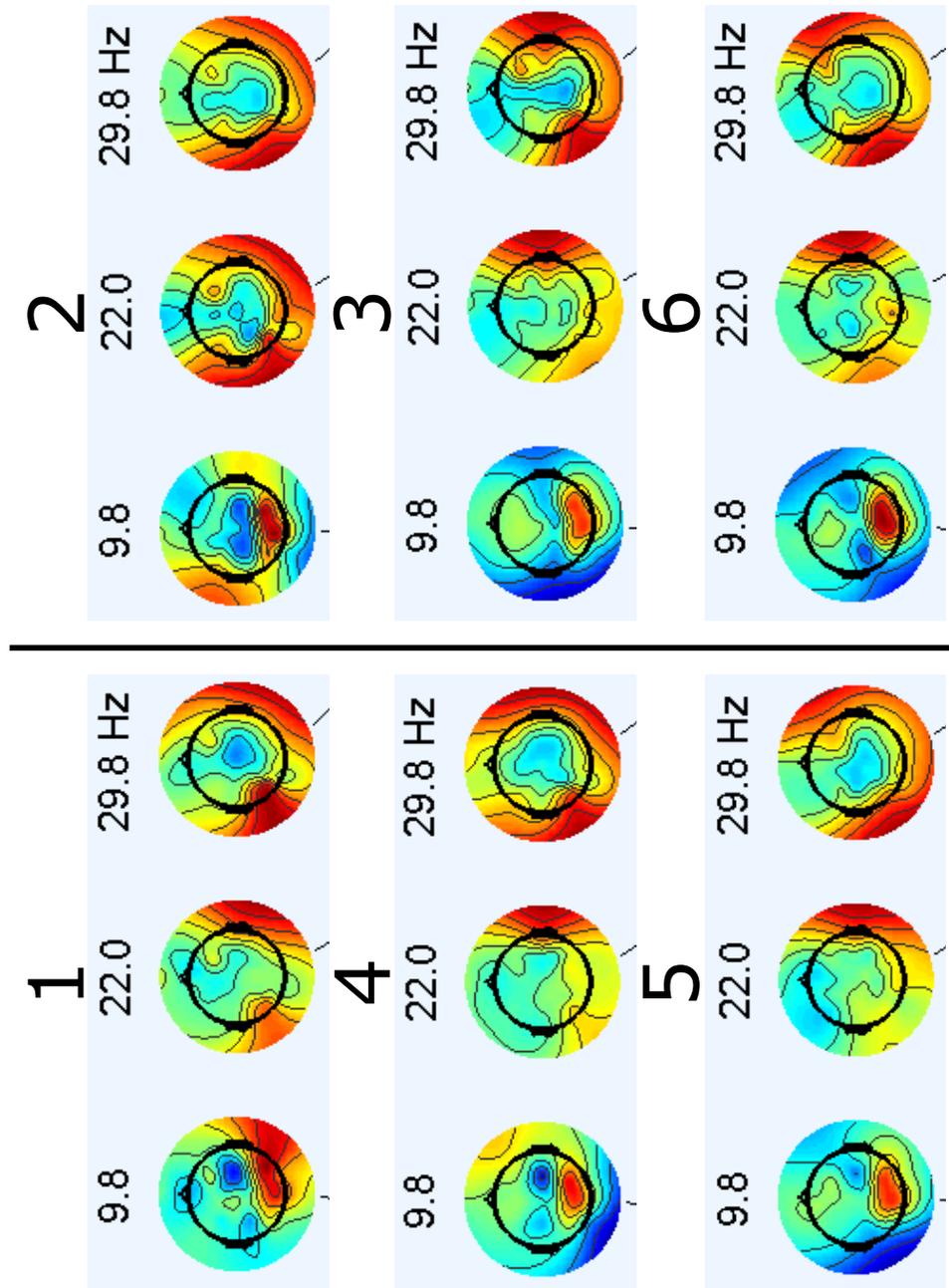


Abbildung 2.54: Karte des EEGs von Proband 7 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steilflankigen auf der rechten.

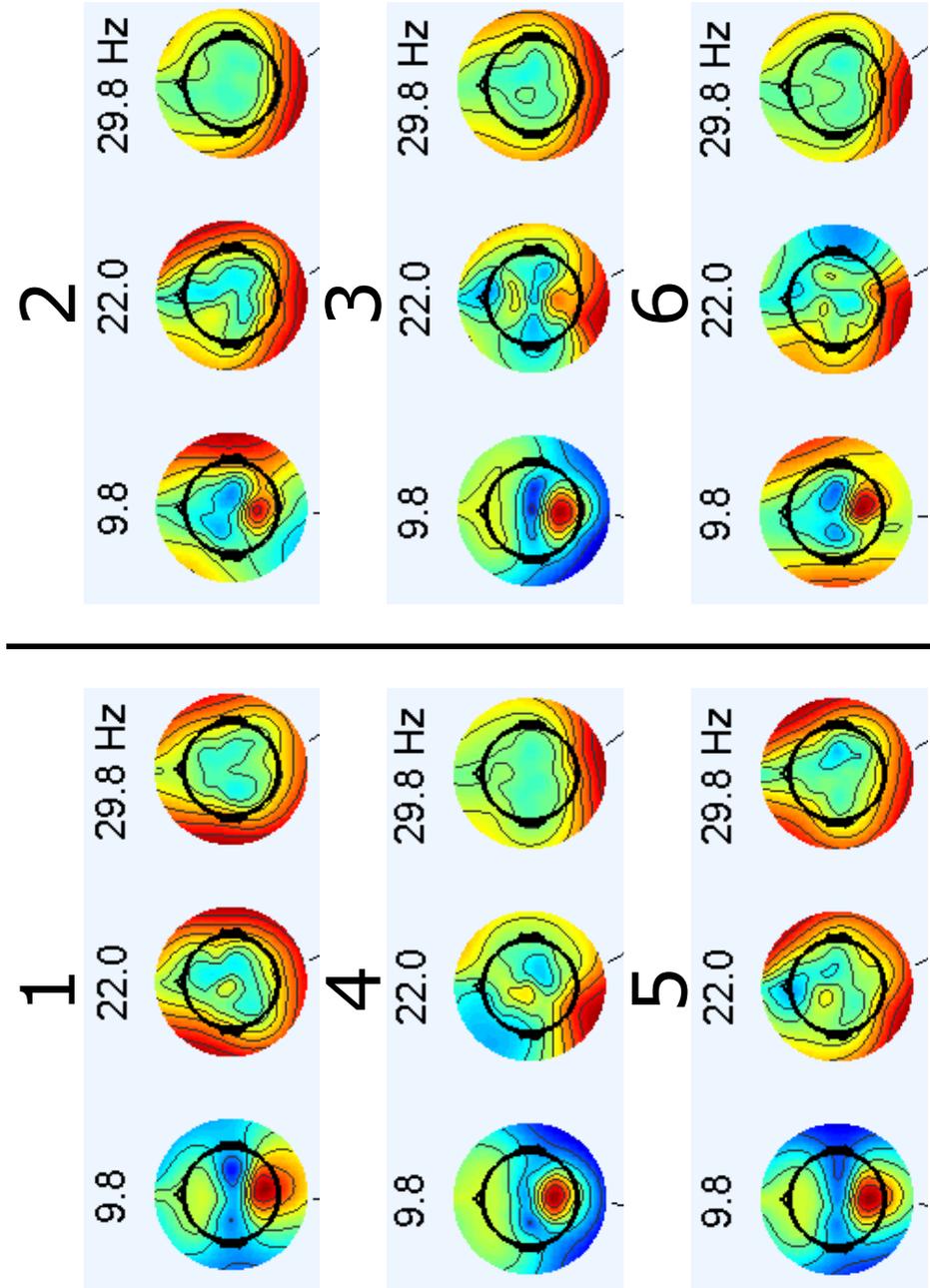


Abbildung 2.55: Karte des EEGs von Proband 8 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steilflankigen auf der rechten.

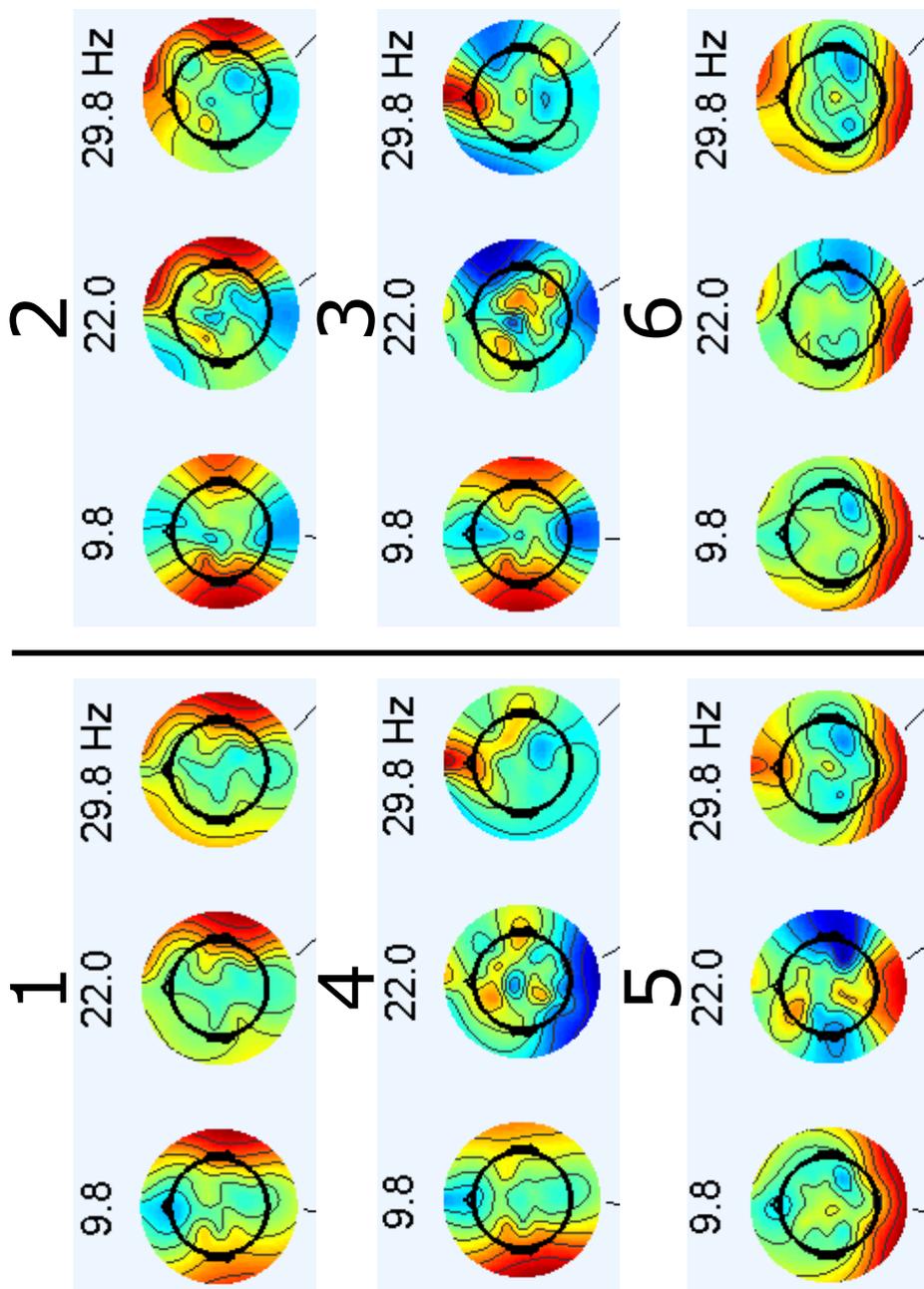


Abbildung 2.56: Karte des EEGs von Proband 9 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

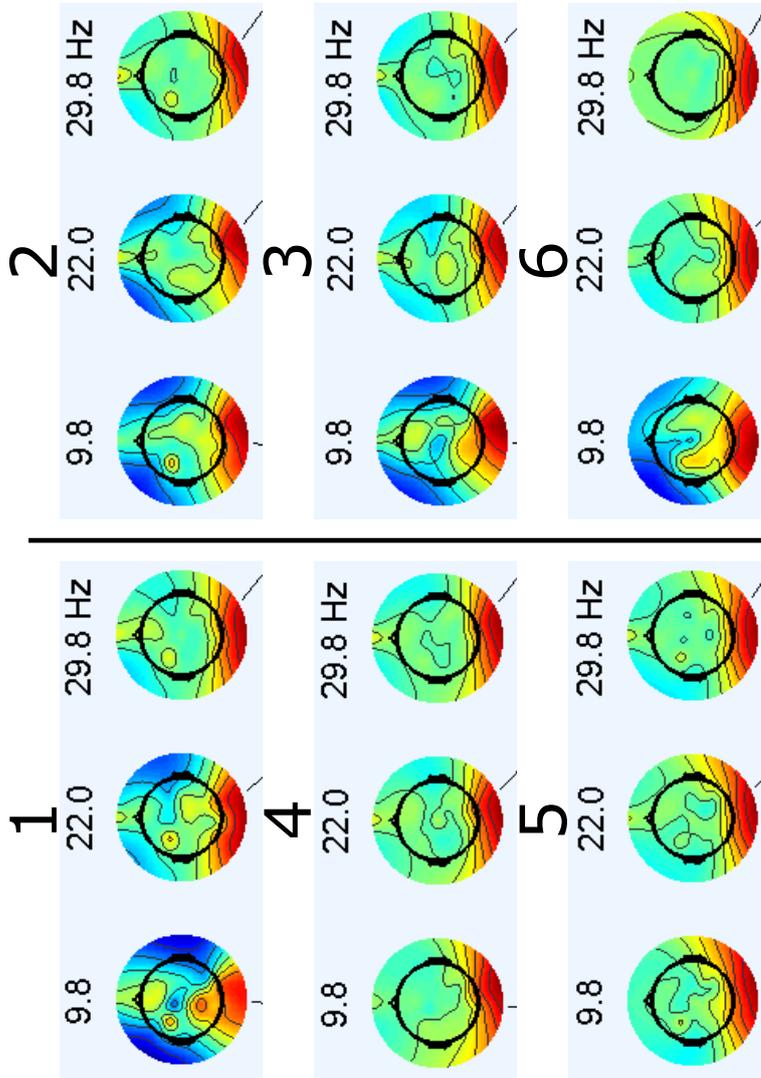


Abbildung 2.57: Karte des EEGs von Proband 10 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

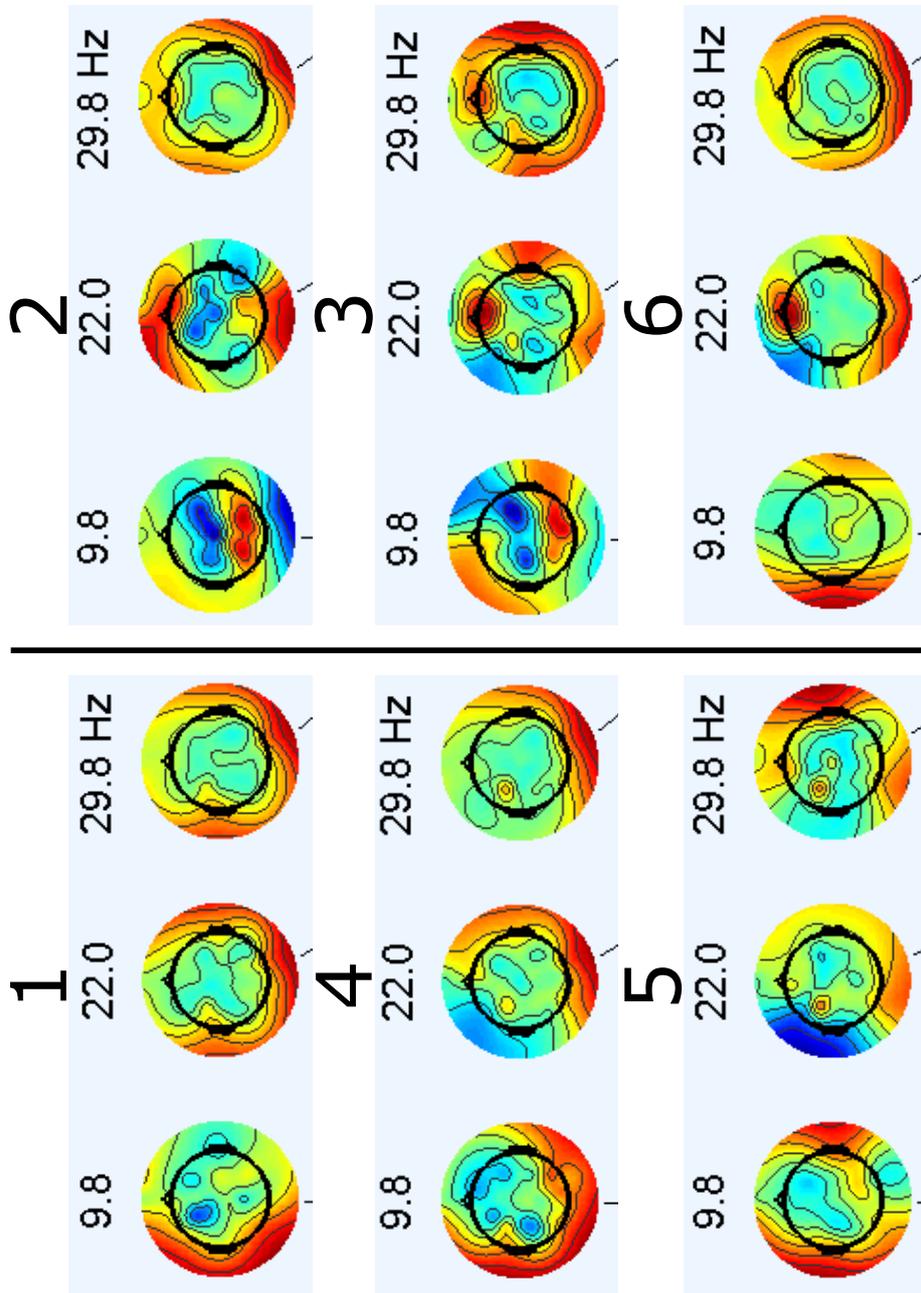


Abbildung 2.58: Karte des EEGs von Proband 11 über die Stimuli gemittelt. Dargestellt werden jeweils Alpha-, Beta- und Gamma-Band. Die flachflankigen Stimuli sind auf der linken Seite zu sehen, die steiflankigen auf der rechten.

Um Aufschluss über einen möglichen Zusammenhang zwischen beidseitiger Gehirnaktivität im Bereich der auditiven cortices zu erhalten, wurde für jeden Probanden über die Dauer jedes einzelnen Stimulus die Kreuzkorrelation zwischen den Elektroden T7 und T8, CP5 und CP6 sowie P7 und P8 berechnet. Abbildung 2.59 zeigt die Boxplots der berechneten Korrelationen. Jede der drei Grafiken zeigt die Verteilung der Korrelationen nach Probanden sortiert für jeweils ein Elektrodenpaar über alle Stimuli des Hörversuchs. Es wurden jeweils nur die Signale innerhalb der Zeitabschnitte der eigentlichen Stimuli verglichen. Aus den Ergebnissen ist keine Auffälligkeit zu erkennen, die auf einen Unterschied zwischen Mitgliedern der auf tieffrequenten Lärm sensitiv bzw. nicht sensitiv reagierenden Personen hindeutet.

Auch der in Abbildung 2.60 dargestellte Vergleich der Verteilung der Korrelation zwischen den Elektrodenpaaren mit Hinblick auf die einzelnen Stimuli zeigt keinen relevanten Unterschied zwischen den beiden Versuchsgruppen.

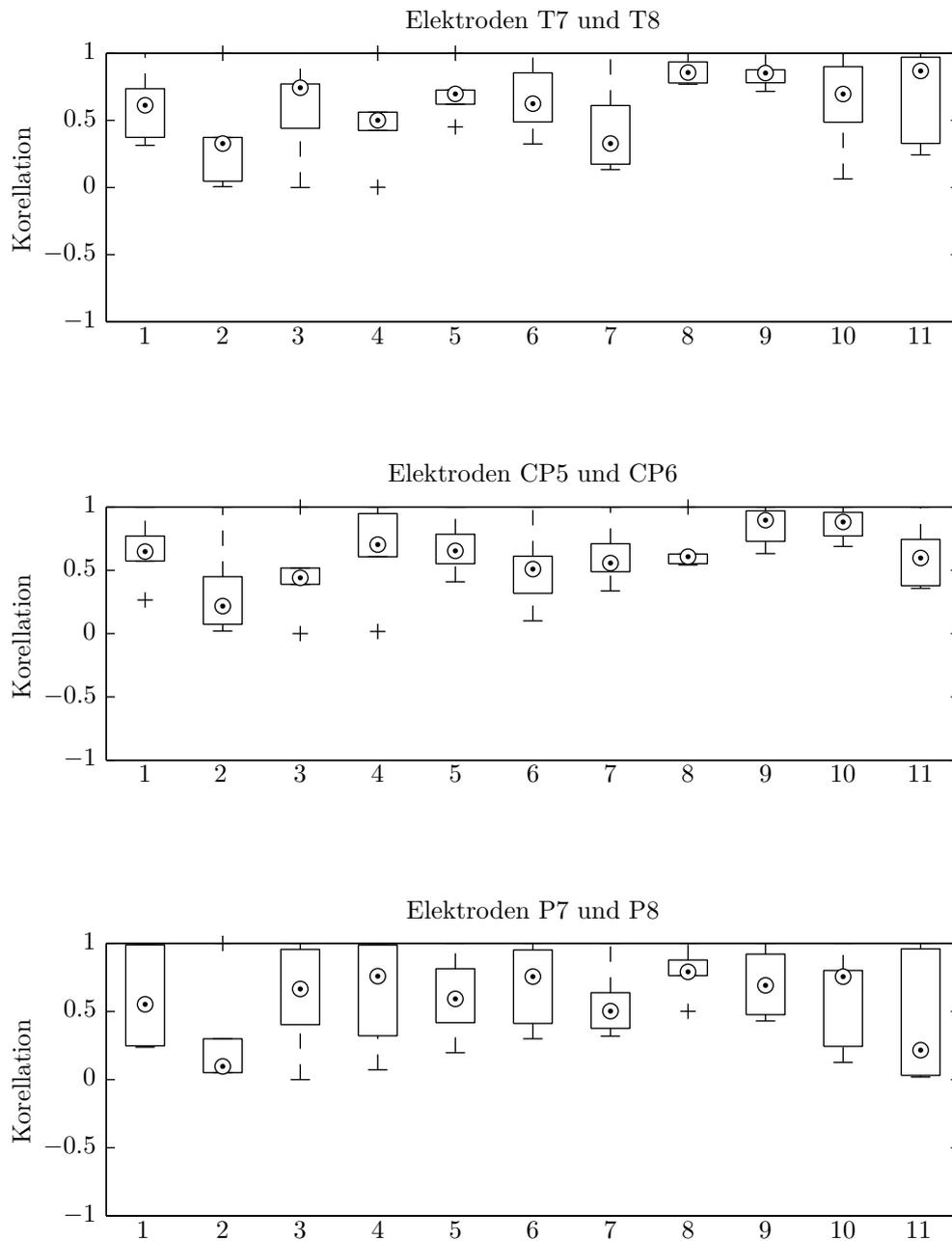


Abbildung 2.59: Boxplots der Korrelation zwischen Elektroden gegenüberliegender Gehirnhälften für ein Elektrodenpaar pro Grafik. Für die einzelnen Probanden wird die Verteilung über alle Stimuli gezeigt.

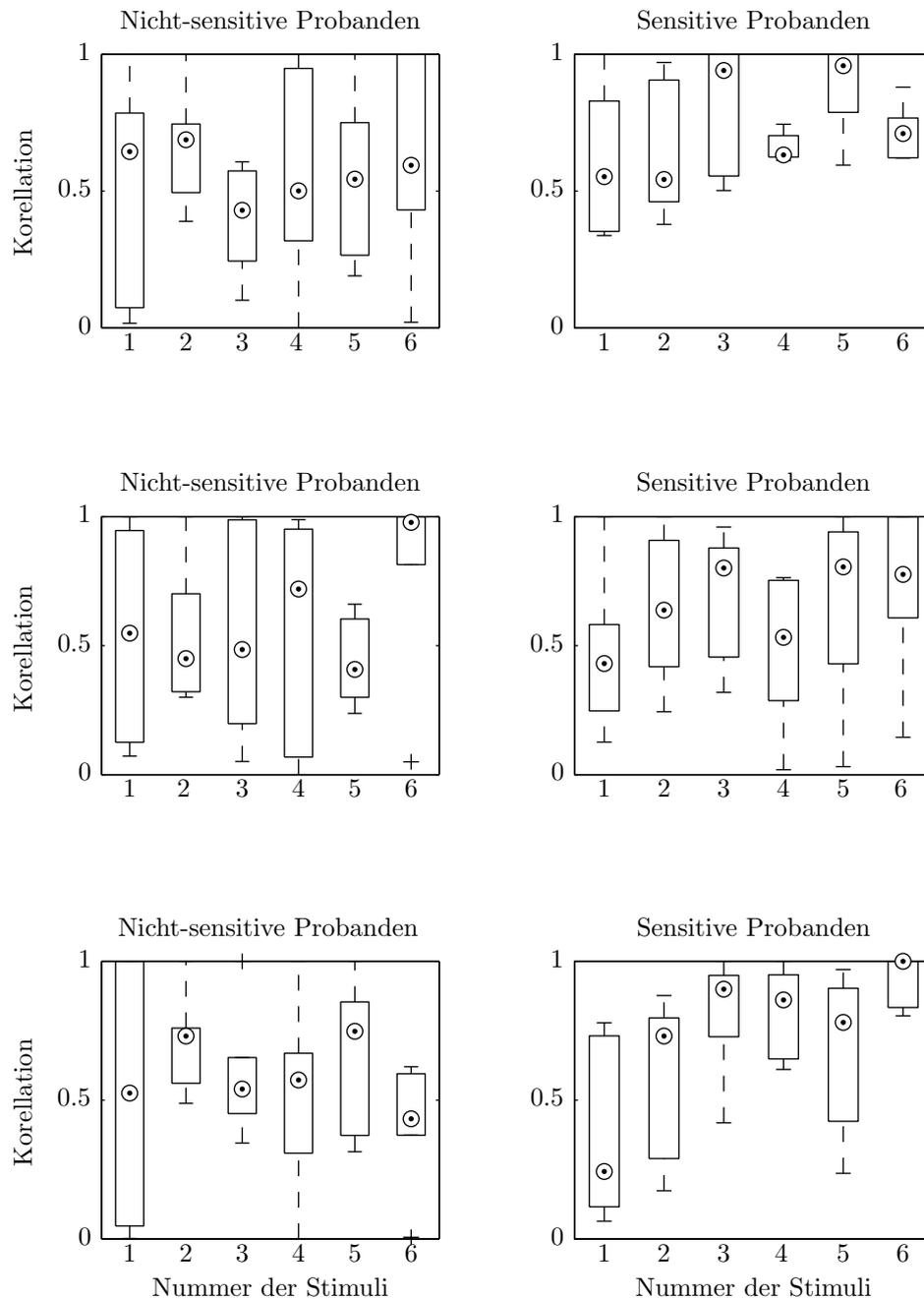


Abbildung 2.60: Boxplots der Korrelation zwischen Elektroden gegenüberliegender Gehirnhälften. Oben: Kreuzkorrelation zwischen den Elektroden T7 und T8. Mitte: Kreuzkorrelation zwischen den Elektroden CP5 und CP6. Unten: Kreuzkorrelation zwischen den Elektroden P7 und P8.

2.3.4 Zusammenfassung

Die Verwendung des EEGs zur Auswertung von Hörversuchen hat sich bereits in dieser ersten Untersuchung als erfolgreich erwiesen, auch wenn zukünftige Hörversuche besser an diese Form der Datenerfassung angepasst werden müssen. So hat vor allem die Länge der einzelnen Stimuli bzw. des gesamten Hörversuchs zu einer großen Datenmenge geführt, die in der Nachbearbeitung nur schwer zu behandeln war. Angepasst an die Fragestellung späterer Hörversuche sollte daher die Anzahl an präsentierten Stimuli gesenkt oder die Dauer der einzelnen Versuchskomponenten vermindert werden. Die Auswertung der EEG-Daten hat die These bestätigt, dass einzelne Individuen auf tieffrequenten Schall anders reagieren als ihre Mitmenschen. Auch wenn hierzu keine direkte Ursache angegeben werden konnte, so ist dennoch in den Daten dieses Hörversuchs eine Tendenz zu erkennen, nach welcher die Gehirnaktivität eines Menschen Rückschluss auf diese außergewöhnliche Wahrnehmung geben könnte. Bei Probanden die unter tieffrequentem Lärm leiden sind hier Besonderheiten auszumachen. Dies bestätigt vorangegangene Studien und lässt die Verwendung von Stimuli, wie sie in diesem Hörtest zum Einsatz kamen, für zukünftige Hörversuche adäquat erscheinen.

2.4 Zusammenfassung und Fazit

Die in diesem Kapitel vorgeschlagenen Versuchsmethoden für Hörtests haben alle zu Ergebnissen geführt, die weitere Untersuchungen mit den vorgeschlagenen Mitteln sinnvoll erscheinen lassen. Verwendet man Kombinationen zweier auf unterschiedliche Sinne abzielender Stimuli, so ist hier vor allem darauf zu achten, dass beide für sich alleine zu einer ähnlich starken Belästigungswirkung führen. Ist dies nicht der Fall, wirkt in einer Art von "multimodaler Maskierung" lediglich der stärkere Stimulus, während der Einfluss des schwächeren nicht mehr festzustellen ist. Dieser Effekt tritt vor allem bei audiovisuellen Versuchen auf. Hier hat die Verwendung einer Videobrille den beschriebenen Effekt deutlich abgeschwächt. Der Einfluss von Synchronität bei gleichzeitiger Verwendung zweier Stimuli variierte im Rahmen der Hörtests abhängig vom verwendeten Medium. Während audiovisuelle Stimuli in asynchroner Form als lästiger wahrgenommen wurden erwies sich bei der Kombination von Lärm und Vibration die synchrone Variante als störender. In beiden Fällen übertraf die kombinierte Lästigkeit jedoch die der Einzelwirkungen der Stimuli.

In allen Hörversuchen waren Einzelpersonen zu beobachten, die anfälliger auf tieffrequenten Lärm reagierten als der Rest. Gerade bei solchen Personen ist zu vermuten, dass bereits eine leichte Erhöhung der Lästigkeit, z.B. durch weitere Reizformen, zu einer massiveren Belästigungswirkung führen kann. Auch in dem vierten Hörversuch ließ sich dieses Ergebnis feststellen. In den aufgezeichneten EEGs waren für einzelne Personen Auffälligkeiten in Abhängigkeit von den Stimuli festzustellen. Diese waren aber in ihrer Form nicht für alle Probanden, die sich als sensitiv für TFL bezeichnen, gleicher Natur. Das legt den Schluss nahe, dass verschiedene Umstände dazu führen können, dass ein Mensch besonders empfindlich auf tieffrequenten Lärm reagiert.

3 Raummodes und deren Schwächung

Das Problem der negativen Wahrnehmung von tieffrequentem Schall, insbesondere bei einzelnen Personen mit besonderem Empfinden, wird durch gewisse physikalische Gegebenheiten weiter verstärkt. In diesem Kapitel wird gezeigt, dass zum einen die bauliche Dämpfung von Schallwellen mit starken Anteilen tiefer Frequenzen schwierig ist und zum anderen innerhalb geschlossener Räume aufgrund deren Eigenfrequenzen (Raummodes) eine erhebliche Verstärkung erfolgen können. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Schallausbreitung hergeleitet. Danach wird eine Lösung zur Dämpfung von unerwünschtem Schall durch elektroakustische Maßnahmen, das sogenannte Active Noise Control (ANC), aufgezeigt. Schließlich wird ein neuer Ansatz untersucht, welcher ANC Systeme im Besonderen zur Dämpfung von Raummodes verbessern soll.

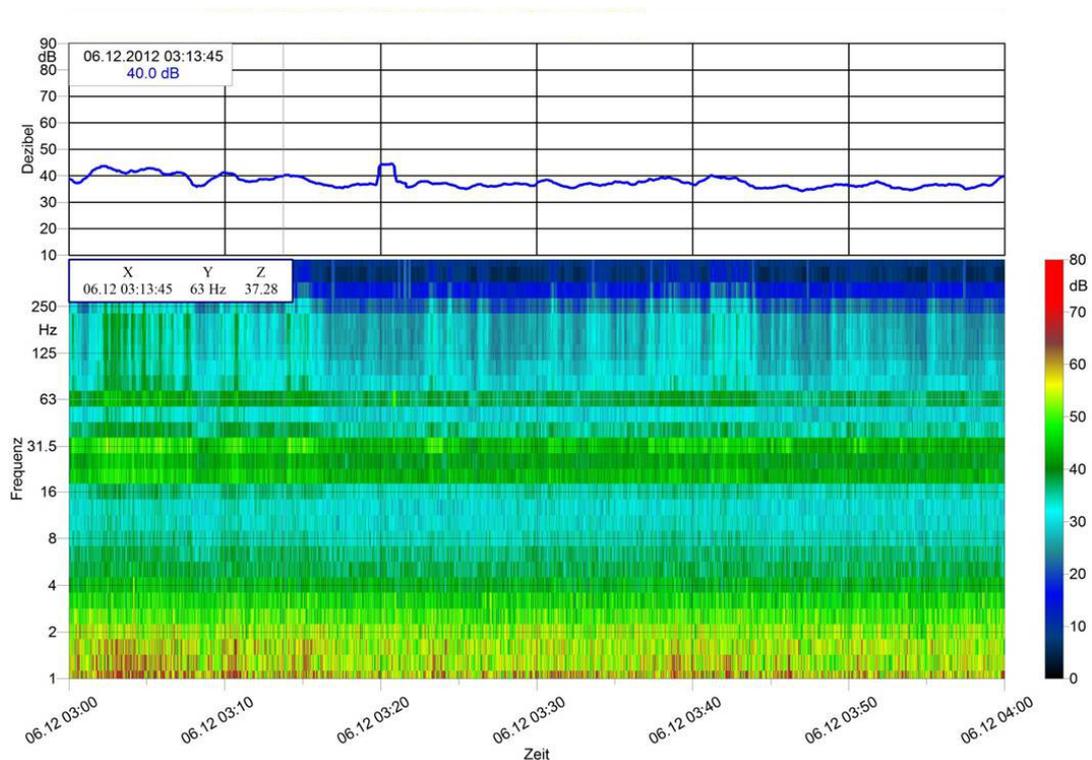


Abbildung 3.1: Spektrogramm einer Schalldruckdauermessung im Haus von Personen, die über die Belästigung durch tieffrequenten Lärm klagen. Die Messung fand während des gesamten 06. Dezember 2012 statt.

Abbildung 3.1 zeigt das Spektrogramm des Dauerschallpegels im Zimmer eines Hauses, dessen Bewohner sich stark von tieffrequentem Lärm belästigt fühlen. Hier sind Raummoden bei 63 Hz sowie zwischen 16 Hz und 31,5 Hz deutlich zu erkennen. Mit einem Schalldruckpegel von konstant 40 dB - 50 dB heben sich diese Raummoden markant hervor und tragen maßgeblich zu der Belästigung der Bewohner des Hauses bei.

3.1 Schallausbreitung

Schall ist die Bezeichnung für sich ausbreitende Teilchenverschiebung in festen, flüssigen, plasma- oder gasförmigen, elastischen Materialien. Die Anregung eines solchen Schallphänomens setzt die dynamische Wechselanregung der betreffenden Materie voraus. Die Beschreibung eines Schallfeldes erfolgt anhand verschiedener physikalischer Kenngrößen. Wie in [DEG06] und den dort verwendeten Quellen zusammengefasst, können folgende Aussagen über ein gegebenes Schallfeld getroffen werden:

Geht man von einer periodischen Anregung des Schalls aus, so ist f die Frequenz dieser Schwingung bei einer Periodendauer von T Sekunden:

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.1.1)$$

In Verbindung mit der Ausbreitungsgeschwindigkeit des Schalls c gilt für die Wellenlänge einer gegebenen Schallwelle:

$$\lambda = \frac{c}{f} = cT \quad (3.1.2)$$

Die Schallgeschwindigkeit in einem Ausbreitungsmedium c_0 ist abhängig von diesem Medium und den Umgebungsbedingungen ($c_{0,\text{Luft,Normalbedingungen}} \cong 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Der skalare Schalldruck p gibt die Druckdifferenz zwischen dem Schallereignis an einem gegebenen Punkt und dem dort herrschenden Atmosphärendruck an. In der Regel wird jedoch der Schalldruckpegel in dB angegeben. Dieser berechnet sich aus dem Effektivwert des Schalldrucks \tilde{p} mit

$$\tilde{p}^2 = \lim_{\tau \rightarrow \infty} \frac{1}{\tau} \int_{\tau} p^2(t) dt \quad (3.1.3)$$

und dem Bezugsschalldruck $p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{Pa}$ wie folgt:

$$L_p = 10 \lg \left(\frac{\tilde{p}}{p_0} \right)^2 \text{dB} = 20 \lg \frac{\tilde{p}}{p_0} \text{dB}. \quad (3.1.4)$$

Neben dem Druck beschreibt die Schallschnelle v maßgeblich die Ausbreitung des

Schalls. Sie gibt die Geschwindigkeit und Richtung der Auslenkung einzelner Materieteilchen um ihre relative Ruhelage an. Analog zu dem Schalldruckpegel kann auch ein Schallschnellepegel bezüglich der Bezugsschnelle $v_0 = 5 \cdot 10^{-8} \frac{\text{m}}{\text{s}}$ angegeben werden:

$$L_v = 10 \lg\left(\frac{\tilde{v}}{v_0}\right)^2 \text{dB} = 20 \lg \frac{\tilde{v}}{v_0} \text{dB}. \quad (3.1.5)$$

Aus der Schallschnelle lässt sich direkt der Schallfluss q durch eine Querschnittsfläche \mathbf{S} ableiten:

$$q = \int_{\mathbf{S}} \mathbf{v} d\mathbf{S} \quad (3.1.6)$$

Das Verhältnis der beiden komplexen Größen Schalldruck und Schallschnelle bestimmt die Feldimpedanz \underline{Z}_s in Richtung der Schallschnelle:

$$\underline{Z}_s = \underline{Z} = \frac{p}{v}. \quad (3.1.7)$$

In einer ebenen, fortschreitenden Welle ergibt sich hieraus der reelle Wellenwiderstand Z_0 als

$$Z_0 = \frac{\tilde{p}}{\tilde{v}} = \rho_0 c_0 \quad (3.1.8)$$

wobei ρ_0 die Dichte des Materials angibt.

Genauso ergibt sich die akustische Impedanz (oder Schallflussimpedanz) \underline{Z}_a aus dem Verhältnis von komplexem Schalldruck und Schallfluss:

$$\underline{Z}_a = \frac{p}{q}. \quad (3.1.9)$$

Die Schallenergiedichte, die in einem Volumen enthaltene Schallenergie, einer sich eben ausbreitenden Schallwelle besteht aus der Summe von kinetischer und potentieller Schallenergiedichte. Der kinetische Teil wird hierbei durch die Schallschnelle bestimmt

$$w_{\text{kin}} = \frac{\rho_0}{2} \tilde{v}^2 \quad (3.1.10)$$

und der Anteil an potentieller Energie durch den Schalldruck:

$$w_{\text{pot}} = \frac{\tilde{p}^2}{2\rho_0 c_0^2}. \quad (3.1.11)$$

Die Summe aus beiden Teilen ergibt sich über 3.1.7 und 3.1.8 zu:

$$w = w_{\text{kin}} + w_{\text{pot}} = \frac{\rho_0}{2} \tilde{v}^2 + \frac{\tilde{p}^2}{2\rho_0 c_0^2} = \rho_0 \tilde{v}^2. \quad (3.1.12)$$

Die Schallintensität oder Schallenergieflussdichte \mathbf{I} beschreibt, die pro Flächeneinheit eingestrahlte Schallleistung über das Produkt aus Schalldruck und Schallschnelle:

$$\mathbf{I} = p\mathbf{v}. \quad (3.1.13)$$

Für die meisten Betrachtungen wird die Schallintensität als zeitlich unveränderlich betrachtet, auch wenn dies streng genommen nicht den physikalischen Gegebenheiten entspricht. Dies ermöglicht es jedoch, die Schallintensität über die Effektivwerte von Druck und Schnelle zu berechnen:

$$I = \tilde{p}\tilde{v} \cos \phi \quad (3.1.14)$$

Für eine ebene, fortschreitende Schallwelle kann unter dieser Voraussetzung und aufgrund der Tatsache, dass für ebene Schallwellen kein Phasenunterschied zwischen Schalldruck und Schallschnelle vorliegt,

$$I = \tilde{p}\tilde{v} \quad (3.1.15)$$

angenommen werden. Zusammen mit 3.1.8 lässt sich diese Aussage erweitern:

$$I = \tilde{p}\tilde{v} = Z_0\tilde{v}^2 = \frac{\tilde{p}^2}{Z_0}. \quad (3.1.16)$$

Für den Zusammenhang zwischen Schallenergiegedichte (3.1.12) und Schallintensität ergibt sich nach zweimaligem Anwenden von 3.1.8 daraus:

$$w = \rho_0\tilde{v}^2 = \frac{\tilde{p}^2}{Z_0c_0} = \frac{I}{c_0} \quad (3.1.17)$$

Auch für diese Größe wird in der Praxis in der Regel der Schallintensitätspegel L_I für den Bezugswert $I_0 = 10^{-12} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ verwendet:

$$L_I = 10 \lg \frac{I}{I_0} \text{dB}. \quad (3.1.18)$$

Wie auf den vorigen Seiten bereits zu erkennen ist, lässt sich das Verhalten von Schall als Wellenfeldverhalten beschreiben. Daher scheint es sinnvoll, grundlegende Feld- und Wellengrößen auch für das Schallfeld zu definieren.

Während die Schallintensität eine Größe des Schallfeldes ist, gibt die Schallleistung Auskunft über die Quelle des Schalls. Integration der Schallintensität über eine, die Schallquelle ganz umschließende Hüllfläche, gibt Aufschluss über die Schallleistung P dieser Quelle:

$$P = \int_S \mathbf{I} \, dS = \int_S p \mathbf{v} \, dS. \quad (3.1.19)$$

Der in der Praxis verwendete Schallleistungspegel L_W berechnet sich über den Zehnerlogarithmus bezogen auf die Bezugsschallleistung $P_0 = 10^{-12}$ W als:

$$L_W = 10 \lg \frac{P}{P_0} \text{dB}. \quad (3.1.20)$$

Integriert man die Schallschnelle über die gesamte von ihr durchsetzte Fläche auf, so erhält man mit dem Schallfluss q , eine weitere Quellengröße des Schallfeldes als:

$$q = \int_S \mathbf{v} dS. \quad (3.1.21)$$

Für eine theoretische Punktquelle (Kugelstrahler nullter Ordnung), welche den Monopol akustischer Felder darstellt, lässt sich der Schallfluss als

$$q = \oint_S v_0 dS = v_0 4\pi R^2 \quad (3.1.22)$$

angeben, wobei R die Entfernung der Kugeloberfläche von dem Punktstrahler und v_0 die auf dieser Kugeloberfläche konstante Schallschnelle angibt.

In dem von dieser Quelle ausgehenden Feld lässt sich das akustische Potential Φ abhängig von der Schnelle über

$$\mathbf{v} = \text{grad}\Phi \quad (3.1.23)$$

festlegen, da die Schnelle, mit der Ausnahme gewisser Grenzflächen, wirbelfrei ist. Für dieses Schallfeld sollen im Folgenden die Wellengleichung aus den physikalischen Grundgleichungen hergeleitet und ihre elementaren Lösungen angegeben werden. Über diese lässt sich das akustische Feld vollständig beschreiben. Für alle weiteren Betrachtungen wird das Material, in welchem sich die Schallwelle ausbreitet, als zeitinvariant, isotrop und homogen angesehen. Die Ausbreitung selber soll als reibungsfrei angesehen werden können.

Ausgehend vom zweiten Newtonschen Gesetz, wie es Euler formuliert hat,

$$m\mathbf{a} = \mathbf{F} \quad (3.1.24)$$

lässt sich die reibungsfreie, linearisierte Bewegungsgleichung für die Akustik als

$$\rho_0 \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} = -\text{grad } p \quad (3.1.25)$$

angeben.

Betrachtet man ein gegebenes Volumen, muss die Masse der in dieses Volumen ein- und ausströmenden Teilchen gleich der zeitlichen Änderung der Masse im Inneren des Volumens sein. Daraus ergibt sich für den instationären, kompressiblen Fall mit gegenüber der Umgebungsdichte sehr kleinen Dichteschwankungen die Kontinuitätsgleichung:

$$\rho_0 \operatorname{div} \mathbf{v} = -\frac{\partial \rho}{\partial t}. \quad (3.1.26)$$

Für isentrope, adiabatische Zustandsänderungen ist das Verhältnis

$$\frac{p}{\rho^\kappa} = \textit{konstant}. \quad (3.1.27)$$

Somit lässt sich der Zusammenhang zwischen Druck und Dichteschwankung bei, im Verhältnis zu den Umgebungsbedingungen kleinen, akustischen Schwankungsgrößen, als

$$\frac{p}{\rho} = c_0^2 = \kappa \frac{p_0}{\rho_0} \quad (3.1.28)$$

angeben, was die Zustandsgleichung des akustischen Wellenfeldes darstellt, wenn κ als Isentropenexponent

$$\kappa = \frac{C_p}{C_V} \quad (3.1.29)$$

des Ausbreitungsmediums mit einem konstanten Druck C_p auf dem Volumen C_V gilt. Von diesen drei Zustandsgleichungen ausgehend lassen sich die vier Wellengleichungen eines dreidimensionalen, quellenfreien Schallfeldes in einem Medium, dessen Teilchenbewegung reibungs- und wirbelfrei abläuft, aufstellen. Dabei werden alle Vorgänge als isentrop und die Bewegung einzelner Materieteilchen, als keiner äußeren Kraft unterliegend, angenommen.

Wellengleichung des Schalldrucks:

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = 0. \quad (3.1.30)$$

Wellengleichung der Schallschnelle:

$$\nabla^2 \mathbf{v} - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial t^2} = 0. \quad (3.1.31)$$

Wellengleichung der Dichteschwankung:

$$\nabla^2 \rho - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} = 0. \quad (3.1.32)$$

Wellengleichung des akustischen Potentials:

$$\nabla^2 \Phi - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} = 0. \quad (3.1.33)$$

Nimmt man von hier ausgehend an, dass sich das Schallfeld harmonisch, beispielsweise mit einem Schalldruckverlauf gemäß

$$p(t) = \hat{p} \cos(\omega t + \phi) = \Re\{\hat{p}e^{j(\omega t + \phi)}\} = \Re\{pe^{j\omega t}\} \quad (3.1.34)$$

ausbreitet, so kann man die Wellengleichungen in der Helmholtzform angeben

$$\begin{aligned} \nabla^2 p + k_0^2 p &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{v} + k_0^2 \mathbf{v} &= 0 \\ \nabla^2 \rho + k_0^2 \rho &= 0 \\ \nabla^2 \Phi + k_0^2 \Phi &= 0 \end{aligned} \quad (3.1.35)$$

wobei k_0 als die Kreiswellenzahl, bzw. Betrag des Wellenvektors \mathbf{k} nach

$$k_0 = \frac{\omega}{c_0} = \frac{2\pi f}{c_0} = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3.1.36)$$

gegeben ist.

Für diese Gleichungen existieren Lösungen für verschiedene, vereinfachte Fälle.

Man gehe zunächst von einer ebenen Schallwelle aus. Das heißt sie breitet sich nur in eine Richtung \mathbf{r} aus und Ebenen konstanter Phase ($kx - \omega t = \text{konstant}$) stehen senkrecht zur Ausbreitungsrichtung. Diese Form der akustischen Wellenausbreitung lässt sich näherungsweise in, im Bezug auf die Wellenlängen, dünnen Rohren und Rechteckkanälen beobachten. Für diesen Fall lässt sich die eindimensionale, allgemeine Lösung für das akustische Potenzial als

$$\Phi(\mathbf{r}, t) = \Phi_+(\omega t - \mathbf{kr}) + \Phi_-(\omega t + \mathbf{kr}) \quad (3.1.37)$$

angeben. Hier bezeichnet Φ_+ die Ausbreitung der Schallwelle in positive \mathbf{r} Richtung und Φ_- in negative. Setzt man eine harmonische Welle voraus, so erhält man die Ausbreitung in positive Richtung in Helmholtzform:

$$\Phi(\mathbf{r}) = \Phi_+ e^{-j\mathbf{kr}}. \quad (3.1.38)$$

Mit Hilfe von 3.1.23 und der eindimensionalen, harmonischen Form von 3.1.25 lassen sich analog die Lösung für den Schalldruck

$$p_+ = -j\omega\rho_0\Phi_+ \quad (3.1.39)$$

und die Lösung für die Schallschnelle zusätzlich unter Verwendung des Wellenwiderstandes 3.1.8

$$v_+ = -jk\Phi_+ \quad (3.1.40)$$

angeben.

In der Praxis finden die Wellengleichungen für ebene Wellen außerhalb von geschlossenen Rohren selten Anwendung. Deutlich wichtiger ist die Betrachtung von Kugelwellen nullter Ordnung, Wellen deren Phasenflächen sich konzentrisch von einem gedachten punktförmigen akustischen Monopol ausbreiten. Die meisten realen Schallquellen lassen sich mit genügendem Abstand von der Quelle, im sogenannten Fernfeld, als Kugelstrahler ansehen. Die Bedingungen des Fernfeldes sind erfüllt, wenn man annehmen kann, dass

$$k_0 r \gg 1 \Leftrightarrow r \gg \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3.1.41)$$

erfüllt ist. Analog kann man die Nahfeldbedingung

$$k_0 r \ll 1 \Leftrightarrow r \ll \frac{\lambda}{2\pi} \quad (3.1.42)$$

aufstellen.

Ausgehend von der Annahme kugelförmiger Abstrahlung existiert für die Wellenausbreitung lediglich eine Abhängigkeit von der Entfernung r zum Quellpunkt, so dass sich für die Wellengleichung in Helmholtzform und Kugelkoordinaten folgende Form ergibt:

$$\frac{\partial[\Phi(r)r]}{\partial r^2} + k^2[\Phi(r)r] = 0. \quad (3.1.43)$$

Gelöst wird diese Gleichung durch vom Quellursprung fort strebende Kugelwellen der Form:

$$\Phi(r) = \frac{B_0}{r} e^{-jkr}. \quad (3.1.44)$$

B_0 ist hier eine von der Quellstärke abhängige Integrationskonstante. Über 3.1.23 und 3.1.39 lassen sich hieraus die Lösungen für Schalldruck

$$p(r) = \frac{-j\omega\rho_0 B_0}{r} e^{-jkr} = \frac{p_+}{kr} e^{-jkr}, \quad (3.1.45)$$

und Schallschnelle

$$v(r) = -\frac{jkB_0}{r} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} = \frac{p_+}{Z_0 kr} \left(1 + \frac{1}{jkr}\right) e^{-jkr} \quad (3.1.46)$$

aufstellen. Wie aus 3.1.45 direkt ersichtlich ist, gilt für das Proportionalitätsverhalten des Schalldrucks einer Kugelquelle

$$p(r) \propto \frac{1}{r}. \quad (3.1.47)$$

Die Schallschnelle betreffend ist dieses Verhalten jedoch vom Abstand zu der Quelle abhängig. So gilt:

$$v(r) \propto \frac{1}{r} \quad \text{für: } kr \gg 1 \quad (\text{Nahfeld}) \quad (3.1.48)$$

$$v(r) \propto \frac{1}{r^2} \quad \text{für: } kr \ll 1 \quad (\text{Fernfeld}) \quad (3.1.49)$$

Zusätzlich zu Schalldruck und Schallschnelle sollen im Folgenden weitere wichtige Größen des Schallfeldes des Kugelstrahlers nullter Ordnung gegeben werden, da dieser wie bereits erwähnt in der Praxis sehr häufig verwendet wird.

Aus 3.1.7, 3.1.45 und 3.1.46 folgt für die Feldimpedanz der akustischen Kugelwelle:

$$Z = Z_0 \frac{jk r}{1 + jk r}. \quad (3.1.50)$$

Für das Fernfeld wird diese mit 3.1.41 zu $Z \approx Z_0$. Im Nahfeld wird sie aufgrund 3.1.42 komplett imaginär ($Z \approx -jZ_0kr$). Daraus ergibt sich, dass im Nahfeld einer Kugelquelle Schalldruck und Schallschnelle zueinander um 90 deg phasenverschoben sind. Im Fernfeld jedoch verhalten sich diese wie in einer ebenen Welle.

Da die Kugelwellen als komplex harmonisch angenommen werden, lässt sich die Schallintensität hier aus 3.1.13, 3.1.45 und 3.1.46 als

$$I = \frac{|B_0|^2 Z_0 k^2}{2r^2} = \frac{p_+^2}{2Z_0(kr)^2} = \tilde{p}\tilde{v} \cos \phi \quad (3.1.51)$$

berechnen.

Integriert man die in 3.1.51 berechnete Schallintensität über eine die Quelle umgebende Kugeloberfläche auf, so erhält man die von dieser Schallquelle abgegebene Schallleistung:

$$P = 2\pi |B_0|^2 Z_0 k^2 = \frac{\pi \tilde{q}^2 Z_0}{\lambda^2} \quad (3.1.52)$$

3.2 Ausbreitung in Räumen

Breitet sich eine über die in Abschnitt 3.1 beschriebenen Größen definierte Schallwelle im Inneren eines Raumes aus, so wird sie zum größten Teil von den Wänden reflektiert.

Die reflektierten Wellen überlagern sich so, dass abhängig von der Wellenlänge und der Raumgröße Raummoden, dreidimensionale stehende Wellen in geschlossenen Räumen, entstehen können. Um Entstehung und Auswirkung dieser Raummoden beschreiben zu können, soll im Folgenden zunächst die Reaktion von Schallwellen auf Grenzflächen beschrieben werden.

Trifft eine Schallwelle auf ein Objekt mit anderen Materialeigenschaften als diejenigen welche für das Ausbreitungsmedium gelten, so wird die Schallwelle auf verschiedene Weisen beeinflusst. Die Welle wird zu einem gewissen Teil

- von dem Hindernis reflektiert, wenn das Objekt eine ebene Oberfläche besitzt und groß in Relation zu der Wellenlänge ist.
- diffus gestreut, wenn das Hindernis klein gegenüber der Wellenlänge ist und/oder eine unebene Oberflächenstruktur aufweist.
- in den vom Hindernis abgeschatteten Bereich gebeugt.
- durch das Objekt transmittiert, wobei ein Teil der Energie im Hindernis in Wärmeenergie umgesetzt wird. Zudem wird die Welle gebrochen, wenn die Schallgeschwindigkeit beider Medien unterschiedlich ist.

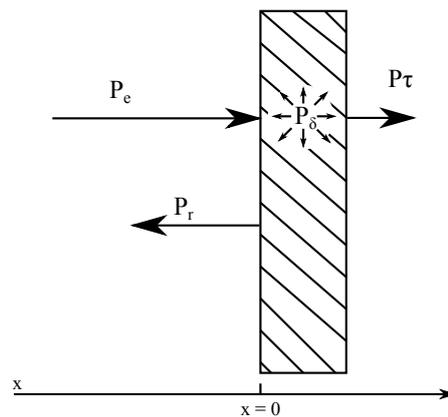


Abbildung 3.2: Leistungsmäßige Betrachtung der Reflexion einer Schallwelle an einer unendlich ausgedehnten, glatten Wand.

Abbildung 3.2 zeigt das Verhalten der Leistung einer auf eine unendlich ausgedehnte, ebene Grenzfläche auftreffenden Schallwelle. Für den Zusammenhang zwischen der dissipierten Leistung P_δ und den Leistungen der einfallenden Welle (P_e), der reflektierten Welle (P_r) und der transmittierten Welle (P_τ) gilt:

$$P_e = P_r + P_\delta + P_\tau. \quad (3.2.1)$$

Über das Verhältnis

$$\frac{P_r}{P_e} + \frac{P_\delta}{P_e} + \frac{P_\tau}{P_e} = 1 \quad (3.2.2)$$

folgen über

$$\rho + \delta + \tau = 1 \quad (3.2.3)$$

die das Verhältnis zwischen der weiter geleiteten und der einfallenden Leistung angegebenden Größen als Reflexionsgrad (mit r als komplexen Reflexionsfaktor)

$$\rho = \frac{P_r}{P_e} = |r|^2, \quad (3.2.4)$$

Dissipationsgrad

$$\delta = \frac{P_\delta}{P_e}, \quad (3.2.5)$$

Transmissionsgrad,

$$\tau = \frac{P_\tau}{P_e} \quad (3.2.6)$$

und Absorptionsgrad

$$\alpha = \frac{P_a}{P_e} = \frac{P_\delta + P_\tau}{P_e} = \delta + \tau = 1 - \rho = 1 - |r|^2. \quad (3.2.7)$$

Während der Reflexionsgrad das Verhältnis der an der Grenzfläche reflektierten Leistung angibt, beschreibt der komplexe Reflexionsfaktor r das Verhältnis zwischen den Schalldrücken der einfallenden und der reflektierten Welle auf der Oberfläche:

$$r = \frac{p_r}{p_e} \Big|_{\text{Wand}}. \quad (3.2.8)$$

Die Relation von Schalldruck zu Schallschnelle an dem selben Ort wird als Wandimpedanz Z_W bezeichnet und beschreibt das akustische Verhalten der Wand:

$$Z_W = \frac{p}{v} \Big|_{\text{Wand}}. \quad (3.2.9)$$

Es besteht folgender Zusammenhang zwischen Wandimpedanz und Reflexionsfaktor:

$$Z_W = Z_0 \frac{1+r}{1-r} \leftrightarrow r = \frac{Z_W - Z_0}{Z_W + Z_0}. \quad (3.2.10)$$

Mit Hilfe des Reflexionsfaktors und dem aus 3.1.45 bekannten Zusammenhang lässt sich der Schalldruck vor der Wandfläche bei $x = 0$ (vgl.:3.2) angeben:

$$p = p_e \left(e^{-jkx} + r e^{jkx} \right). \quad (3.2.11)$$

Analog folgt aus 3.1.46

$$v = \frac{v_e}{Z_0} \left(e^{-jkx} + r e^{jkx} \right). \quad (3.2.12)$$

Für die Ausbreitung in (teilweise) abgeschlossenen Räumen sind vor allem zwei Sonderfälle der Reflexion wichtig. Die schallharte und die schallweiche Wand haben beide Totalreflexion der Welle an der betreffenden Grenzschicht zur Folge.

Die Wandimpedanz eines schallharten Objekts beträgt $Z_W = \infty$, so dass der Reflexionsfaktor sich mit 3.2.10 zu $r = 1$ ergibt. Für den Schalldruck vor der schallharten Wand folgt:

$$p(x) = p_e \left(e^{-jkx} + e^{jkx} \right) = 2p_e \cos kx. \quad (3.2.13)$$

Analog ergibt sich die Schallschnelle vor der schallharten Wand zu:

$$v(x) = \frac{p_e}{Z_0} \left(e^{-jkx} - e^{jkx} \right) = -j \frac{2p_e}{Z_0} \sin kx. \quad (3.2.14)$$

Betrachtet man die Verhältnisse auf der Wandoberfläche bei $x = 0$ erkennt man, dass sich der Schalldruck verdoppelt ($p(0) = 2p_e$) und die Schallschnelle mit $v(0) = 0$ zu Null wird.

Für eine schallweiche Wand beträgt die Wandimpedanz $Z_W = 0$. Daraus resultieren ein Reflexionsfaktor von $r = -1$, vor der Wand ein Schalldruckverlauf gemäß

$$p(x) = -j2p_e \sin kx \quad (3.2.15)$$

und eine Schallschnelle nach

$$v(x) = \frac{2p_e}{Z_0} \cos kx. \quad (3.2.16)$$

Direkt auf der Grenzfläche ist im schallweichen Fall der Schalldruck gleich null ($p(0) = 0$) und die Schallschnelle verdoppelt sich ($v(0) = 2p_e Z_0^{-1} = 2v_e$). Damit verhalten sich für schallharte und schallweiche Wände Schallschnelle und Schalldruck genau gegensätzlich, auch wenn in beiden Fällen Totalreflexion der Schallwelle vorliegt.

Ergibt sich die Wandimpedanz Z_W eines Objektes im Freiraum gleich der Schallkennimpedanz Z_0 , so spricht man von Impedanzanpassung. Der Reflexionsfaktor ergibt sich damit zu $r = 0$ und es findet keine Reflexion der Welle statt.

Wird eine Schallwelle an einer Grenzfläche deren Reflexionsfaktor $r = 1$ oder $r =$

-1 beträgt bei senkrechtem Einfall reflektiert, bildet sich eine stehende Welle aus. Betrachtet man zunächst ein dünnes, an beiden Enden schallhart abgeschlossenes Rohr, so bilden sich lediglich für feste, von der Abmessung des Rohres abhängige Frequenzen stehende Wellen aus, da der Schalldruck auf den Abschlüssen maximal wird (s. Gleichung 3.2.13). Für das Verhältnis zwischen Länge des Rohres L und Wellenlänge λ gilt demnach:

$$L = n \frac{\lambda}{2} \quad (3.2.17)$$

die betragsmäßigen Schalldruckmaxima der Welle entstehen an den Orten

$$x_{max}, n = \frac{n}{2} \lambda \quad (3.2.18)$$

wobei $n \in \mathbb{N}_0$ gilt und x die Entfernung von einem Abschluss zum anderen angibt. Die Position der Minimal ergibt sich analog zu

$$x_{min}, n = \frac{2n+1}{4} \lambda. \quad (3.2.19)$$

Aus Formel 3.2.17 folgen direkt diejenigen Frequenzen, für welche Wellen in dem Rohr ausbreitungsfähig sind, die sogenannten Eigenfrequenzen:

$$f_n = n \frac{c}{2L}. \quad (3.2.20)$$

Zusammen mit der direkt hieraus folgenden Kreiswellenzahl

$$k_n = \frac{2\pi f_n}{c} \quad (3.2.21)$$

und der zugehörigen Kreisfrequenz

$$\omega_n = 2\pi f_n \quad (3.2.22)$$

ergibt sich über Gleichung 3.2.13 die Schalldruckverteilung im Rohr, die sogenannte Mode zu

$$p(x, t) = p_0 \cos\left(\frac{n\pi x}{L} \exp(j\omega_n t)\right). \quad (3.2.23)$$

Diese Gleichung lässt sich für rechteckige Räume (Länge: L_x , Breite: L_y , Höhe: L_z) mit schallharten Wänden erweitern. Die Eigenfrequenzen des Rechteckraums ergeben sich damit zu:

$$f_{lmn} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{l}{L_x}\right)^2 + \left(\frac{m}{L_y}\right)^2 + \left(\frac{n}{L_z}\right)^2} \quad (3.2.24)$$

Wobei $l \in \mathbb{N}_0$, $m \in \mathbb{N}_0$ und $n \in \mathbb{N}_0$ die Ordnung der Mode in x-, y-, und z-Richtung angeben. Die dazugehörige Schalldruckverteilung im Raum lässt sich über:

$$p_{lmn}(x,y,z,t) = p_0 \cos\left(\frac{l\pi x}{L_x}\right) \cos\left(\frac{m\pi y}{L_y}\right) \cos\left(\frac{n\pi z}{L_z}\right) e^{j\omega_{lmn}t} \quad (3.2.25)$$

bestimmen. Eine solche Schalldruckverteilung wird auch als Raummode benannt. Für $l = 0$, $m = 1$ und $n = 2$ wäre dies zum Beispiel eine 0 1 2 Mode.

In Abbildung 3.3 werden die ersten acht Raummoden in einem Rechteckraum skizziert. Dabei sollen zur besseren Veranschaulichung nur Moden betrachtet werden, deren z-Komponente 0 ist. Die Maximal- bzw. Minimalwerte des Schalldrucks werden mit + bzw. - angegeben werden. Das menschliche Ohr reagiert, wie in Kapitel 2.1 beschrieben, auf den Schalldruckpegel. Daher werden sowohl Maxima als auch Minima als "laut" wahrgenommen.

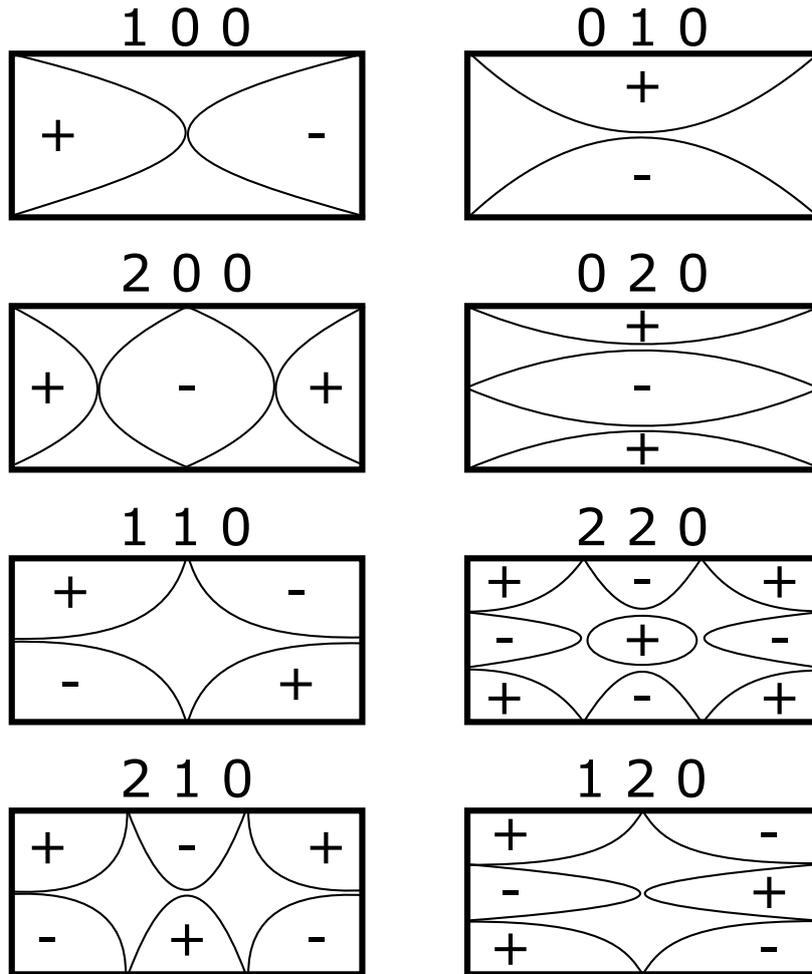


Abbildung 3.3: Skizzierte Schalldruckverteilung verschiedener Raummoden in der Ebene $z=0$ im Rechteckraum. Die maximalen Werte des Schalldrucks sind mit + bzw. - angegeben.

In der realen Messsituation sind die Berandungen der Räume nicht komplett als schallhart anzusehen. Wie weiter oben beschrieben, werden Teile der Schalleistung durch die Wand transmittiert, während andere von der Wand aufgenommen werden. Die Dissipation erfolgt lediglich in der Grenzschicht zwischen Wand und Ausbreitungsmedium. Die Dicke einer theoretischen Grenzschicht, in welcher die auftreffende Schallwelle komplett von der Wand dissipiert würde, lässt sich näherungsweise über

$$\delta_d = \sqrt{\frac{2\eta}{\omega\rho_0}} \quad (3.2.26)$$

bestimmen. Hierbei gibt η die Viskosität des Wandmaterials an. Die Viskosität von festen Materialien ist gegenüber der Luft sehr groß, so dass die Schalldissipation einer einzelnen Grenzschicht de facto zu vernachlässigen ist. Zu erkennen ist hier bereits die Abhängigkeit von der Frequenz der Schallwelle. Je kleiner diese wird, desto größer

wäre die benötigte Schichtdicke.

Die Transmission durch die Wand wird in der Praxis über das Schalldämmmaß angegeben, welches sich Logarithmisch aus dem Transmissionsfaktor (s. 3.2.6) zu

$$R = 10 \lg \frac{1}{\tau} \text{dB} = -10 \lg \frac{P_\tau}{P_e} \text{dB} \quad (3.2.27)$$

ergibt. Bei einfachen Wänden kann die Dissipation in der Regel vernachlässigt werden so dass sich aus dem Absorptionsgrad (3.2.7) und der Wandimpedanz (3.2.10) der Transmissionsgrad zu

$$\tau = \alpha = 1 - \left| \frac{Z_W - Z_0}{Z_W + Z_0} \right|^2 \quad (3.2.28)$$

vereinfacht werden kann. Über das Newton'sche Bewegungsgesetz, die flächenbezogene Masse (m'' in $\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$) der Wand und die Schallkennimpedanz Z_0 des Raumes hinter der Wand kann die Wandimpedanz

$$Z_W = i\omega m'' + Z_0 \quad (3.2.29)$$

aufgestellt werden. Damit folgt für den Transmissionsgrad:

$$\tau = \frac{4Z_0^2}{\omega^2 m''^2 + 4Z_0^2} \quad (3.2.30)$$

Aufgrund der in der realen Anwendung relativ zur Luft sehr großen Masse der Wand ($\omega m'' \gg 2Z_0$) lässt sich der Transmissionsgrad zu

$$\tau \approx \left(\frac{2Z_0}{\omega m''} \right)^2 \quad (3.2.31)$$

approximieren. Damit ergibt sich das vereinfachte, approximierte und winkelunabhängige Schalldämmmaß einer Wand im Schallfeld:

$$R \approx 10 \lg \left(\frac{\omega m''}{2Z_0} \right)^2 \text{dB}. \quad (3.2.32)$$

3.3 Durchgeführte Messungen von Raummoden

Der im vorigen Kapitel beschriebene Aufbau von Raummoden im Rechteckraum soll jetzt an einem realen Beispiel überprüft und genauer beleuchtet werden. Hierzu wurden im Raum FC 1.19 am Campus Freudenberg der Bergischen Universität Wuppertal verschiedene Raummoden angeregt und messtechnisch erfasst. Die Anregung erfolgte über einen Tieftonlautsprecher der Firma Infinity der von einem Philips Stereo-Verstärker getrieben wurde. Zur Messung der Schalldruckverläufe standen neun omnidirektionale Elektret-Kondensator Messmikrofone vom Typ Behringer ECM8000 zur Verfügung. Aufnahme und Wiedergabe erfolgten über ein USB Audiointerface der Marke Tascam, welches Signale mit einer Abtastfrequenz von 48 kHz und einer Wortbreite von 24 bit verarbeiten kann. Die Weiterverarbeitung der Daten wurde über computerbasiertes Messsystem realisiert. Die Abmessung des Raumes, Positionen von Messmikrofonen und Lautsprechern können Abbildung 3.4 entnommen werden. Auf der rechten Seite des Raumes befindet sich die Eingangstür, auf der linken ein Fenster. Die Mikrofone befinden sich an neun Positionen im rechten Halbraum auf einer Höhe von ca. 1,2 m. Der anregende Tieftonlautsprecher befand sich je nach Anforderung an den Positionen A, B oder C. Dabei ist zu beachten, dass das Verhältnis von Längs- zu Querseite des Raumes ca. 2:1 beträgt. Aus diesem Grund werden Quermoden in etwa mit der selben Frequenz wie die Längsmoden der um eins höheren Ordnung angeregt. Ebenso sind Raumhöhe und -breite nahezu gleich, was zu gleichzeitiger Anregung von Höhen- und Quermoden führt.

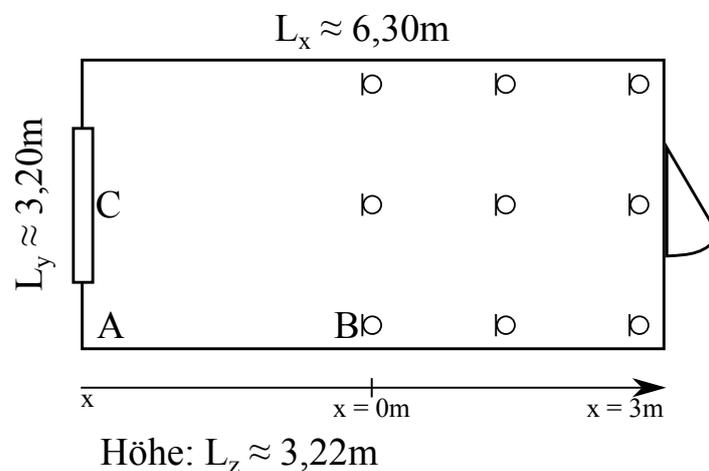


Abbildung 3.4: Abmessungen und Aufbau des für die Messungen zu Raummoden verwendeten Raumes an der Bergischen Universität Wuppertal Raum FC 1.19. Die Mikrofone befinden sich an neun Positionen im rechten Halbraum auf einer Höhe von ca. 1,2 m. A, B und C geben die alternativen Positionen des Lautsprechers an.

3.3. DURCHGEFÜHRTE MESSUNGEN VON RAUMMODEN

Mit der Berechnungsvorschrift aus 3.2.24 ergeben sich die in Tabelle 3.1 zu erkennen- den Zusammenhänge zwischen Raummoden und zugehörigen Frequenzen für den in Abbildung 3.4 beschriebenen Raum.

Frequenz in Hz	l	m	n
26,984	1	0	0
53,1247	0	1	0
52,7947	0	0	1
59,5850	1	1	0
59,2910	1	0	1
74,8967	0	1	1
53,9679	2	0	0
79,6094	1	1	1
106,2494	0	2	0
75,7283	2	1	0
109,622	1	2	0
75,4972	2	0	1
118,6432	0	2	1
92,3150	2	1	1
121,6731	1	2	1

Tabelle 3.1: Tabelle der Frequenzen welche die ersten 15 Raummoden mit einer maximalen Ordnung von 2 in Raum FC 1.19 anregen.

Betrachtet man die möglichen Moden in einem Rechteckraum (Abb. 3.3) so fällt auf, dass mit neun Mikrofonen lediglich Moden erster Ordnung sinnvoll erfasst werden können. Aus diesem Grund wurden für die vorliegenden Messungen die Mikrofone im rechten Halbraum verteilt (vgl. 3.4). Unter Ausnutzung der Symmetrie des Raumes kann so vom Halbraum auf die Modenausbildung im ganzen Raum geschlossen werden. Somit lassen sich Moden zweiter Ordnung aufzeichnen. Für alle höheren Ordnungen wären weitere Mikrofone nötig, so dass auf deren Betrachtung im Rahmen dieser Arbeit verzichtet werden musste.

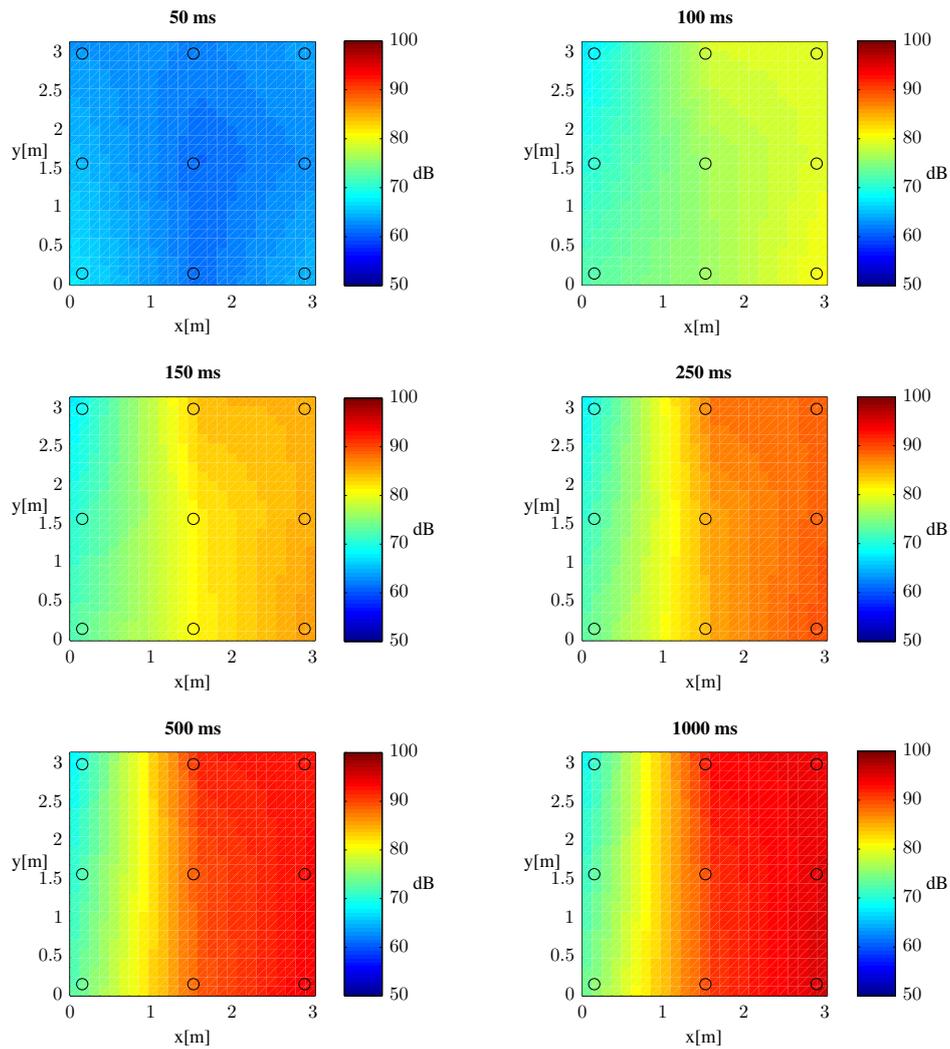


Abbildung 3.5: Zeitlicher Aufbau der 1 0 0 Raummode in Raum 1.19. Die Anregung erfolgte über Lautsprecherposition C (Vgl. Abb. 3.4 bzgl. Raumgeometrie und Mikrofonpositionen).

Abbildung 3.5 zeigt den zeitlichen Aufbau der 1 0 0 Mode. Gegeben ist die Interpolation des mittleren Schalldruckverlaufes im rechten Halbraum zu verschiedenen Zeitpunkten. Die Anregung der Mode erfolgte von Position C aus, von der Mitte der hinteren Wand. Während nach 50 ms noch keine nennenswerte Abweichung vom mittleren Schalldruckpegel des Raumes zu erkennen ist, kann nach 100 ms bereits eine rudimentäre Ausbildung der Mode beobachtet werden. Nach 150 ms hat sich dieser Schalldruckunterschied zwischen Maximum und Minimum des Schalldruckpegels von 8,9 dB auf 14,2 dB erhöht. Die Mode konsolidiert sich weiter bis sie sich nach

3.3. DURCHGEFÜHRTE MESSUNGEN VON RAUMMODEN

ca. 900 ms in einem eingeschwungenen Zustand mit einer Pegeldifferenz von 23,2 dB befindet.

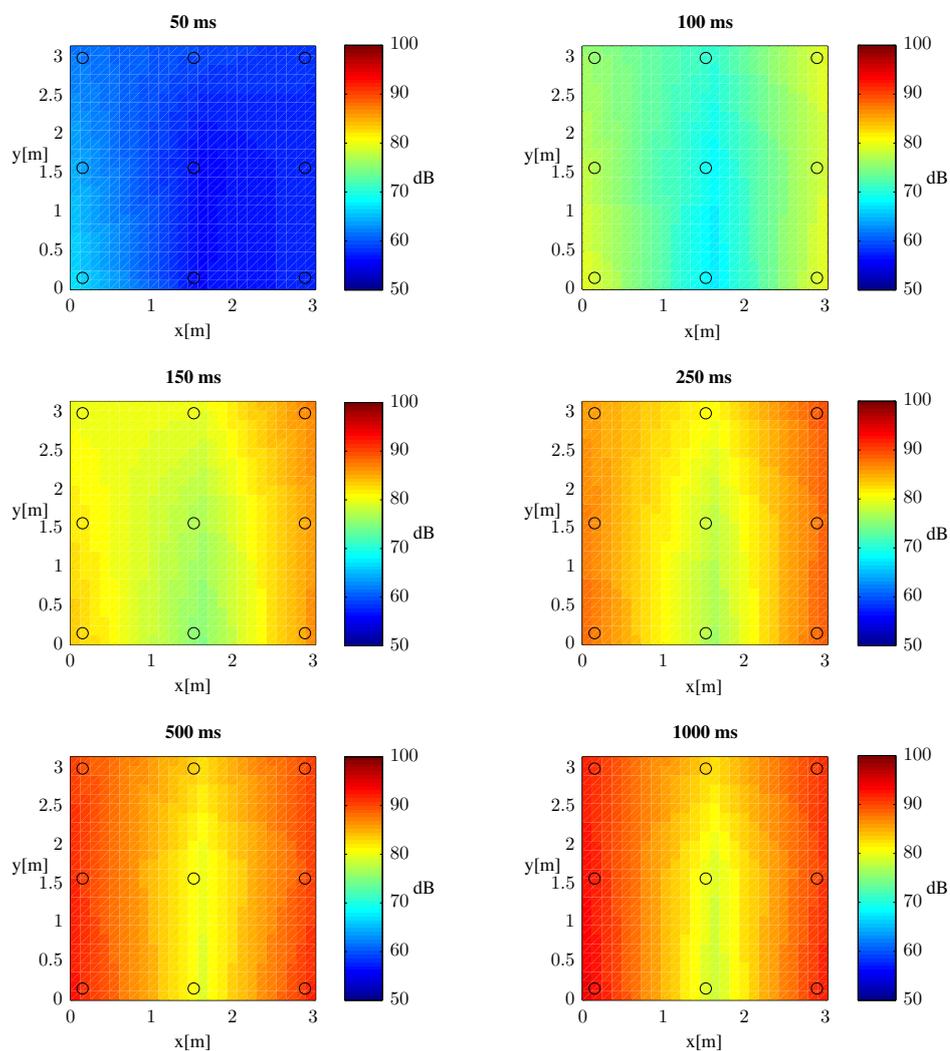


Abbildung 3.6: Zeitlicher Aufbau der 2 0 0 Raummode in Raum 1.19. Die Anregung erfolgte über Lautsprecherposition C (Vgl. Abb. 3.4 bzgl. Raumgeometrie und Mikrofonpositionen).

Der in Abbildung 3.6 beschriebene zeitliche Aufbau der 2 0 0 Mode geschieht entsprechend zu dem der 1 0 0 Mode. Während bei ersterer allerdings nach 100 ms lediglich ein Pegelunterschied von 8,9 dB zwischen Schalldruckknoten und -maximum herrscht ist hier die Mode bereits deutlicher mit einem Schalldruckpegelunterschied von 14,5 dB ausgeprägt. Im eingeschwungenen Zustand nach ca. 900 ms hat sich die

se Auffälligkeit umgedreht und bei einem Pegelunterschied von 16,4 dB ist die 2 0 0 Mode um 6,7 dB schwächer ausgeprägt als die 1 0 0 Mode.

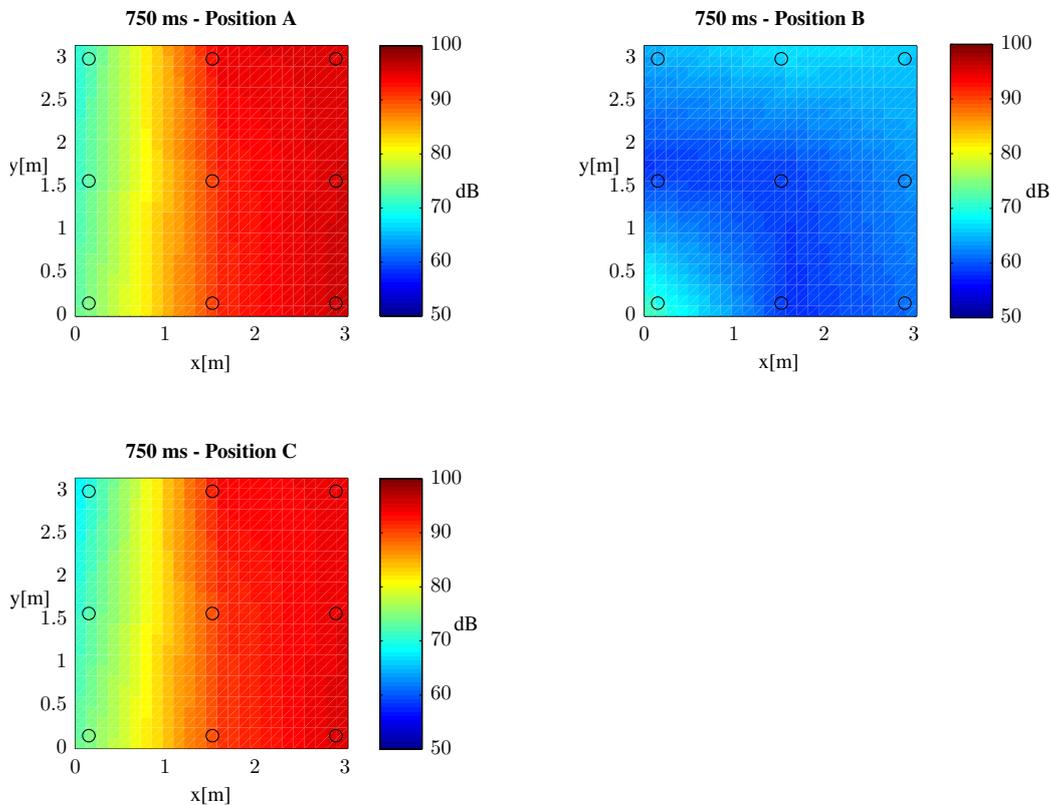


Abbildung 3.7: Schalldruckpegel der 1 0 0 Raummode in Raum 1.19 bei 750 ms. Die Anregung erfolgte aus den Positionen A, B bzw. C (Vgl. Abb. 3.4 bzgl. Raumgeometrie und Mikrofonpositionen).

Betrachtet man den Aufbau der Raummoden in Abhängigkeit von dem Anregungsort, so fällt sofort auf, dass sich eine Raummode nicht aus dem Knoten der Welle heraus anregen lässt. Abbildung 3.7 zeigt die 1 0 0 Mode für drei verschiedene Anregungsorte. Die linke Grafik zeigt die von Position A (vgl. 3.4) in der Ecke des Raumes angeregte Mode, die mittlere von der Mitte der linken Wand (Position B) angeregte und die rechte Grafik wurde mit dem Tieftonlautsprecher in der Mitte der hinteren Wand (Position C) erzeugt. Alle drei Grafiken geben den Schalldruckverlauf nach 750ms an, so dass die Mode noch nicht vollständig eingeschungen ist, sich das Verhalten aber schon deutlich abzeichnet. Während für die Position B wie erwartet keine Mode entsteht, bildet sich für die beiden anderen Anregungsorte die Raummode mit einem Schalldruckpegel von über 95 dB in der Mitte des Maximums deutlich aus. Die An-

3.3. DURCHGEFÜHRTE MESSUNGEN VON RAUMMODEN

regung aus der Ecke führt zu einer leicht stärkeren Ausprägung der Mode, was sich dadurch erklären lässt, dass sich der Schalldruckpegel des anregenden Lautsprechers durch die Position in der Ecke des Raumes im Gegensatz zu der anderen Position um 3 dB erhöht.

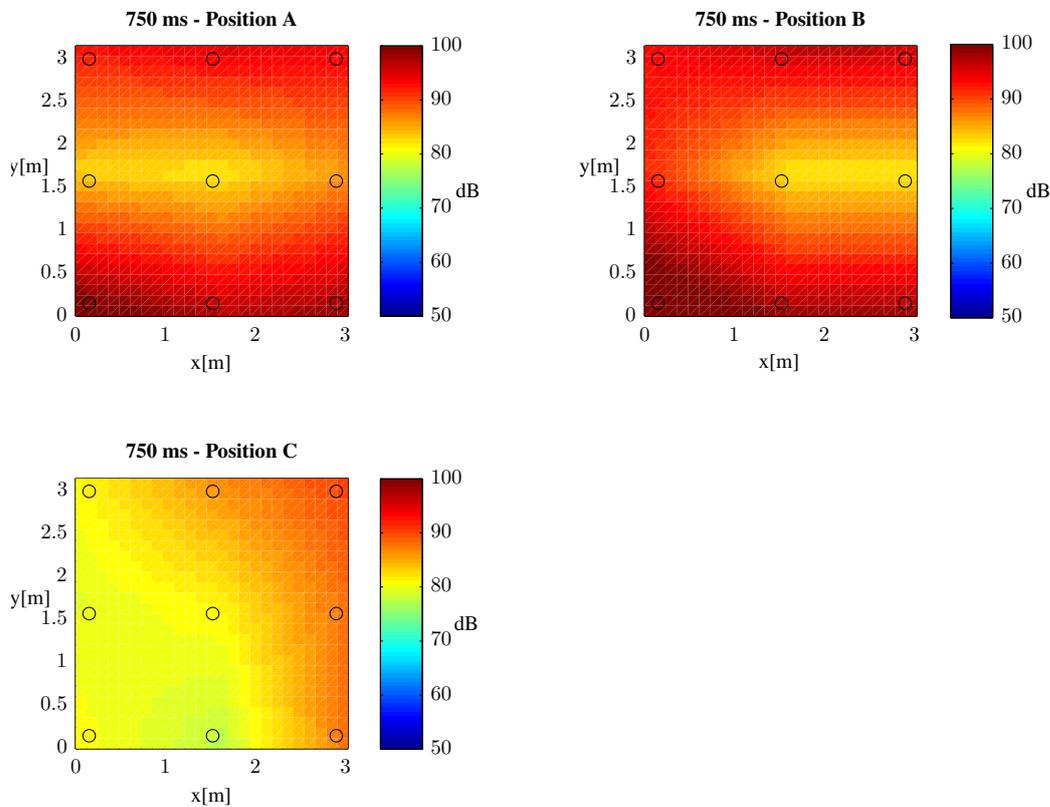


Abbildung 3.8: Schalldruckpegel der 0 1 0 Raummode in Raum 1.19 bei 750 ms. Die Anregung erfolgte aus den Positionen A, B bzw. C (Vgl. Abb. 3.4 bzgl. Raumgeometrie und Mikrofonpositionen).

Führt man dieselbe Betrachtung für die 0 1 0 Mode durch, ergeben sich neben auffälligen Unterschieden ebenso Gemeinsamkeiten, wie Abbildung 3.8 zu entnehmen ist. Die Anregung aus der Mitte des Knotens führt erwartungsgemäß zu der deutlichsten Ausbildung der Raummode mit einem Pegelunterschied zwischen Knoten und Wellenbauch von 15,2 dB. Die starke Schalldruckerhöhung in der Raummitte lässt sich durch die räumliche Nähe zwischen Quelle und Mikrofon erklären und muss für die Betrachtung an dieser Stelle ignoriert werden. Auch die Lautsprecherposition in der Raumecke führt zu einer deutlichen Modenausprägung, welche nur um 3,1 dB schwächer ausfällt als im vorigen Fall. Wird die 0 1 0 Mode allerdings aus dem Knoten

angeregt, ergibt sich eine wichtige Besonderheit: Es erfolgt wie im vorigen Fall keine Ausprägung der Mode. Jedoch wird die 1 0 0 Mode mit einer Pegeldifferenz von immerhin 6,3 dB zwischen Schalldruckmaximum und -minimum erzeugt. Für die erste Mischmode ergibt sich, wie in Abbildung 3.9 zu erkennen ist, das gleiche Verhalten.

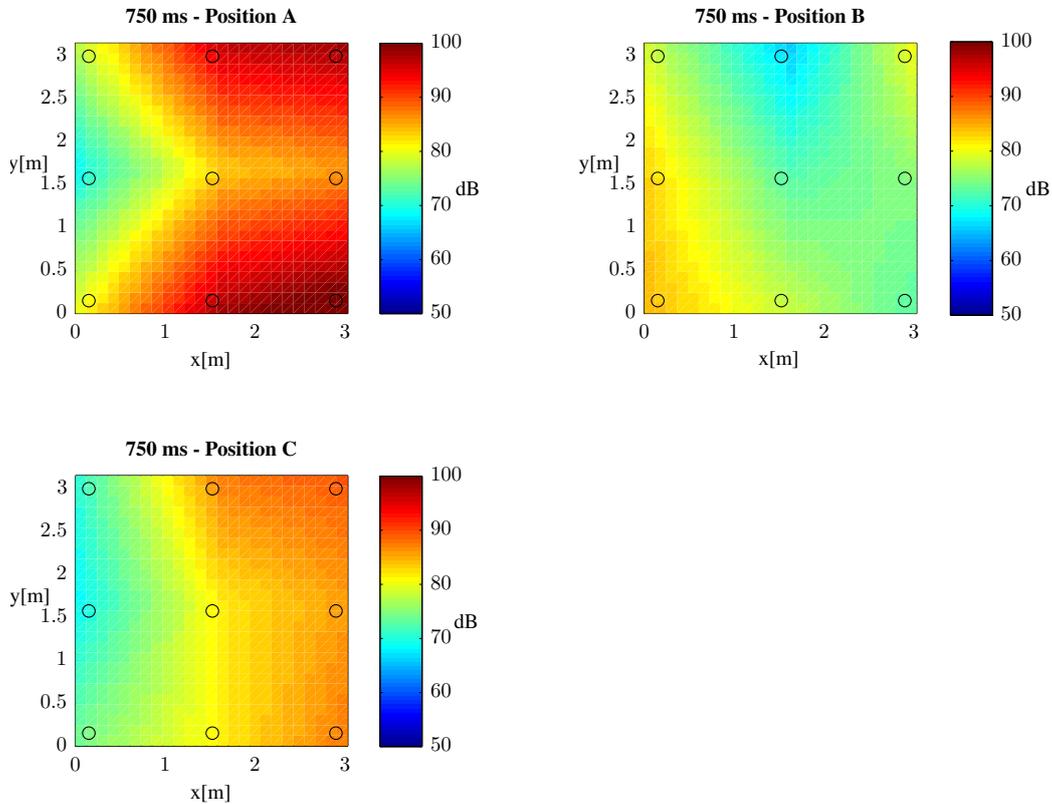


Abbildung 3.9: Schalldruckpegel der 1 1 0 Raummode in Raum 1.19 bei 750 ms. Die Anregung erfolgte aus den Positionen A, B bzw. C (Vgl. Abb. 3.4 bzgl. Raumgeometrie und Mikrofonpositionen).

Die 1 1 0 Mode prägt sich im betrachteten Raum mit einer Pegeldifferenz von 33,7 dB bei 750 ms und Anregung aus dem sich in der Raumecke befindenden Schalldruckmaximum bei Position A deutlicher aus als alle bisher betrachteten Moden. Während die Anregung aus dem Knoten an der Längswand (Pos. C) zu keinerlei Modenbildung führt, bildet sich auch hier die 1 0 0 Mode mit einem Pegelunterschied zwischen Knoten und Bauch von ca. 20 dB stark aus.

3.4 Active Noise Control

Soll ein Raum von unerwünschtem Schall abgeschirmt werden, so ergeben sich schnell Schwierigkeiten, wenn dieses Ziel mittels baulicher Maßnahmen erfolgen soll. Sowohl die Absorption durch Hindernisse (3.2.26), als auch die Reflexion an ihnen (3.2.32) fällt für Schallwellen umso stärker aus je größer Masse und Steifigkeit des verwendeten Materials sind. Dessen Dämmfähigkeit nimmt wie oben beschrieben mit sinkender Schallfrequenz deutlich ab. Um einen Raum erfolgreich auch vor der Einwirkung tieffrequenter Schallereignissen zu bewahren, müssten die Wände derart massiv ausgeführt werden, dass schnell bautechnische Grenzen erreicht werden. Eine Lösung dieses Problems wird über die Verwendung poröser Absorbermaterialien erreicht. Wie in 3.2.26 zu erkennen wird eine gewisse Grenzsichtdicke benötigt um die eintreffende Schalleistung komplett in der Wand zu absorbieren. Dies kann am besten erreicht werden, wenn nicht eine einzige Grenzsicht zum Einsatz kommt, sondern die Wirkung vieler kleiner Grenzsichten kombiniert wird. Ein solches poröses, von Luftein-schlüssen durchsetztes, Material ist jedoch in der Regel nicht sehr stabil, nimmt ein immer noch relativ großes Volumen ein und ist somit in der praktischen Anwendung sehr eingeschränkt nutzbar.

Ein anderer Lösungsansatz besteht in der Verwendung aktiver elektroakustischer Maßnahmen. Im Jahre 1933 patentierte Paul Lueg [Lue37] eine Methode zur aktiven Lärminderung mittels eines Gegenschalls, welcher um 180° phasenverschoben zu dem Störschall abgespielt wird. Damit führte er ein Phänomen, das bereits von Leonardo da Vinci beschrieben wurde ([Sch06]), zum ersten Mal technisch aus.

3.4.1 Grundlagen ANC

Active Noise Control, die aktive Lärmkontrolle wird oft auch mit Active Noise Cancellation, aktiver Schallauslöschung, bezeichnet. Betrachtet man im Folgenden die Wirkungsweise eines solchen ANC Systems, so wird klar, dass eine vollständige Auslöschung eines unerwünschten Schalls nur sehr eingeschränkt erfolgen kann. Aus diesem Grund werden ANC Systeme in der Regel darauf beschränkt, das Schallfeld soweit zu ändern, dass die Auslöschung des Störschalls, bzw. dessen deutliche Minderung zumindest an wichtigen Punkten erfolgt. [Han01]

Betrachtet man einen idealen Lautsprecher im Freifeld, welcher ein harmonisches Signal abstrahlt, so kann man dessen Schallfeld im Fernfeld auslöschen, indem man einen zweiten identischen Lautsprecher direkt neben dem ersten positioniert und ein Signal abstrahlt, dessen Phase um 180° zu dem ursprünglichen Signal verschoben ist. Dies führt dazu dass beide Lautsprecher dem jeweils anderen entgegenwirken und sich kein Schalldruck nach Außen verbreiten kann. Lediglich zwischen den beiden

Lautsprechern bildet sich ein Schallfeld aus. Sobald jedoch das zweite Signal keine phasenverschobene Reproduktion des ersten darstellt, zum Beispiel da die Lautsprecher fertigungsbedingt nicht komplett identisch sind, wird das Schalldruckfeld nicht mehr vollständig ausgelöscht. In der Realität kann nicht davon ausgegangen werden ein hundertprozentig gegengleiches Signal zu erzeugen. Auch fällt es oft schwer, den Schall direkt an der Quelle auszulöschen, manchmal ist diese schwer zu lokalisieren. Dann muss das entsprechende Gegensignal von einem adaptiven System so berechnet werden, dass die Auslöschung des ursprünglichen Signals zumindest in einem gewissen Bereich erfolgen kann. Diese Methode funktioniert am besten, wenn das Gebiet in welchem die Auslöschung erfolgen soll, räumlich stark beschränkt ist. Ein Beispiel hierfür sind Kopfhörer mit ANC System, welche erstmals 1955 in [Sim55] beschrieben wurden. In dem sehr kleinen Bereich der Kopfhörerkapsel funktioniert die aktive Lärmauslöschung sehr gut und wird vor allem in Luftfahrzeugen seit vielen Jahren verwendet. Auf gleiche Weise wird schon seit Langem der Lärm von Lüftungs- und Heizungssystemen und der dort durch Luftverwirbelungen entstehende Schall bekämpft ([KM96]). Neben den begrenzten räumlichen Abmessungen zeichnet sich das Schallfeld in diesen Anwendungen durch näherungsweise Periodizität aus, was eine Auslöschung weiter erleichtert.

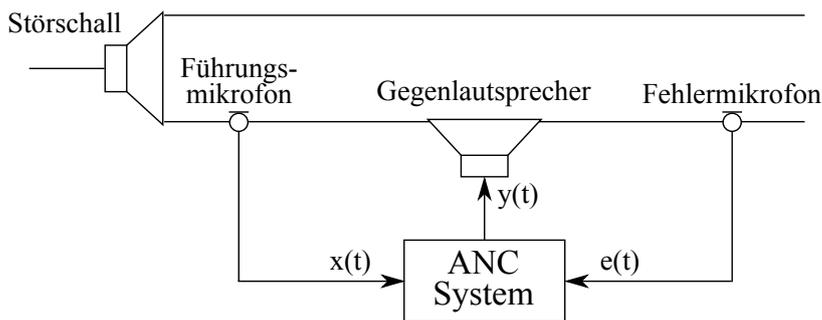


Abbildung 3.10: Schematischer Aufbau des Feedforward ANC Systems.

Abbildung 3.10 zeigt schematisch einen ANC Aufbau in einem schmalen Rohr. Hier ist die Wellenausbreitung auf eine Richtung beschränkt und die räumlichen Gegebenheiten sind klar abgesteckt. Ziel dieser Anordnung ist es, den Schall hinter dem Gegenlautsprecher zu minimieren. Das Führungsmikrofon nimmt das Störsignal am Anfang des Rohres auf und führt es dem Gegenlautsprecher zu. Das Ergebnis der Auslöschung wird am Fehlermikrofon aufgezeichnet und von dem adaptiven Algorithmus zur Optimierung des Dämpfungsergebnisses genutzt. Ein solches System wird als Feedforward ANC System bezeichnet, da das Führungssignal ($x(t)$) räumlich gesehen von vorne aufgenommen wird.

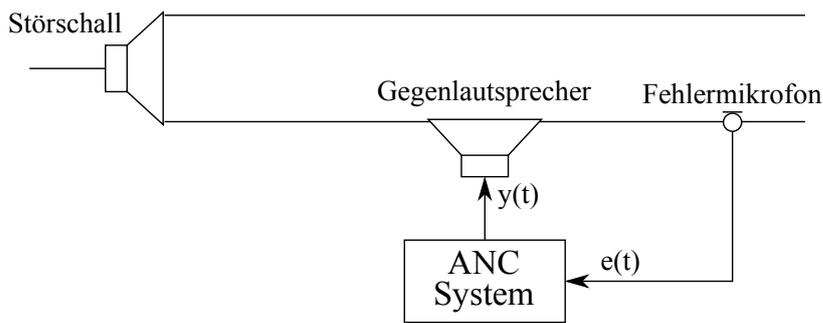


Abbildung 3.11: Schematischer Aufbau des Feedback ANC Systems.

Abbildung 3.11 zeigt eine Abwandlung des obigen Systems. Hier existiert kein Referenzmikrofon. Das Signal $x(t)$ muss daher aus dem Fehlersignal gewonnen werden. Das führt dazu, dass ein solches System lediglich Signale auslöschen kann, die auch von dem System prognostiziert werden können.

3.4.2 LMS Algorithmus

Der am häufigsten verwendete Algorithmus zur Bestimmung des gegenphasigen Lautsprecher Signals ist der sogenannte LMS Algorithmus. Nach der Methode der kleinsten Fehlerquadrate (Least Mean Squares) nähert dieser das Ausgangssignal so an dessen Optimum an, dass ein gegebenes Fehlersignal zu Null wird.

Abbildung 3.12 zeigt den Signalflussgraphen der grundlegenden Version des LMS Algorithmus. Hierbei bezeichnet x das Eingangssignal des Algorithmus, welches durch das adaptive Filter W mit den Filterkoeffizienten \mathbf{w} so eingestellt werden soll, dass das Fehlersignal e , die Differenz zwischen einem zweiten Signal d und dem Ausgang des Filters y , zu Null wird.

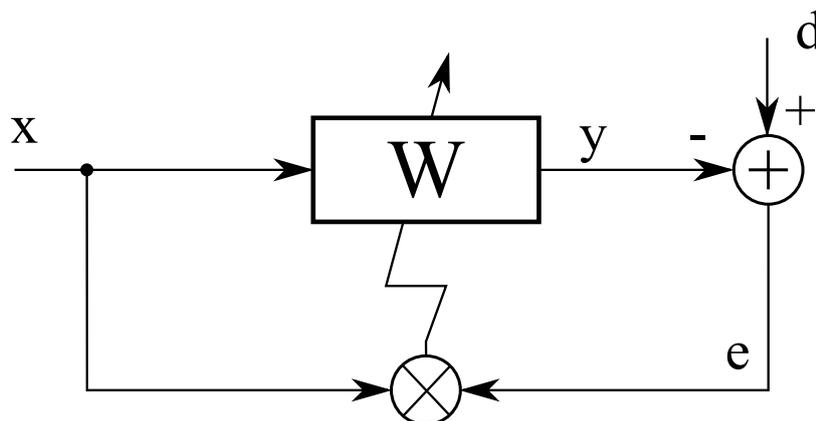


Abbildung 3.12: Signalflussgraph des grundlegenden LMS Algorithmus.

Eine geringe Änderung der Filterkoeffizienten \mathbf{w} um den Faktor μ hat die folgende

Auswirkung auf die Filterkoeffizienten des nächsten Zeitschrittes:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \mu \frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{w}}(n). \quad (3.4.1)$$

Laut [Ell01] ist die dreidimensionale Fehlerfläche über die Koeffizienten eines FIR Filters quadratischer Form. Daher folgt aus einer kleinen Änderung der Koeffizienten in negative Richtung des lokalen Fehlergradienten eine Annäherung an das globale Minimum des mittleren quadratischen Fehlers. Daraus folgt, dass für die Änderung des mittleren quadratischen Fehlers in Abhängigkeit von der Änderung der Koeffizienten $\left(\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{w}}\right)$

$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{w}} = 2E[\mathbf{x}(n)\mathbf{x}^T(n)\mathbf{w} - \mathbf{x}(n)d(n)] \quad (3.4.2)$$

gilt. Wie in Abbildung 3.12 zu erkennen ist, ergibt sich für den Fehler des LMS Algorithmus zum Zeitpunkt n :

$$e(n) = d(n) - \mathbf{x}^T(n)\mathbf{w}. \quad (3.4.3)$$

Daraus ergibt sich der Gradientenvektor wie folgt:

$$\frac{\partial E[e^2(n)]}{\partial \mathbf{w}} = -2E[\mathbf{x}(n)e(n)]. \quad (3.4.4)$$

Eine Berechnung des echten Erwartungswertes würde die Verwendung von Daten aus einem großen Zeitintervall zur Mittelung nötig machen. Dies ist für die schnelle Berechnung innerhalb eines zeitsensitiven Algorithmus nicht praktikabel. Aus diesem Grund lässt sich der Gradient, wie 1960 von Widrow und Hoff vorgeschlagen und hier in der Form von [Ell01] dargestellt, zu einem festen Zeitpunkt im Algorithmus über

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{w}} = -2\mathbf{x}(n)e(n) \quad (3.4.5)$$

abschätzen (stochastischer Gradient). Die Multiplikation von Eingangs- und Fehlersignal kann somit als Bildung der geschätzten Kreuzkorrelation beider Signale gesehen werden. Die Berechnungsvorschrift für die Filterkoeffizienten des nächsten Zeitschrittes innerhalb des LMS Algorithmus lautet somit:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \lambda \mathbf{x}(n)e(n) \quad (3.4.6)$$

wobei $\lambda = -2\mu$ gilt.

Der LMS Algorithmus ergibt sich nach [HW03] und [Ell01] somit zu

$$\begin{aligned}y[n] &= \mathbf{w}[n]\mathbf{x}[n] \\e[n] &= d[n] - y[n] \\ \mathbf{w}[n+1] &= \mathbf{w}[n] + \mu e[n]\mathbf{x}[n] \\x[n] &= x[n+1].\end{aligned}\tag{3.4.7}$$

Im ersten Schritt wird das neue Ausgangssignal aus der Filterung des Eingangssignals mit den Koeffizienten berechnet. Daraufhin ergibt sich der Fehler des aktuellen Zeitschritts aus der Differenz des erwünschten Signals und dem gerade berechneten Ausgangssignal. Dann werden die Filterkoeffizienten für den nächsten Zeitschritt, wie in Formel 3.4.6 gezeigt, aus den aktuellen Koeffizienten, dem Fehlersignal und dem Eingangssignal berechnet. Zuletzt wird das Eingangssignal aktualisiert und der nächste Durchlauf startet.

Es existieren mehrere Abwandlungen dieses Grundalgorithmus. Eine häufig verwendete Version ist der sogenannte NLMS, der Normalised Least Mean Squares Algorithmus, für den das Eingangssignal mit dessen Leistung normalisiert wird, um den Einfluss der Signalamplitude zu verringern, welcher im regulären LMS Algorithmus häufig zu Instabilität führt. Dies führt zu einem erweiterten Konvergenzkoeffizienten, welcher nach [MH00] die Schrittweite des Algorithmus dynamisch in jedem Zeitschritt einstellt:

$$\lambda[n] = \frac{\lambda}{\mathbb{E}(\mathbf{x}^2[n])}.\tag{3.4.8}$$

Betrachtet man die Darstellung des LMS Algorithmus in Abbildung 3.12 so fällt auf, dass das Fehlersignal $e(n)$ direkt aus dem Filterausgang und dem gewünschten Signal $d(n)$ berechnet wird. In der realen Umsetzung wird, wie in Abbildung 3.13 dargestellt, das Ausgangssignal von einem Lautsprecher durch den Raum zu einem Mikrofon übertragen. Dies entspricht einer Filterung des Signals mit der Übertragungsfunktion des Raumes, welche hier im gestrichelten Bereich mit S bezeichnet wird. Die Bezeichnung S leitet sich davon ab, dass die Übertragungstrecke zwischen Lautsprecher und Mikrofon häufig als *Sekundärpfad* beschrieben wird.

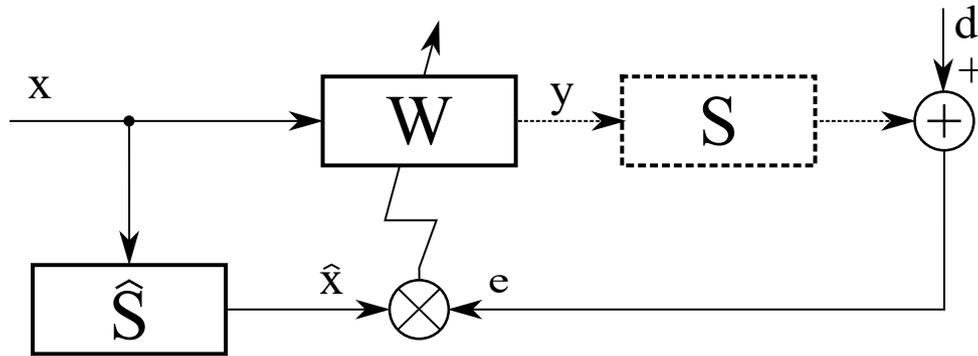


Abbildung 3.13: Signalflussgraph des grundlegenden FXLMS Algorithmus. Der akustische Übertragungspfad zwischen Lautsprecher und Mikrophon ist gestrichelt dargestellt.

Die Raumantwort würde dazu führen dass die geschätzte Kreuzkorrelation zwischen Führungssignal und Fehlersignal (vgl. 3.4.5) nach [Ell01] zu

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{w}} = -2\mathbf{x}(n)(d(n) - \mathbf{s}^T y(n)) \quad (3.4.9)$$

verfälscht wird. Dieses Problem kann, wie von Morgan (1980) und Widrow et al. (1981) vorgeschlagen, umgangen werden, wenn man, wie in Abbildung 3.13 zu sehen, das Führungssignal mit der Übertragungsfunktion des Raumes filtert. Die Antwort des Raumes kann lediglich abgeschätzt werden, so dass sich der neue stochastische Gradient zu

$$\frac{\partial e^2(n)}{\partial \mathbf{w}} = -2\hat{\mathbf{s}}^T \mathbf{x}(n)(d(n) - \mathbf{s}^T y(n)) = -2\hat{\mathbf{x}}(n)e(n) \quad (3.4.10)$$

ergibt. Für die Aktualisierungsvorschrift des FXLMS Algorithmus folgt daraus wie in [Ell01] zu erkennen:

$$\mathbf{w}(n+1) = \mathbf{w}(n) + \lambda \hat{\mathbf{x}}(n)e(n). \quad (3.4.11)$$

3.4.3 Einfaches ANC System

Der oben beschriebene Filterd X Normalised LMS (FXNLMS) Algorithmus wurde verwendet um Raummoden mittels eines einfachen Feedback ANC Systems zu dämpfen. Der Signalflussgraph des verwendeten Systems ist Abbildung 3.14 zu entnehmen. Wie in der Abbildung zu erkennen, wurde der in Abbildung 3.13 Algorithmus um eine zusätzliche Komponente erweitert. Da das Führungssignal identisch mit dem zur Adaption verwendetet Fehlersignal ist, erweist sich der Algorithmus als sehr anfällig für Rückkoppelungseffekte. Aus diesem Grund wird das an den Lautsprecher gesendete Ausgangssignal des Adaptionalgorithmus mit der Raumantwort gefiltert und vom

Fehlersignal abgezogen.

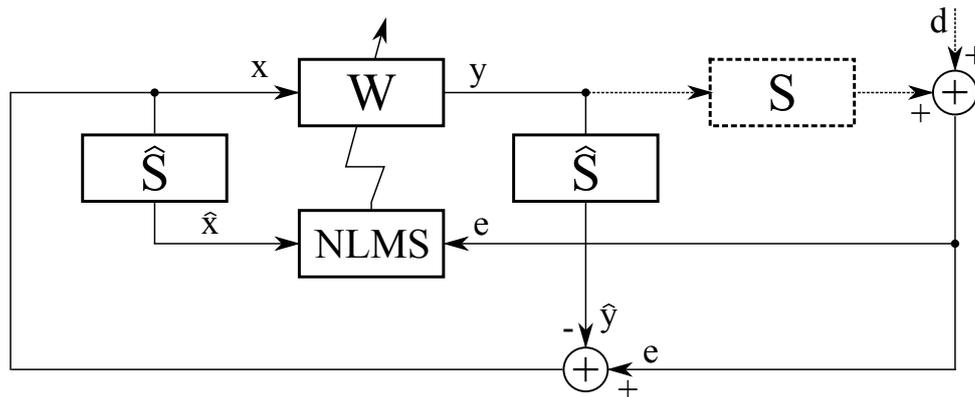


Abbildung 3.14: Signalflussgraph eines einfachen ANC Systems mit FX-NLMS, einem Mikrofon und einem Lautsprecher. Die gestrichelten Komponenten repräsentieren die akustische Ausbreitung.

Das Führungssignal des Algorithmus ergibt sich somit zu:

$$x(n+1) = e(n) - \mathbf{s}^T \mathbf{y}(n). \quad (3.4.1)$$

Zur Evaluation und zum späteren Vergleich mit dem im folgenden Abschnitt vorgeschlagenen neuen Algorithmus wurde das einfache ANC System, wie in Abb. 3.14 als Signalflussgraph beschrieben, umgesetzt. Der eigentliche Algorithmus wurde auf einem Windowsrechner unter MATLAB und der ASIO Treiberschnittstelle des playrec-Plugins implementiert. Das kombinierte Führungs- und Fehlersignal wurde mittels eines AKG Perception 420 Großmembranmikrofons im Omnidirektionalmodus über ein Tascam US-1641 USB Audiointerface aufgenommen. Das selbe Interface diente auch dazu, das Gegensignal über einen Philips Audio Verstärker an den Infinity Tief- tonlautsprecher weiterzugeben.

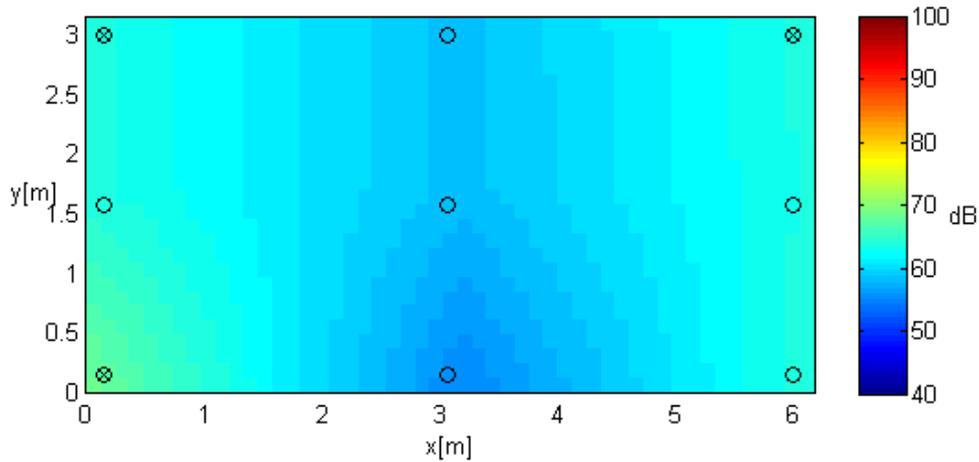


Abbildung 3.15: Schalldruckpegel der 100 Mode bei eingeschaltetem, einfachen ANC System nach ca. 1 s im gesamten Raum 1.19 (vgl. Abb. 3.4 bzgl. der Raumgeometrie). (Die Pegel bei ausgeschaltetem ANC System sind zum Vergleich Abb. 3.5 zu entnehmen.)

3.5 Neues ANC System zur Raummodendämpfung

Wie in den vorigen Abschnitten gezeigt, kann eine einzelne tonale Komponente in einem Störsignal Raummoden anregen und so zu einem dominierenden Faktor in der Lärmbelästigung werden. In [Kaj11] zeigt Kajikawa, dass ein Feedback ANC System erweitert werden kann, um den vorrangig schmalbandigen Lärm eines Magnetresonanztomographen zu dämpfen ohne von breitbandigeren Störgeräuschen beeinträchtigt zu werden. Hierzu erweitert er das klassische Feedback ANC System um ein lineares Prädiktionsfilter, welches die Breitbandstörerschalle ausblendet und so ein um bis zu 10 dB besseres Dämpfungsergebnis als herkömmliche ANC Systeme erzielt. Somit liegt es nahe, das gleiche Prinzip auch in der Bekämpfung von Raummoden anzuwenden, da auch hier der Hauptstörfaktor in einem schmalen Frequenzbereich, meist sogar in tonalen Komponenten, liegt.

3.5.1 Neuer Ansatz für Adaptive Algorithmen

Grundlage des neuen Ansatzes zur Raummodendämpfung ist die lineare Prädiktion, welche in der Signalverarbeitung auch oft als lineare Prädiktionskodierung (Linear Predictive Coding, LPC) bezeichnet wird. Der Signalflussgraph eines linearen Prädiktionsfilters ist im oberen Teil von Abbildung 3.17 zu sehen. Das Filter erzeugt eine Schätzung des Eingangssignals $x(n)$ lediglich anhand vergangener Werte desselben. Somit ist der Ausgang des Filters, das abgeschätzte Signal $\hat{x}(n)$, abhängig von der Korrelation des aktuellen Signals mit einem vergangenen Abschnitt. Daraus folgt, dass die Abschätzung von weißem Rauschen zu $\hat{x}(n) = 0$ führen muss, die Vorhersa-

ge von komplett zufälligen Werten aus vorangegangenen ist selbstverständlich nicht möglich. Optimale Ergebnisse erzielt die lineare Prädiktion für periodische Signale, da hier nach einer Periodenlänge das gesamte Signal bekannt ist.

Dieses Verhalten führt dazu, dass in der linearen Abschätzung von mit Rauschen überlagerten Sinussignalen die tonalen Komponenten verstärkt und die Rauschteile gedämpft werden.

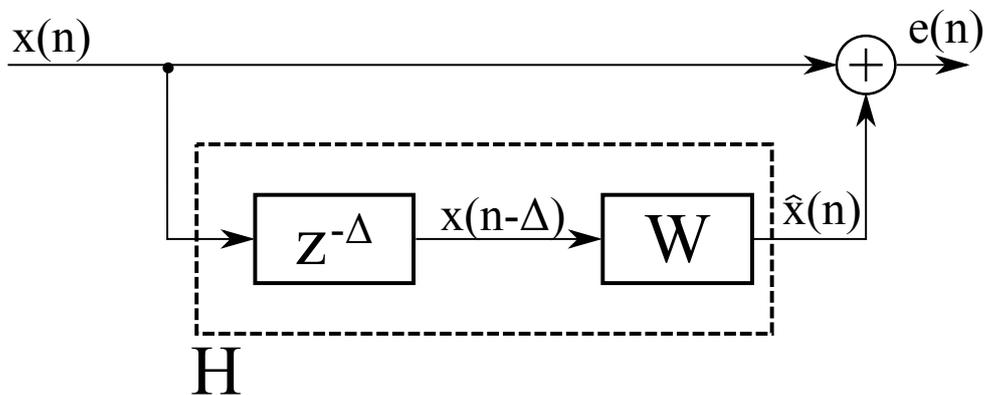


Abbildung 3.16: Signalflussgraph eines linearen Prädiktionsfilters nach [Ell01].

Da die tonalen Komponenten maßgeblich verantwortlich für den Aufbau von Moden in Räumen sind, muss sich ein aktives System zur Raummodenunterdrückung auf eben diese Frequenzen einstellen. In dem vorliegenden neuen Ansatz wird aus diesem Grund ein lineares Prädiktionsfilter genutzt, um das messtechnisch erfasste Eingangssignal eines ANC Systems (e in Abb. 3.14) vorzuverarbeiten, das enthaltene Rauschen zu unterdrücken und einen konstanten Fokus auf die dominanten tonalen Komponenten zu legen.

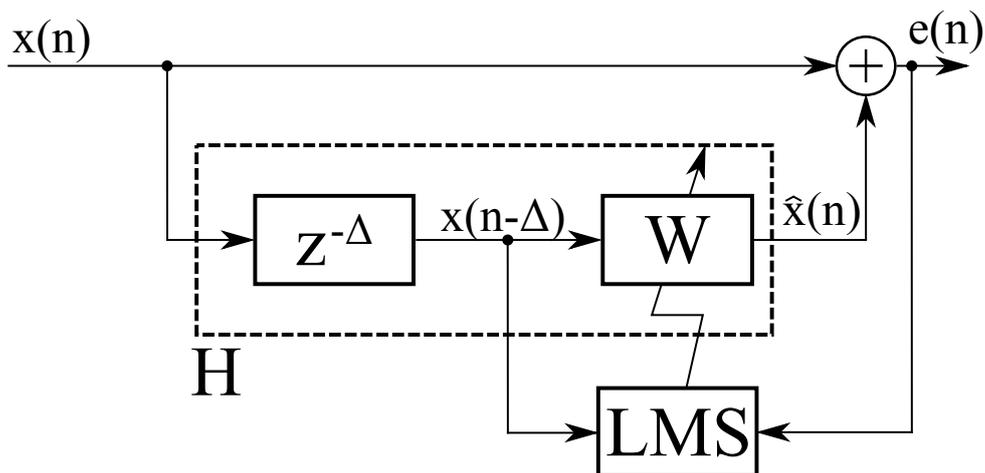


Abbildung 3.17: Signalflussgraph eines adaptiven linearen Prädiktionsfilters.

Die Verwendung des linearen Prädiktionsfilters in einem realen System zur aktiven Lärminderung macht es nötig, dass das Prädiktionsfilter dynamisch auf verschiedene Eingangssignale reagieren kann. Daher wird das System aus Abb. 3.16 zu dem in Abb. 3.17 weiterentwickelt. Mittels des bereits bekannten LMS Algorithmus wird das Filter derart verändert, dass die Leistung des Restsignals $e(n)$ minimiert wird. Diese Form des linearen Prädiktionsfilters wird im Folgenden adaptive lineare Prädiktionskodierung (Adaptive Linear Prediction Coding, ALPC) genannt.

3.5.2 Aufbau

Das ALPC Filter wurde in den Fehlerpfad des einfachen ANC Systems aus Abbildung 3.14 eingefügt. Daraus ergibt sich der Signalflussgraph des neuen Ansatzes zur aktiven Raummodenminderung, wie er in Abb. 3.18 zu sehen ist.

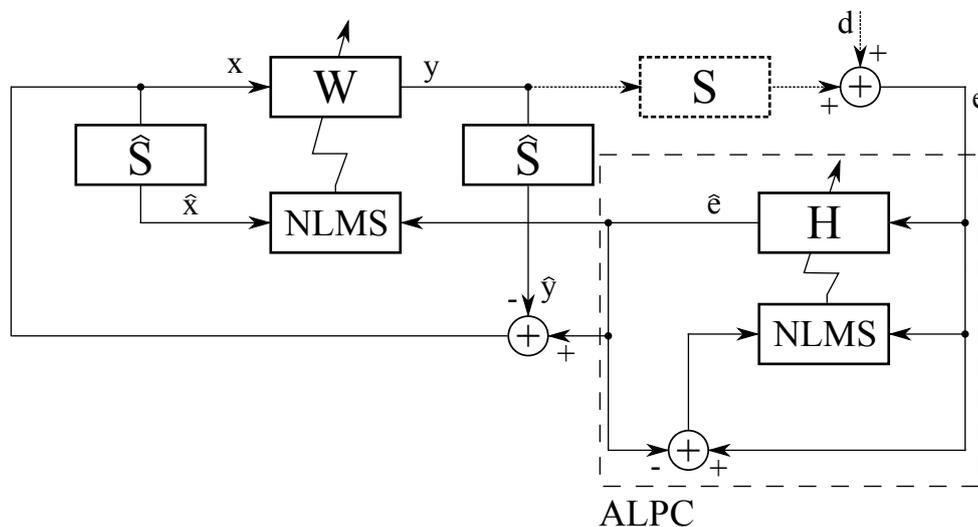


Abbildung 3.18: Signalflussgraph des neuen ALPC-ANC Systems mit einem Mikrofon und einem Lautsprecher. Die gestrichelten Komponenten repräsentieren die akustische Ausbreitung und die weit gestrichelten die ALPC Komponente des Systems.

Der durch diesen Signalflussgraphen beschriebene Algorithmus wurde auf dem in 3.4.3 beschriebenen Messsystem implementiert.

3.5.3 Messungen

Der oben beschriebene Ansatz wurde im Raum FC 1.19 der Bergischen Universität Wuppertal getestet. Hierzu wurden neun Signale erzeugt, mit welchen das Schallfeld im Raum über einen Lautsprecher, der im Flur vor der Tür stand, angeregt wurde. Die Verwendung einer Schallquelle außerhalb des betrachteten Raumes diente einer realistischeren Betrachtung der Anregung von Raummoden im alltäglichen Umfeld.

Die Abbildungen 3.19 und 3.20 zeigen die Spektren der verwendeten Signale und die Reaktion der linearen Prädiktion auf diese. Die ersten fünf Signale bestehen aus einer tonalen Komponente mit einer Frequenz von 26,9 Hz, welche die 1 0 0 Mode im betrachteten Raum anregt. Für das erste dieser Signale liegt der Pegel des Sinustones 18 dB unter der digitalen Vollaussteuerung und steigt bis zum fünften Signal in 3 dB Schritten auf einen Pegelabstand von 6 dB an. Alle fünf Signale wurden mit einem braunen Rauschen überlagert dessen Pegel an der Hauptkomponente 6 dB unter der Vollaussteuerung liegt. Somit sollte erkennbar werden, ab welcher Pegeldifferenz das ANC System auf die tonale Komponente reagiert und ob die ALPC auf diesen Abstand einen erkennbaren Einfluss besitzt. Die Signale sechs und sieben entsprechen dem fünften Signal, allerdings wird bei Nummer sechs der Pegel des Sinustones mit einer Periodenlänge von 10 s amplitudenmoduliert, wobei die hieraus maximal resultierende Absenkung des Pegels 10 dB beträgt. Bei Signal sieben wird an zwei Stellen für jeweils 5s die tonale Komponente vollständig unterdrückt. Hiermit sollte die Reaktion der beiden ANC Systeme auf dynamische Wechsel der Eingangssignale getestet werden. Das Signal Nummer acht besteht aus Signal fünf mit einer zusätzlichen tonalen Komponente von 75,7 Hz was in einer gleichzeitigen Anregung der 1 0 0 und der 2 1 0 Mode resultiert. Signal acht besteht aus braunem Rauschen welches tiefpassgefiltert wurde. Die Grenzfrequenz des Filters liegt bei 100 Hz. Auf diese Weise sollte untersucht werden, ob die verschiedenen ANC Systeme ohne Vorhandensein einer expliziten tonalen Komponente auf die Frequenz der angeregten Raummode reagieren können.

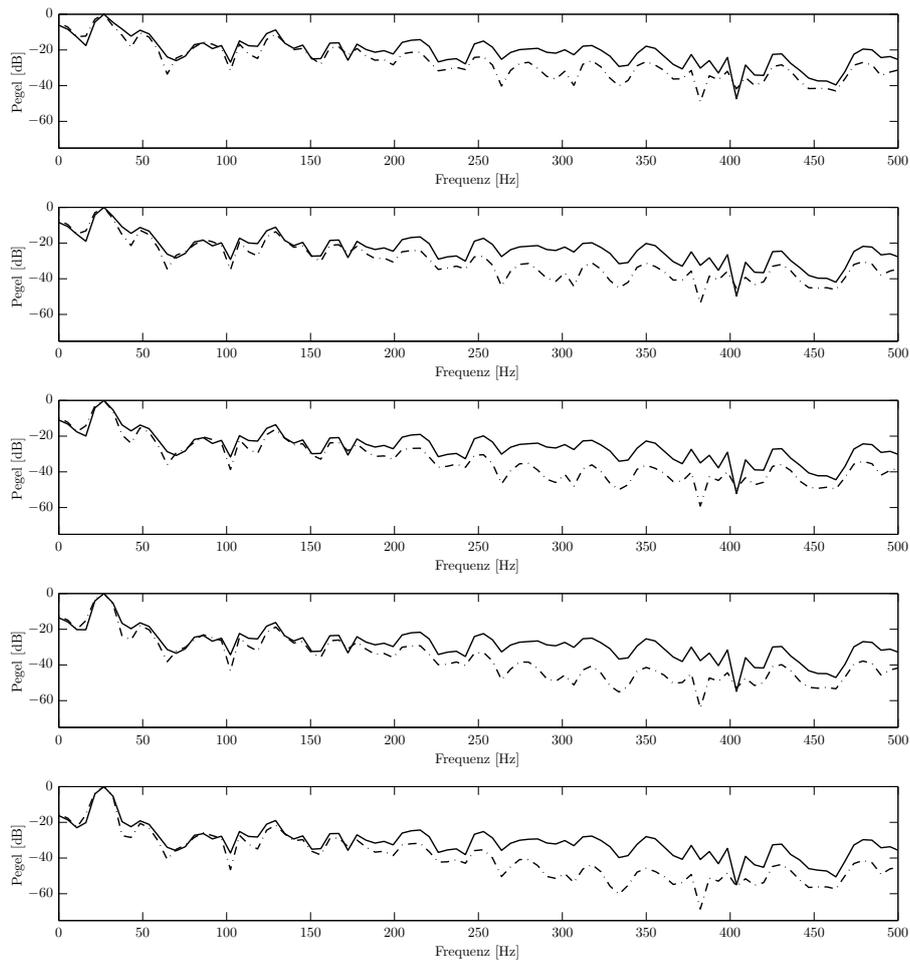


Abbildung 3.19: Spektrale Darstellung der ersten fünf Signale mit denen das ALPCANC System getestet wurde. Der dargestellte Pegel bezieht sich jeweils auf die Hauptkomponente des Signals. Die durchgehenden Kurven zeigen das Signal welches zur Anregung des Raumes benutzt wurde. Die gestrichelten stellen die Reaktion der ALPC auf dieses Signal dar.

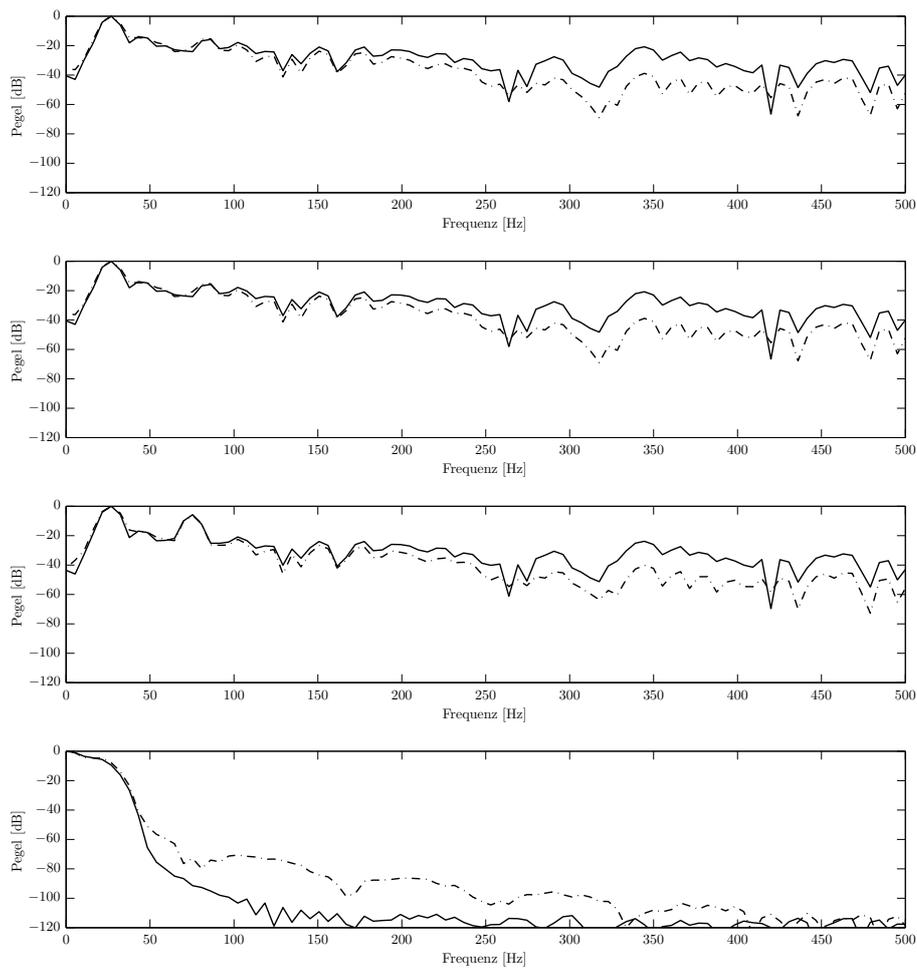


Abbildung 3.20: Spektrale Darstellung der Signale sechs bis neun mit denen das ALPCANC System getestet wurde. Der dargestellte Pegel bezieht sich jeweils auf die Hauptkomponente des Signals. Die durchgehenden Kurven zeigen das Signal welches zur Anregung des Raumes benutzt wurde. Die gestrichelten stellen die Reaktion der ALPC auf dieses Signal dar.

Nach der Anregung der Raummoden durch die beschriebenen neun Signale wurden sowohl die Wirkungen des herkömmlichen ANC Systems (3.4.3) als auch des neuen ALPCANC Systems (3.5.1) getestet und miteinander verglichen. Die Ergebnisse dieses Vergleichs sind als Übersicht in Tabelle 3.2 aufgeführt.

Anregendes Signal	einfaches ANC	ALPC ANC
1	keine Dämpfung	keine Dämpfung
2	keine Dämpfung	keine Dämpfung
3	keine Dämpfung	stabile Dämpfung der 1 0 0 Mode
4	keine Dämpfung	stabile Dämpfung der 1 0 0 Mode
5	stabile Dämpfung der 1 0 0 Mode	stabile Dämpfung der 1 0 0 Mode
6	geringe Dämpfung bei sehr langsamer Adaption	geringe Dämpfung bei sehr langsamer Adaption
7	geringe Dämpfung bei langsamer Adaption	keine Dämpfung bei instabilem System
8	keine Dämpfung bei instabilem System	teilstabile vollständige Dämpfung von 2 1 0 Mode und teilstabile teilweise Dämpfung von 1 0 0 Mode
9	keine Dämpfung	keine Dämpfung

Tabelle 3.2: Ergebnisse des Vergleichs der Dämpfungsergebnisse von ANC und ALPCANC System für die in den Abbildungen 3.19 und 3.20 aufgeführten Anregungssignale.

Während das herkömmliche ANC System die 1 0 0 Mode erst ab einem Pegelabstand von 12 dB zwischen Rauschen und tonaler Komponente erfolgreich dämpfen kann, vermag das neu vorgeschlagene System den Pegelabstand um 6 dB auf 6 dB zu verbessern und so die 1 0 0 Mode schon bei deutlich geringerem Pegel auszulöschen. Für die verwendeten stationären Signale arbeiten beide Systeme stabil und zuverlässig. In Signal sechs ändert sich der Pegel der tonalen Komponente periodisch. Diese Schwankung führt bei beiden Systemen dazu, dass die Adaption nur noch sehr langsam erfolgt. Dies hat deutliche Einbußen im Dämpfungserfolg zu Folge, da die Amplitudenmaxima von Signal und Gegensignal nicht mehr übereinstimmen. Während die Prädiktion der ALPC in diesem Fall nur zu Amplitudenfehlern führt ergeben sich für Signal Nummer sieben hier große Schwierigkeiten. Das komplette Aussetzen der tonalen Komponente führt zu massiver Fehlprädiktion und daraus resultierend instabilem Verhalten. Das herkömmliche System ist hiervon nicht betroffen und kann die Dämpfung beibehalten.

Umgekehrt verhält es sich für das Signal mit zwei tonalen Komponenten. Das einfache ANC System vermag nicht die 1 0 0 Mode zeitgleich mit der 2 1 0 Mode auszulöschen und wird bei dem Versuch instabil. Das ALPCANC System reagiert sehr gut auf diesen kombinierten Effekt.

Abbildung 3.21 zeigt die Schalldruckpegelverteilung im Raum nach 1 s Anregung

mit einem 75.7 Hz Sinussignal. Aufgrund der Messung an nur neun gleichmäßig im Raum verteilten Punkten in der rechten Raumhälfte (Vergleiche Abb. 3.4) ist die 2 1 0 Mode hier für den Bereich der linken Raumhälfte aus den Daten der rechten interpoliert worden.

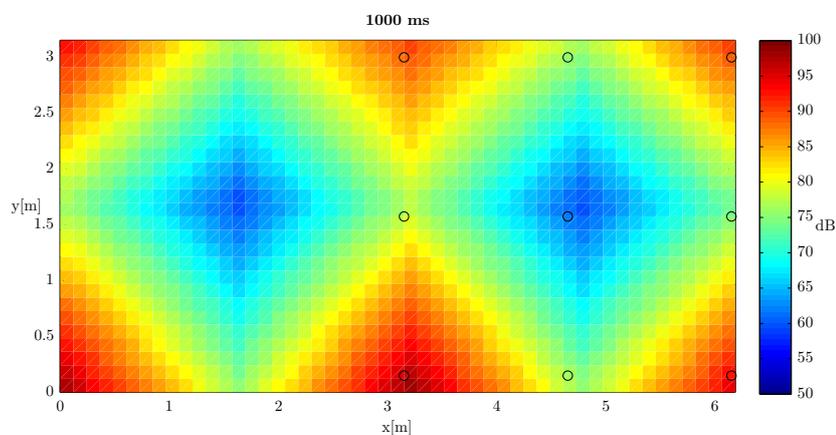


Abbildung 3.21: Messung des Schalldruckpegels der 2 1 0 Mode nach ca. 1 s. Die Daten der linken Raumhälfte wurden aufgrund der Messmethode (vergleiche Abb. 3.4) aus denen der rechten angenommen.

In Abbildung 3.22 ist im Vergleich hierzu das Schallfeld im Raum bei Anregung durch Signal Nummer acht und gleichzeitiger Wirkung des ALPCANC Systems zu sehen. Nach einschalten des ALPCANC System ergibt sich in den Maxima der 2 1 0 Mode eine Dämpfung des Schalldruckpegels um über 20 dB.

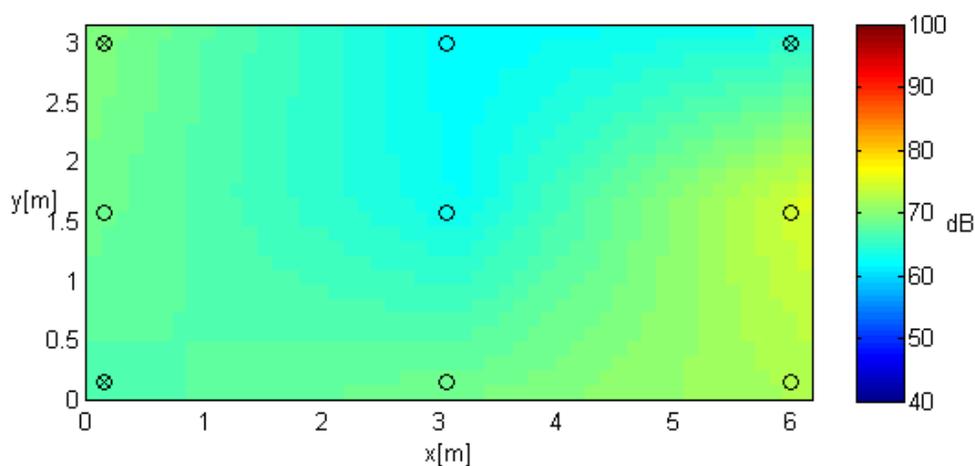


Abbildung 3.22: Messung des Schalldruckpegels der Kombination von 1 0 0 und 2 1 0 Mode mit aktivem ALPCANC System nach ca. 1 s.

Die Auslöschung erfolgt nicht für alle Raumbereiche, da Teile der 1 0 0 Mode bestehen bleiben, dennoch ist der Dämpfungserfolg sehr deutlich zu erkennen. Vor allem reagiert

das System stabil auf die Anwesenheit zweier tonaler Komponenten. Für das Signal ohne tonale Komponenten kann keines der beiden ANC Systeme eine Anregung der 1 0 0 Mode durch das tieffrequente Rauschen verhindern.

3.6 Zusammenfassung und Fazit

In diesem Abschnitt wurde gezeigt wie sich Raummoden in geschlossenen Räumen ausbilden können. Vor allem in kleineren Räumen führt dies zu einer massiven Verstärkung des Schalldruckpegels im tiefen Frequenzbereich. Für Menschen die sensitiv auf tieffrequenten Lärm reagieren kann so noch schnell aus einem ursprünglich kaum wahrnehmbaren tieffrequentem Schall eine deutliche Belästigung entstehen. Um die Belastung der Bewohner betroffener Häuser zu minimieren ist es nötig, auf stehende Wellen zu reagieren. Bauliche Maßnahmen führen hier selten zu guten Ergebnissen, da der Einbau massiver und/oder großer Bauelemente in die moderne Wohnarchitektur selten ästhetisch ansprechend, wohnraumsparend und günstig zu bewerkstelligen ist. Aus diesem Grund bietet sich die Verwendung von elektroakustischen Gegenmaßnahmen an. Active Noise Control Systeme ermöglichen es mit geringen baulichen Maßnahmen, Einfluss auf das Schallfeld eines Raumes zu nehmen. Bestehende Systeme sind im Moment allerdings kaum in der Lage, stabil auf veränderliche Lärmsituationen, vor allem bei der gleichzeitigen Anwesenheit verschiedener Raummoden, zu reagieren. Das hier vorgeschlagene ANC System wurde auf algorithmischer Ebene um einen adaptiven linearen Prädiktor (ALPC) im Pfad des Eingangssignales erweitert. Auf diesem Weg sollte das Mikrofonsignal von Störschallen und Rauschen bereinigt werden und das gesamte System sich so auf die, das Schallfeld am stärksten beeinflussenden, Komponenten konzentrieren können. Im Rahmen dieser Arbeit konnte bereits mit einem von der Signalverarbeitung gesehen langsamen PC/MATLAB System ein zufriedenstellendes Dämpfungsergebnis mit einer Dämpfung der Raummoden um über 20 dB für zwei gleichzeitig auftretende stationäre Moden erzielt werden. Das verwendete System reagiert noch langsam auf Änderungen im Führungssignal, der Rechenaufwand hatte sich durch die Einführung der ALPC in etwa verdoppelt. Auch führte ein Aussetzen der tonalen Hauptkomponenten über massive Fehlprädiktion zu einem instabilen System. Weitere Untersuchungen in diese Richtung, vor allem auf schnellen digitalen Signalprozessoren, sollten viele der rechenzeitbedingten Probleme lösen können. Die Fehlprädiktion aufgrund großer Eingangsamplitudenschwankungen muss seperat betrachtet und etwa über Schwellwertentscheidungen abgemindert werden.

Für die Zukunft bietet die Verwendung der adaptiven linearen Prädiktion sehr gute Chancen, die Bekämpfung von Raummoden mittels aktiver Lärmkontrollsysteme in ihrer Effektivität deutlich zu verbessern.

4 Gesamtfazit und Ausblick

4.1 Gesamtfazit

In dieser Arbeit wurden verschiedene Hörversuche und deren Methodik vorgestellt. Dabei konnte gezeigt werden wie multimodale Effekte die Wahrnehmung von tieffrequentem Lärm durch den Menschen beeinflussen können. Es wurde klar, dass bereits kleine Änderungen an den Stimuli, seien sie akustischer oder anderer Natur, zu einer deutlich unterschiedlichen Wahrnehmung der Lästigkeit besagter Stimuli führen können.

In allen Hörversuchen gab es zum Teil sehr starke Anzeichen, dass gewisse Einzelpersonen von tieffrequentem Lärm deutlich anders und stärker belästigt werden als ihre Mitmenschen.

Die Verwendung des Elektroenzephalogramms zur Erfassung beurteilungsunspezifischer Reaktionen der Testpersonen war sehr erfolgreich. Es konnten direkte Zusammenhänge zwischen den unterschiedlichen Stimuli und den Messwerten nachgewiesen werden, die auf eine einzelpersonenspezifische Wahrnehmung von TFL hindeuten.

Im zweiten Teil der Arbeit wurde gezeigt wie Raummoden gerade im Frequenzbereich des tieffrequenten Lärms zu einer deutlichen Schalldruckerhöhung führen. Die Kombination dieses Sachverhaltes mit dem Umstand, dass hier kleine Schalldruckänderungen zu einer starken Lästigkeitswirkung bei sensitiven Personen führen, macht deutlich, dass bereits kleine Lärmpegel zu einer deutlichen Belästigung innerhalb von Räumen führen können.

Im weiteren wird mit Methoden der aktiven Lärmkontrolle hierfür eine Lösung angeboten. Vor allem mit der in dieser Arbeit vorgeschlagenen Erweiterung des Systems durch die lineare Prädiktion wird es möglich, Raummoden in einem stark begrenzten Frequenzbereich zu dämpfen. Dies sollte dazu führen, dass der tieffrequente Lärm soweit vermindert werden kann, dass er auch für sensitive Personen unter die jeweilige Lästigkeitsschwelle fällt.

4.2 Ausblick

Die in dieser Arbeit vorgestellten Hörversuche bieten viele neue Ansätze, die in zukünftigen Hörtests eingesetzt werden können. Vor allem die Verwendung des EEG

scheint zur Erfassung der Probandenreaktion bestens geeignet. Dabei ist darauf zu achten, die Hörversuche auf diese Messmethode abzustimmen, so dass die anfallenden Datenmengen in einem Rahmen bleiben der mit jeweils aktuellen EDV Methoden sinnvoll zu verarbeiten ist und dennoch der Problematik gerecht wird. Besonders interessant erscheint es, die Auswirkung multimodaler Effekte auch mittels des Elektroenzephalogramms zu beobachten. Des weiteren bietet es sich an, Langzeitwirkungen von tieffrequenten Signalen zu beleuchten.

Der Gewinnung von Erkenntnissen über die spezifische Wahrnehmung von TFL durch besonders sensitive Einzelpersonen sollte dabei stets im Vordergrund stehen. Weitere Hörversuche könnten zum Beispiel unter Verwendung der EEG Methode, bei für TFL sensitiven Personen mittels eines tieffrequenten Stimulus, welcher in unterschiedlichen Schalldruckpegeln dargeboten wird, die Lästigkeitsschwellen ausloten und somit auch Mindestanforderungen an ein System zur aktiven Unterdrückung von Raummoden aufstellen.

Die Erweiterungsmöglichkeiten für aktive Systeme zur Schallfeldkontrolle sind äußerst vielfältig. Während das in dieser Arbeit vorgestellte System zu Testzwecken auf einem PC mit MATLAB basierte, wird die Migration auf einen digitalen Signalprozessor Leistungsfähigkeit und Stabilität deutlich erhöhen. Zusammen mit der hier vorgeschlagenen linearen Prädiktionsmethode bietet sich so die Möglichkeit innerhalb eines Raumes die Belästigung durch tieffrequenten Lärm dauerhaft und stabil zu lösen.

5 Anhang

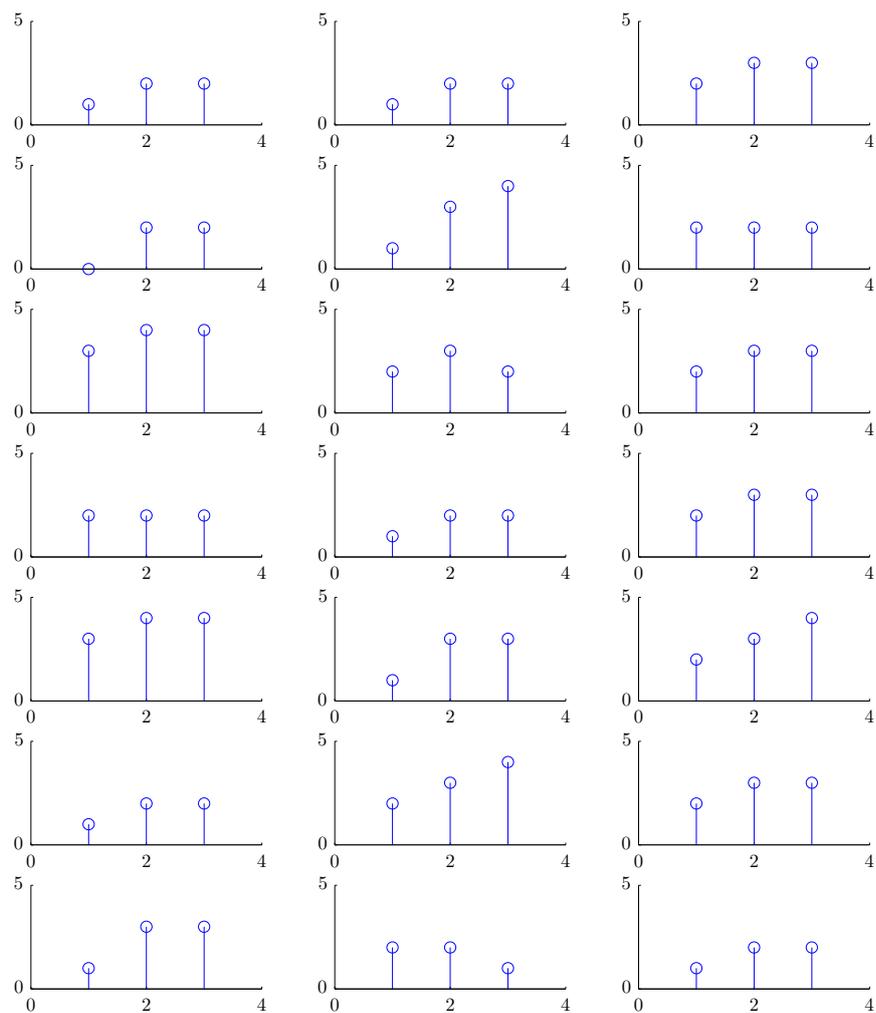


Abbildung 5.1: Hörversuch 1: Empfundene Lästigkeit der drei Stimuli nach einzelnen Probanden der Kontrollgruppe.

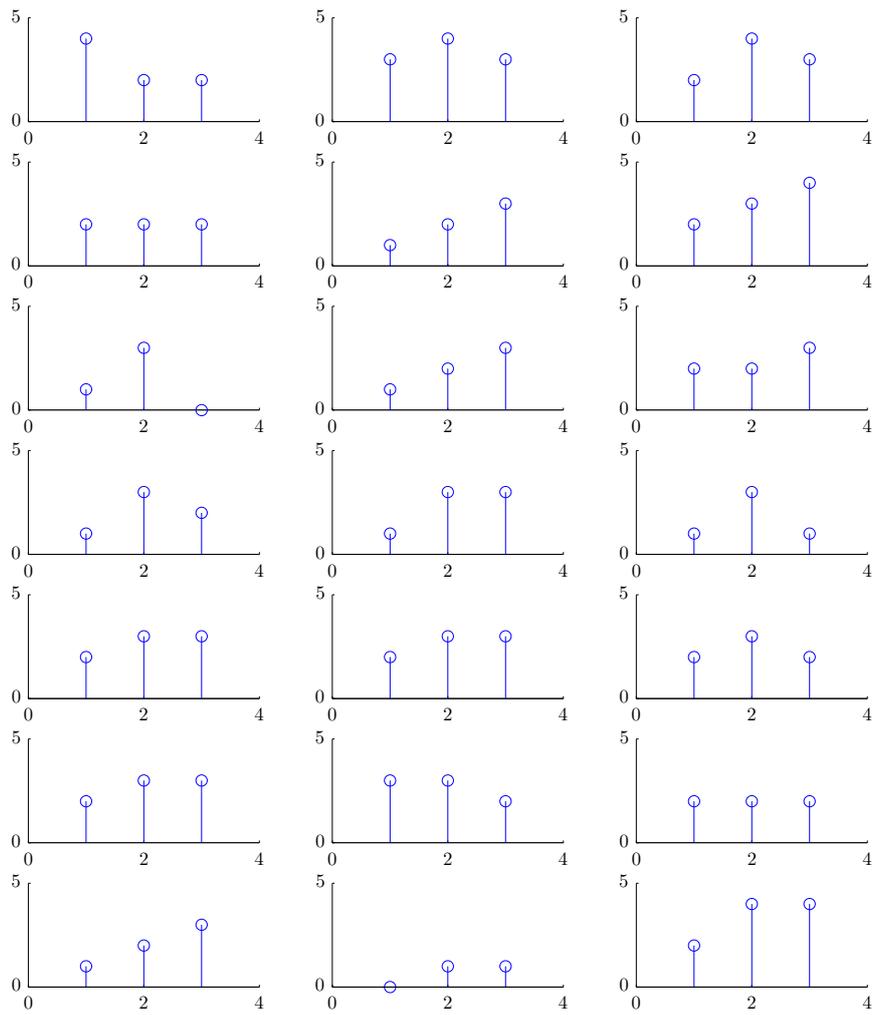


Abbildung 5.2: Hörversuch 1: Empfundene Lästigkeit der drei Stimuli nach einzelnen Probanden der Testgruppe.

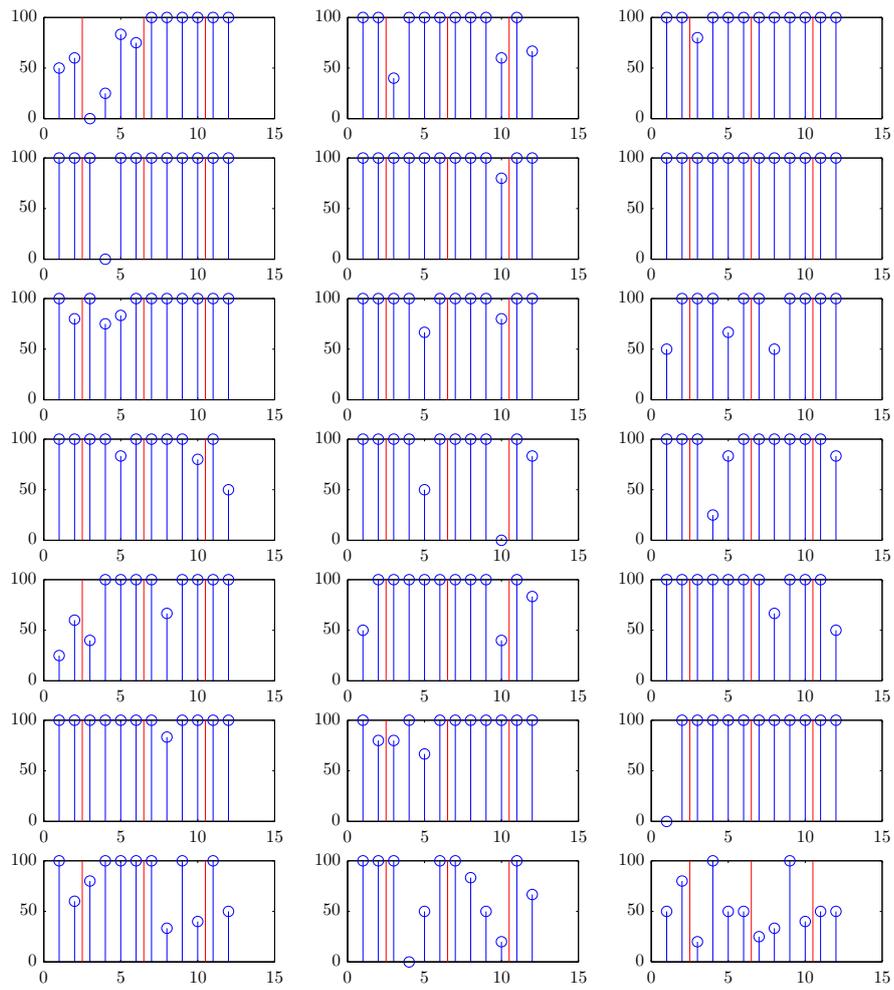


Abbildung 5.3: Hörversuch 1: Richtige Antworten der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe, prozentual.

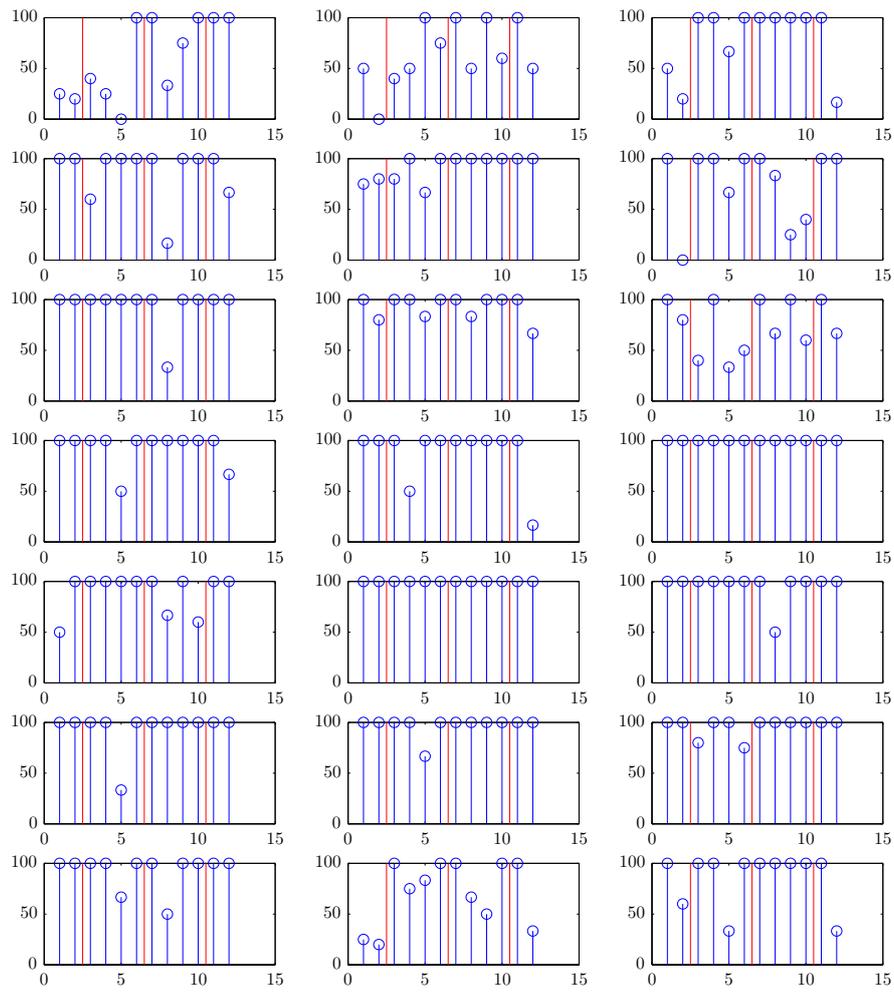


Abbildung 5.4: Hörversuch 1: Richtige Antworten der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe, prozentual.

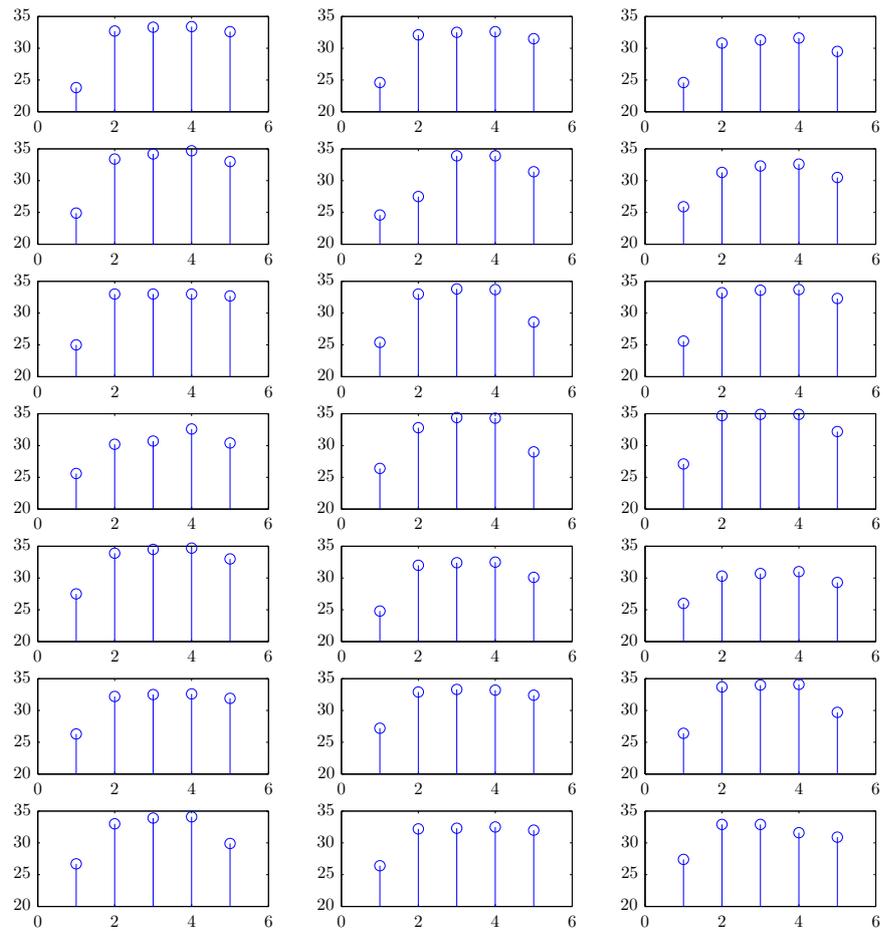


Abbildung 5.5: Hörversuch 1: Körpertemperatur der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe

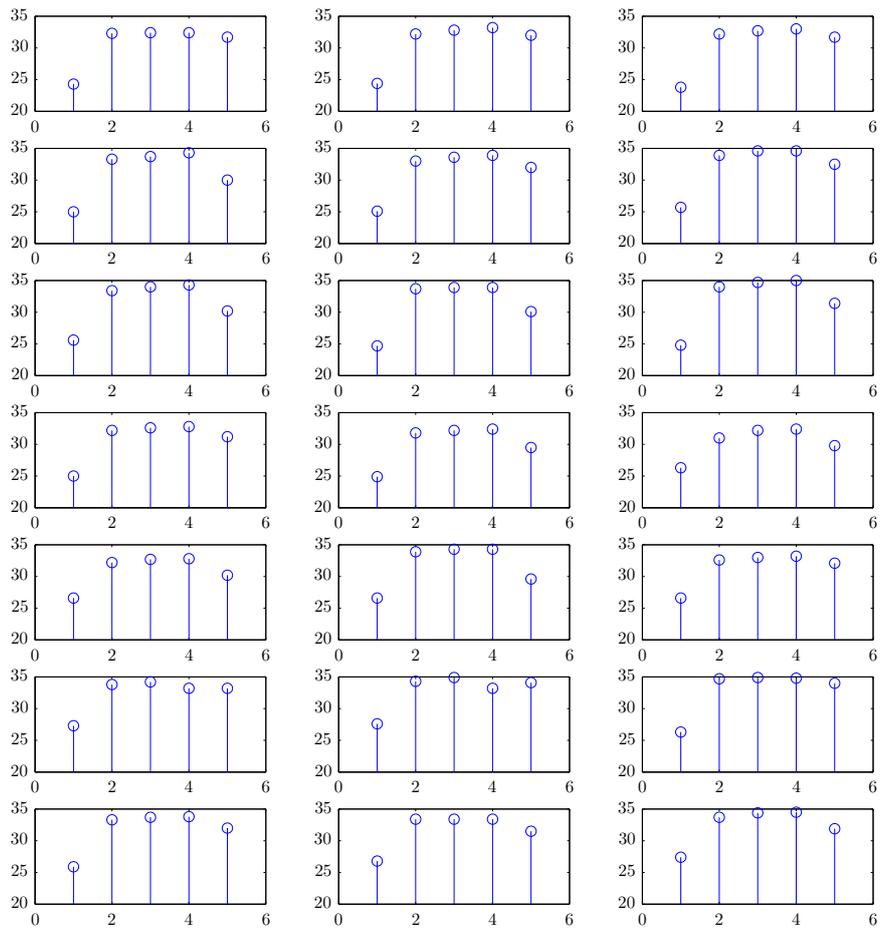


Abbildung 5.6: Hörversuch 1: Körpertemperatur der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe

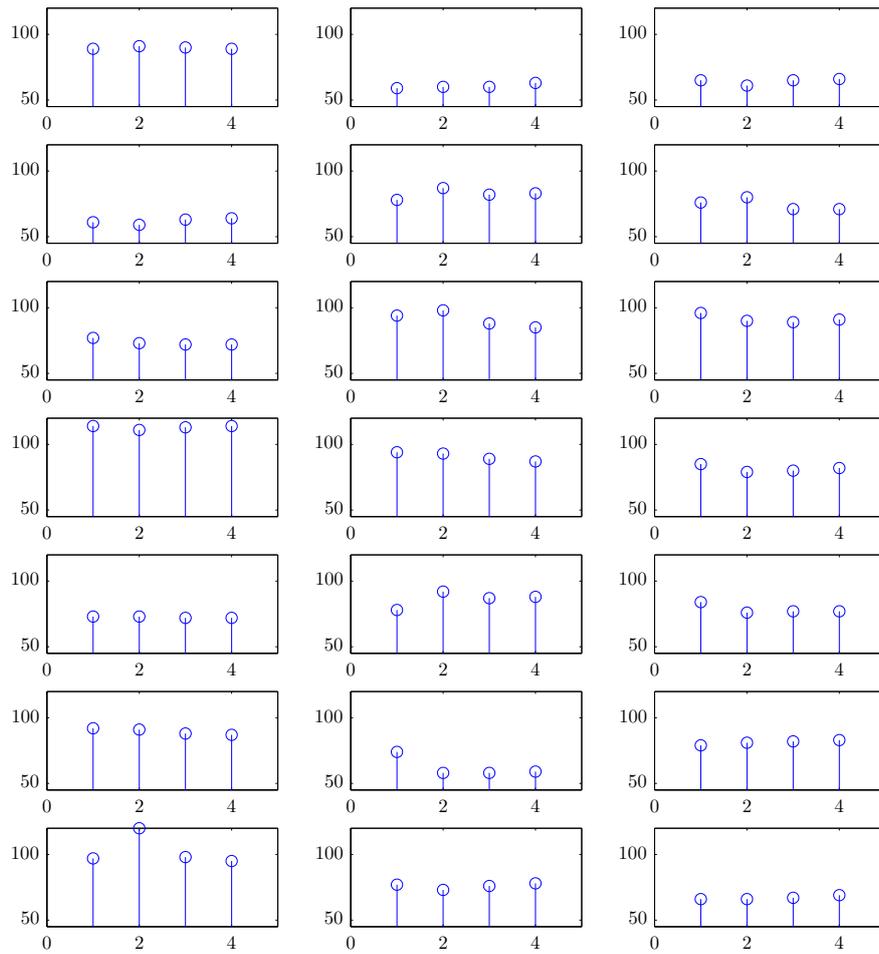


Abbildung 5.7: Hörversuch 1: Puls der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe

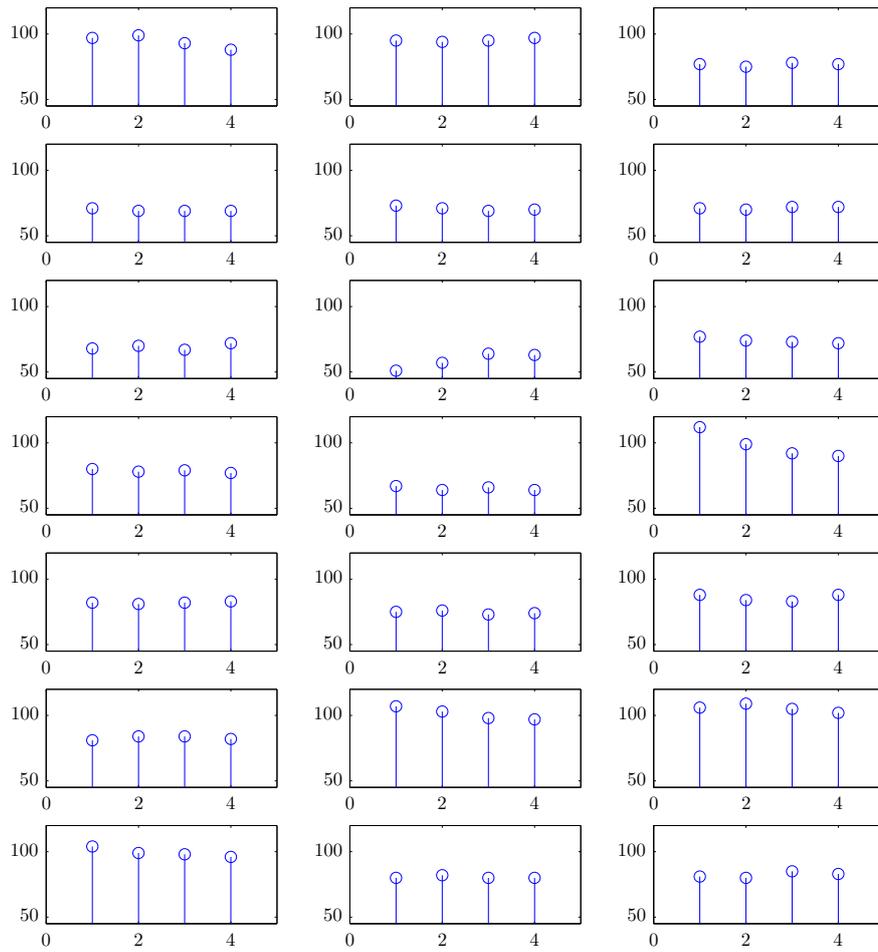


Abbildung 5.8: Hörversuch 1: Puls der einzelnen Probanden der Kontrollgruppe

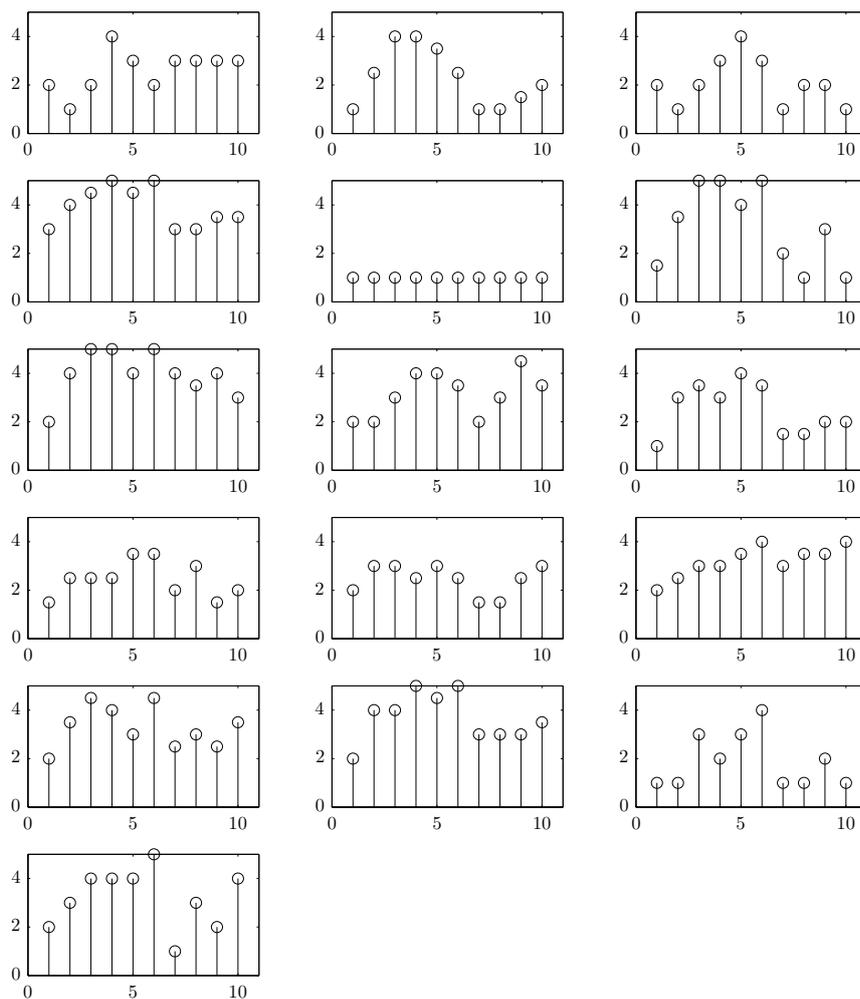


Abbildung 5.9: Hörversuch 2: Einzelantworten der Probanden aus dem ersten Durchgang.

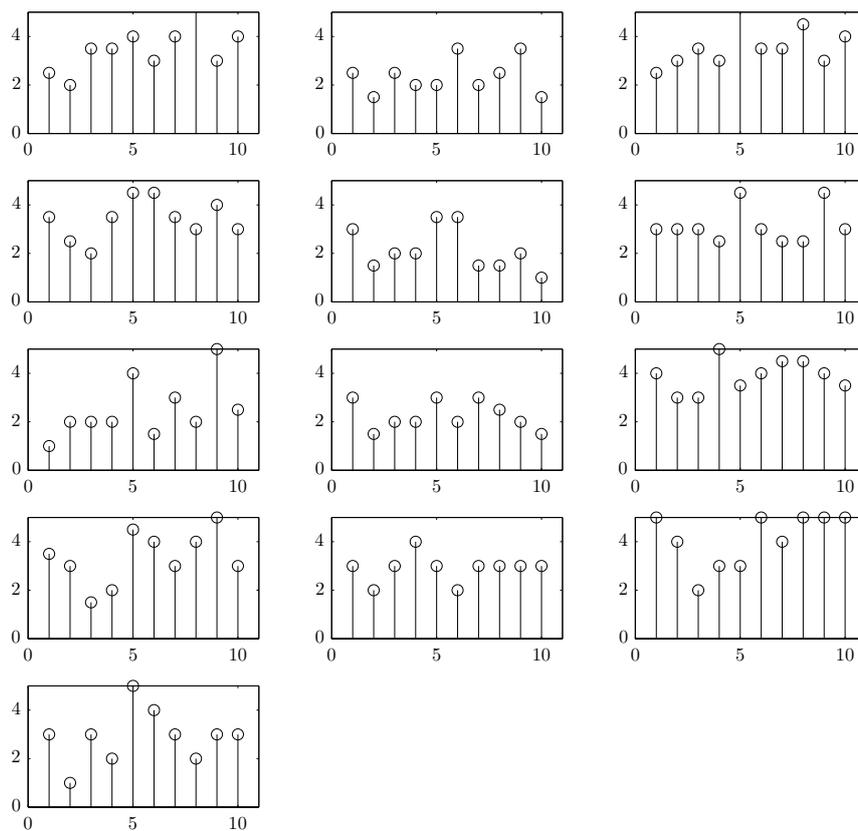


Abbildung 5.10: Hörversuch 2: Einzelantworten der Probanden aus dem zweiten Durchgang.

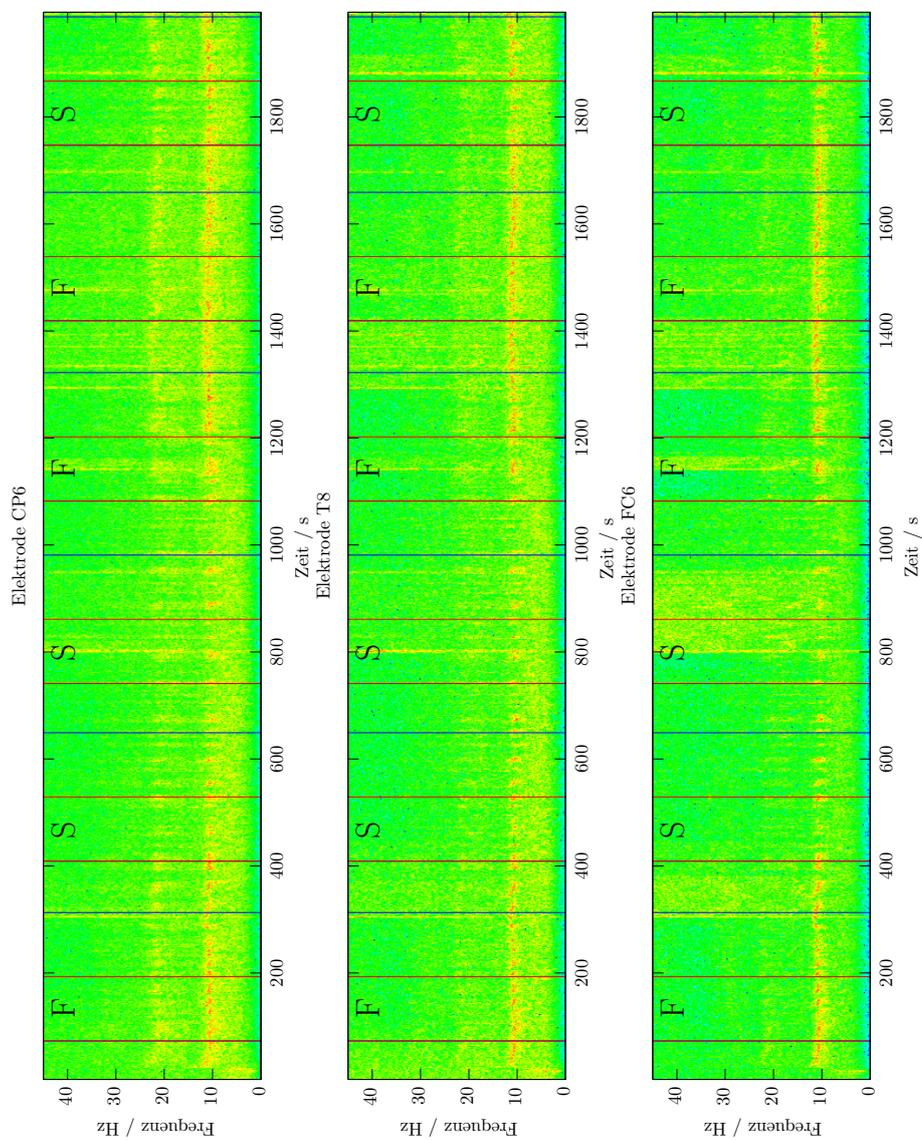


Abbildung 5.11: Spektrogramm des EEG von Proband 1.

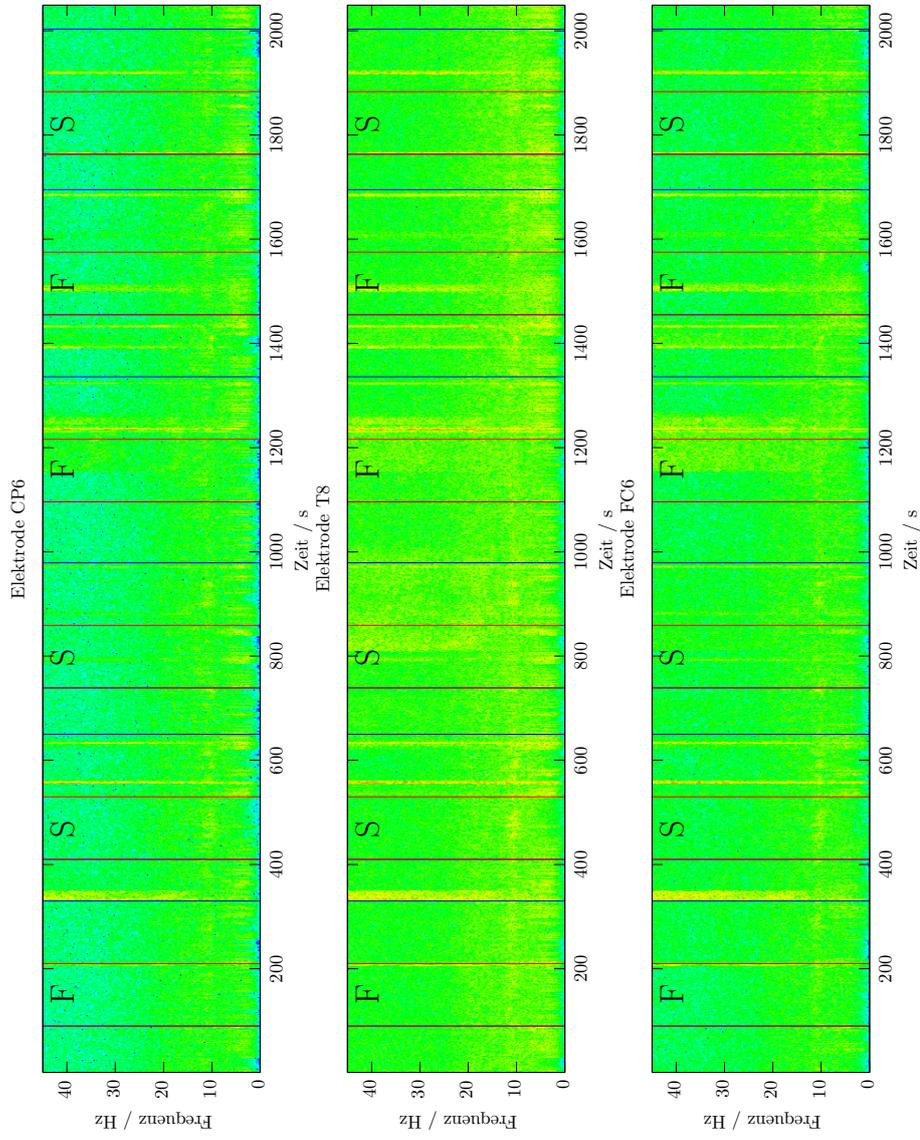


Abbildung 5.12: Spektrogramm des EEG von Proband 2.

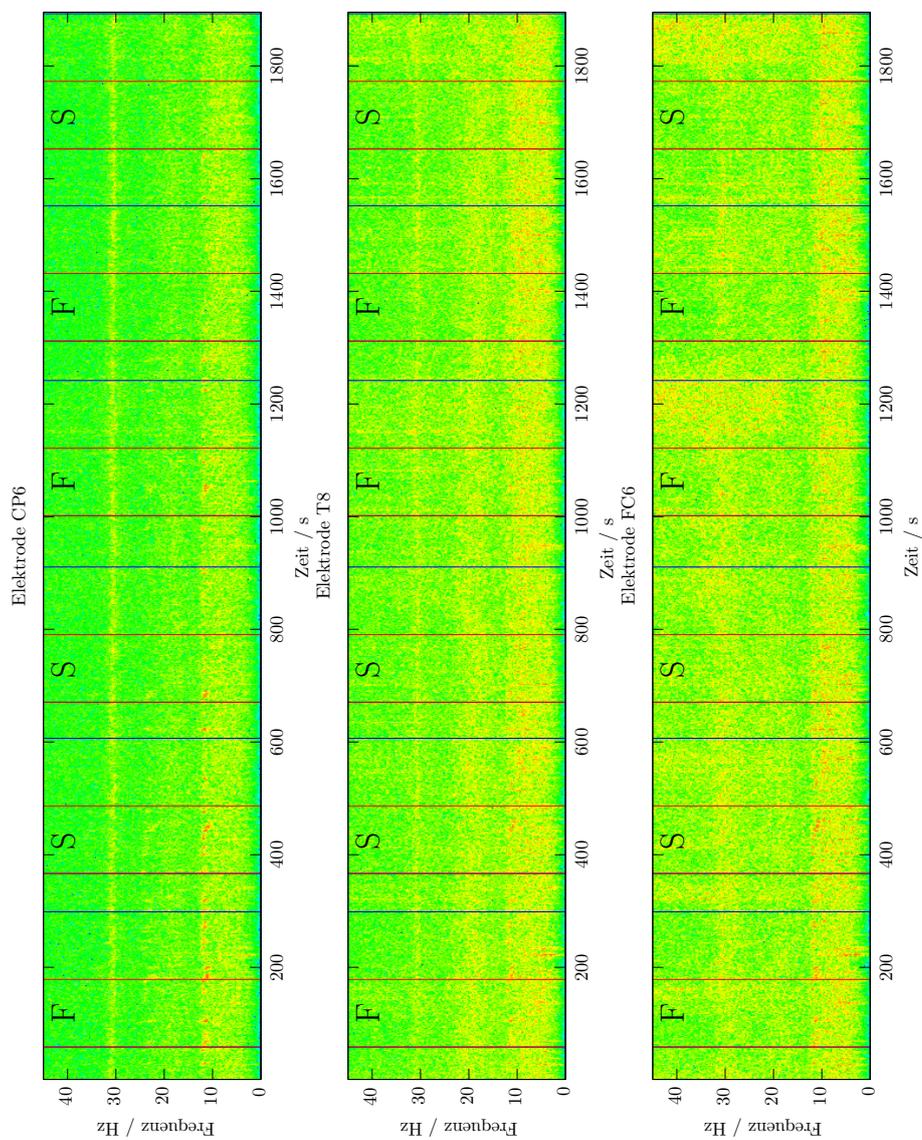


Abbildung 5.13: Spektrogramm des EEG von Proband 3.

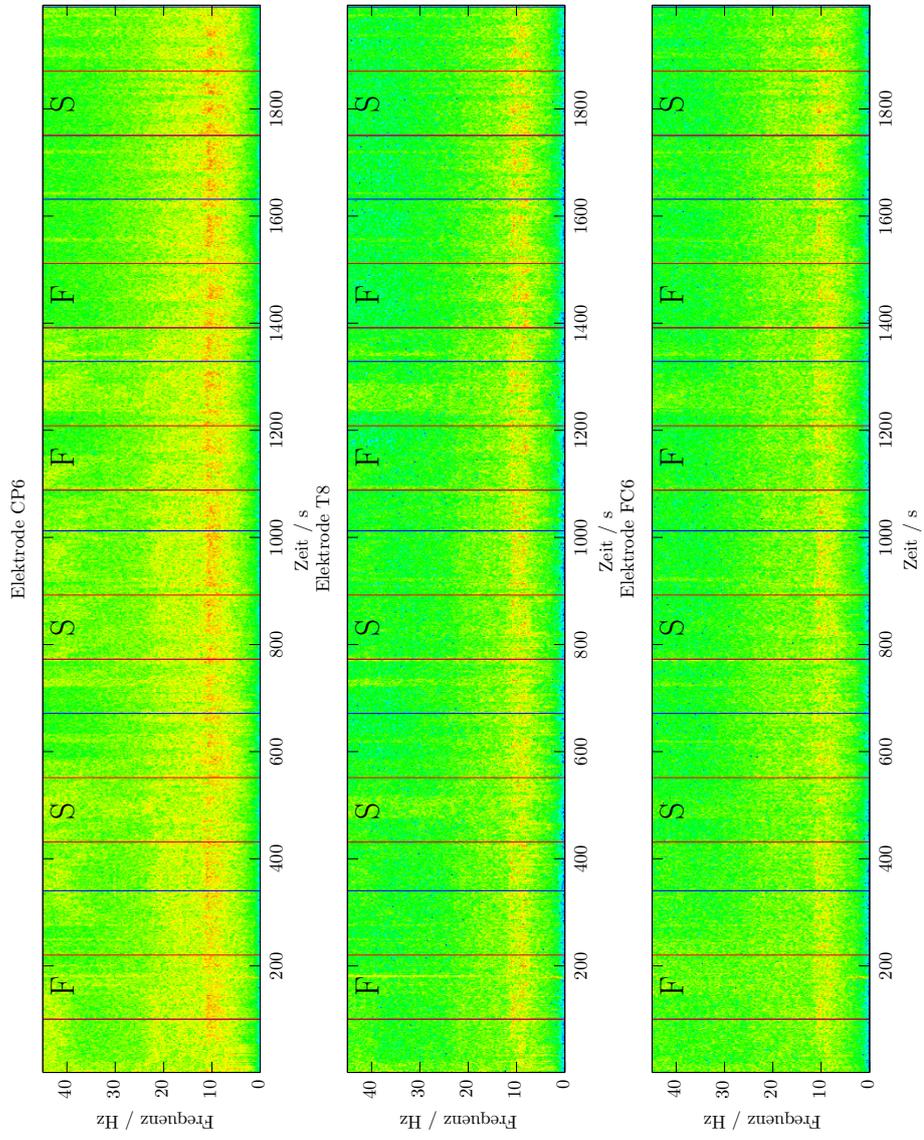


Abbildung 5.14: Spektrogramm des EEG von Proband 4.

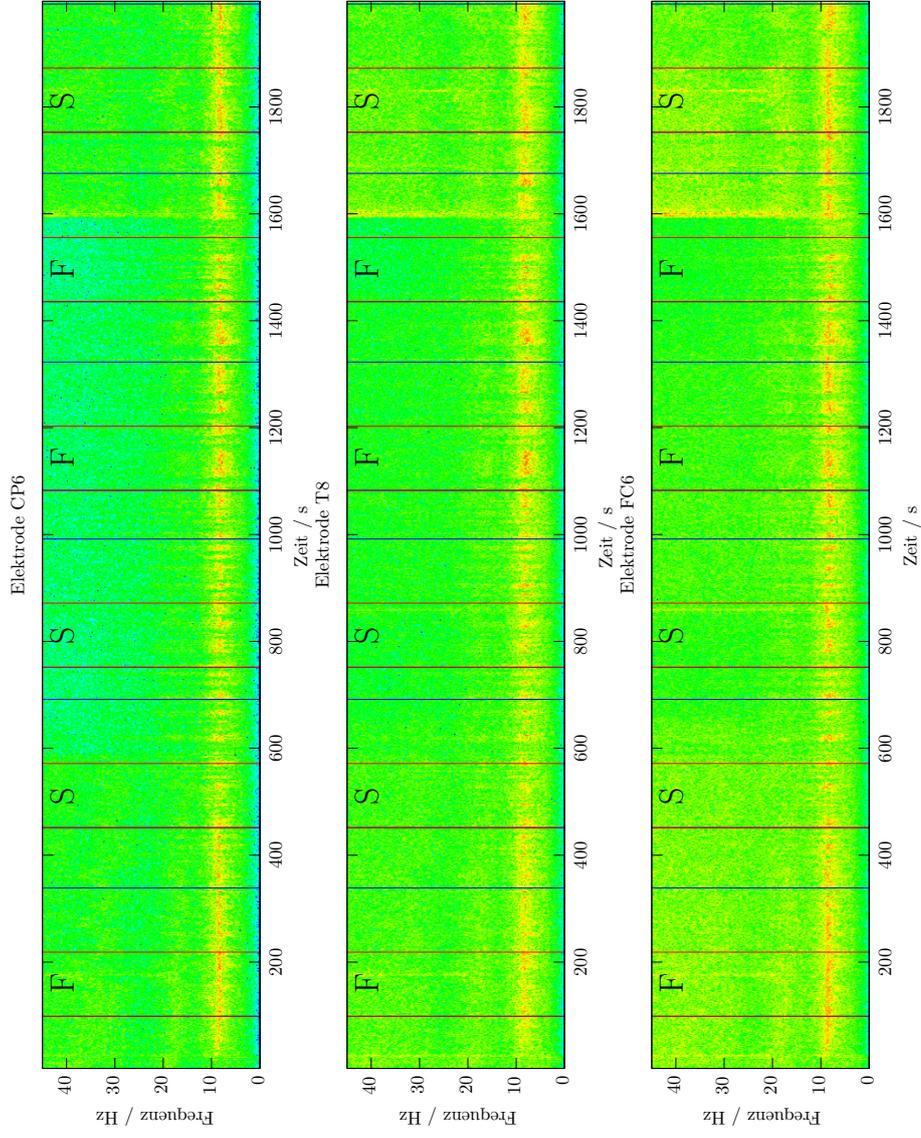


Abbildung 5.15: Spektrogramm des EEG von Proband 6.

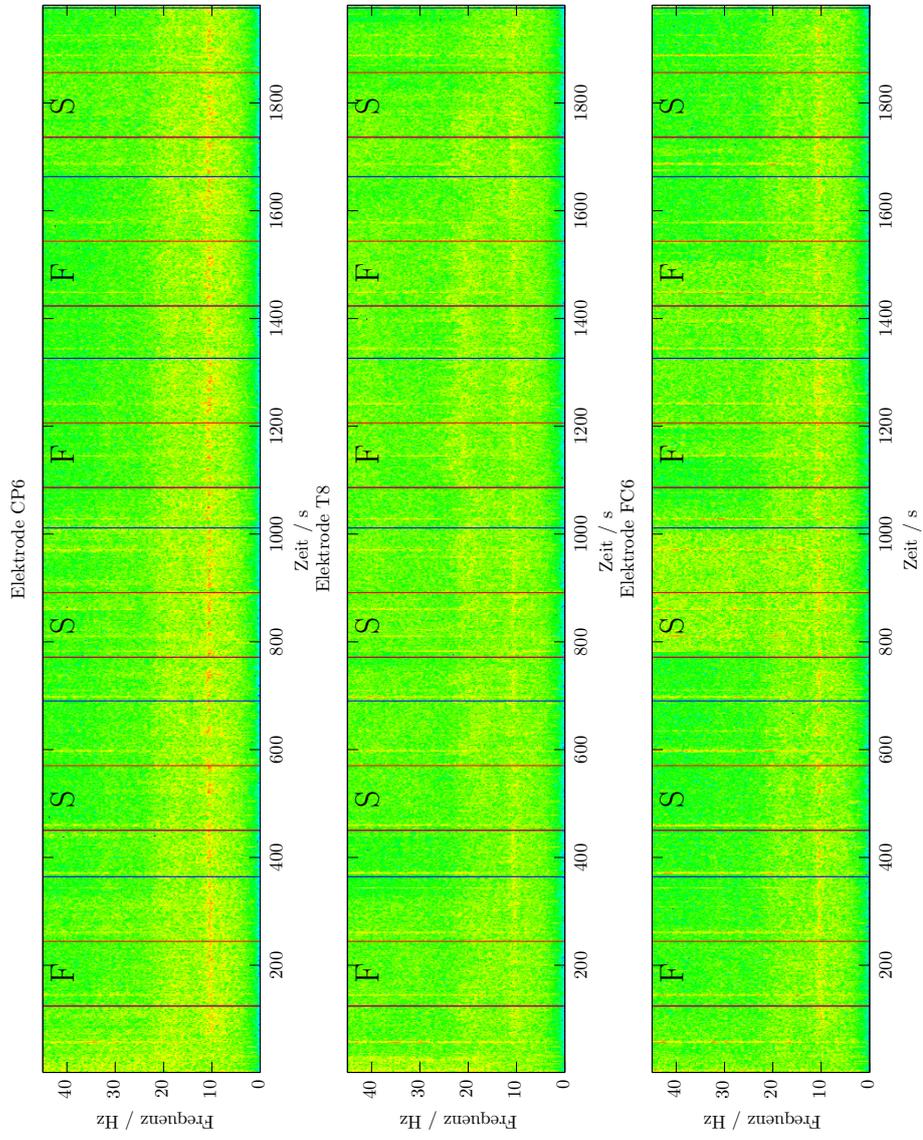


Abbildung 5.16: Spektrogramm des EEG von Proband 7.

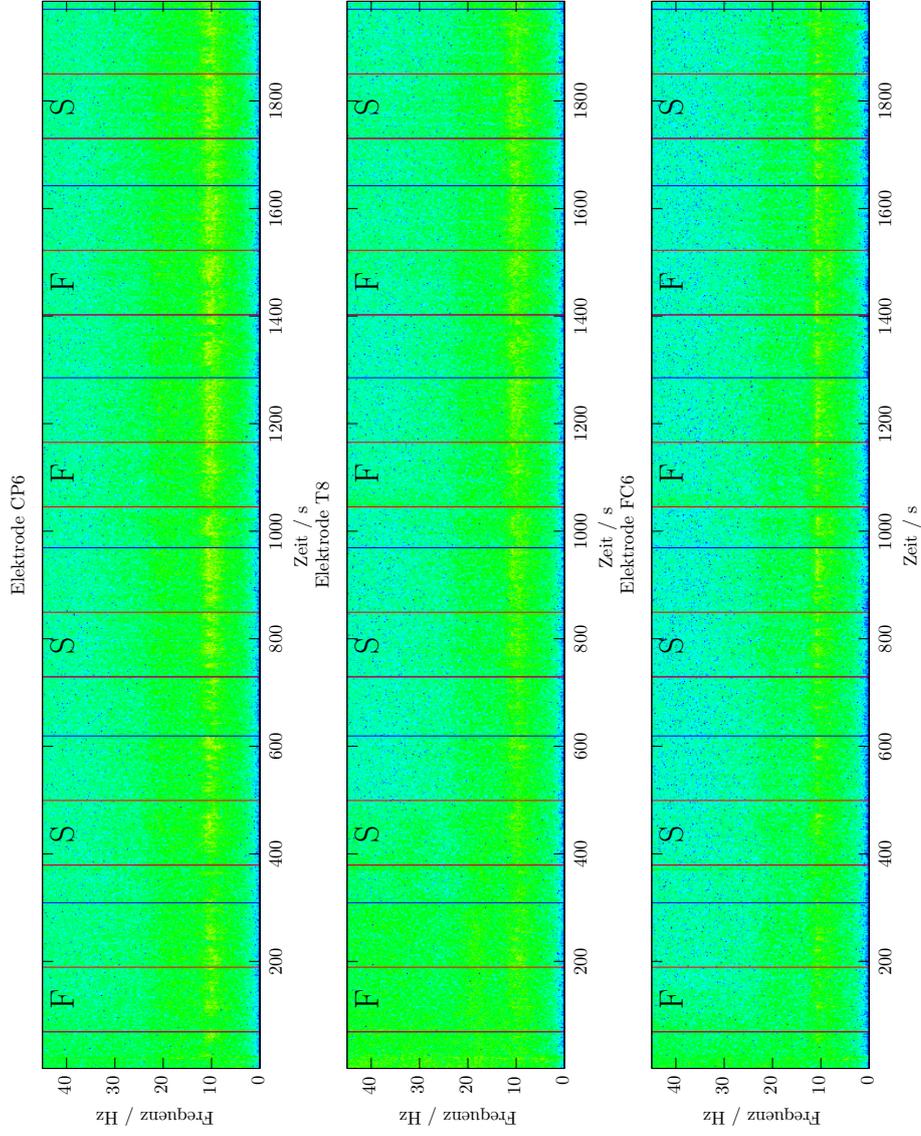


Abbildung 5.17: Spektrogramm des EEG von Proband 9.

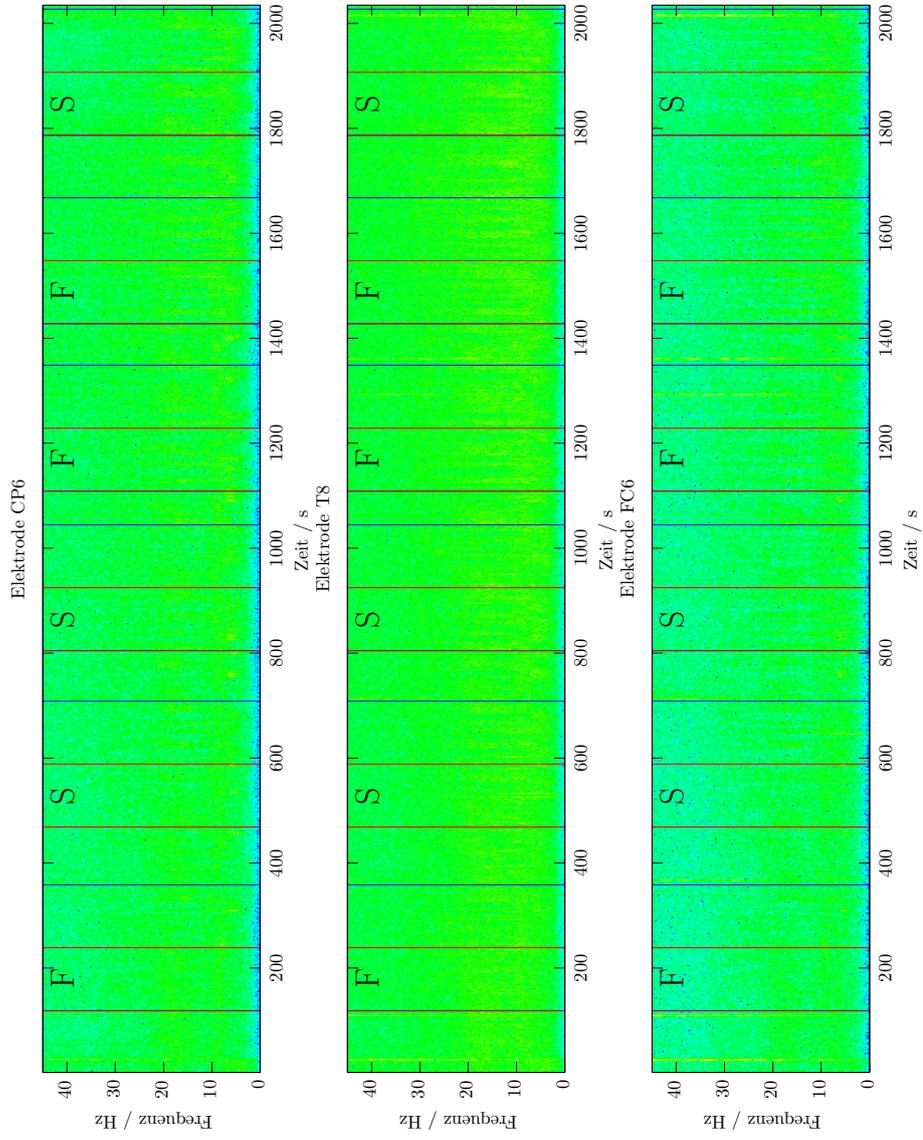


Abbildung 5.18: Spektrogramm des EEG von Proband 10.

Literaturverzeichnis

- [AASBW06] ANSARI-ASL, K. ; SENHADJI, L. ; BELLANGER, J.-J. ; WENDLING, F.: Quantitative evaluation of linear and nonlinear methods characterizing interdependencies between brain signals. In: *Physical Review E* 74 (2006). <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevE.74.031916>. – DOI 10.1103/PhysRevE.74.031916
- [BHJ96] BERGLUND, B. ; HASSMEN, P. ; JOB, R. F. S.: Sources and effects of low-frequency noise. In: *Acoustical Society of America* 99 (1996), S. 2985–3002. – Eher allgemeiner Hinweise auf die Belastung durch LFN
- [BI92] BUSER, P. ; IMBERT, M.: *Audition*. The MIT Press, 1992
- [BP09] BENTON, J. S. ; PITTEN, A.: Effects of Low Frequency Noise on Man - A case Study. In: *Noise and Health* (2009)
- [DEG06] ; Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V. (Veranst.): *Akustische Wellen und Felder*. https://www.dega-akustik.de/fileadmin/dega-akustik.de/publikationen/DEGA_Empfehlung_101.pdf.
Version: 03 2006
- [EHKZ08] ELLERMEIER, W. ; HELLBRÜCK, J. ; KOHLRAUSCH, A. ; ZEITLER, A. ; DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR AKUSTIK E.V. (Hrsg.): *Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis*. Deutsche Gesellschaft für Akustik e.V., 2008
- [Ell01] ELLIOT, S.: *Signal Processing for Active Noise Control*. Academic Press, 2001
- [Han01] HANSEN, C. H.: *Understanding Active Noise Cancellation*. Spon Press, 2001
- [HK09] HIRAYAMA, R. ; KAJIKAWA, Y.: Stability Improvement of Feedback Active Noise Control System Using Linear Prediction. In: *Proceedings of APSIPA Annual Summit and Conference* (2009)
- [HO00] HYVÄRINEN, A. ; OJA, E.: Independent Component Analysis: Algorithms and Applications. In: *Neural Networks*, 13(4-5) (2000)

- [HW03] HAYKIN, S. ; WIDROW, B.: *Least-Mean-Square Adaptive Filters*. Wiley-Interscience, 2003
- [Kaj11] KAJIKAWA, Y.: Feedback Active Noise Control System and its Application to MRI Noise. In: *ICICS 2011* (2011)
- [Kei75] KEIDEL, W. D.: *Physiologie des Gehörs*. Georg Thieme Verlag Stuttgart, 1975
- [KM96] KUO, S. M. ; MORGAN, D. R.: *Active Noise Control Systems: Algorithms and DSP Implementations*. John Wiley & Sons, 1996
- [Kra10] KRAHE, D.: Low Frequency Noise - Strain on the Brain. In: *14th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control* (2010)
- [Kra11] KRAHE, D.: Warum kann tieffrequenter Schall so belastend sein? In: *Lärmbekämpfung* (2011)
- [Lev03] LEVENTHALL, G.: A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. In: *Department of Environment, Food and Rural Affairs, London* (2003)
- [Lev08] LEVENTHALL, G.: Low Frequency Noise. What we know, what we do not know, and what we would like to know. In: *12th International Meeting on Low Frequency Noise and Vibration and its Control* (2008)
- [Lev09] LEVENTHALL, G.: Low Frequency Noise and Annoyance. In: *Noise and Health* (2009)
- [LPB03] LEVENTHALL, G. ; PELMEAR, P. ; BENTON, S.: A Review of Published Research on Low Frequency Noise and its Effects. In: *Collection* (2003)
- [Lue37] LUEG, P.: *Verfahren zur Daempfung von Schallschwingungen*. 1937
- [MH00] MOSCHYTZ, G.S. ; HOFBAUER, M.: *Adaptive Filter*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2000
- [MP09] MOLLER, H. ; PEDERSEN, C.S.: Hearing at Low and Infrasonic Frequencies. In: *Noise and Health* (2009)
- [PFW10] PEDERSEN, E. ; FORSSEN, J. ; WAYE, K. P.: Human perception of sound from wind turbines. In: *Swedish Environmental Protection Agency: Report 6370* (2010)

- [PLDWSK03] PAWLACZYK-LUSZCZYNSKA, M. ; DUDAREWICZ, A. ; WASZKOWSKA, M. ; SLIWINSKA-KOWALSKA, M.: Assessment of annoyance from low frequency and broadband noises. In: *International Journal of Occupational Medicine and Environmental Health* (2003)
- [Sch06] SCHIRMER, W.: *Technischer Lärmschutz*. Springer, 2006
- [SH10] SALT, A. N. ; HULLAR, T. E.: Responses of the ear to low frequency sounds, infrasound and wind turbines. In: *Hearing Research* 268 (2010), S. 12–21
- [Sim55] SIMSHAUSER, E.D.: The Noise-Cancelling Headset - An Active Ear Defender. In: *JASA* 27.1 (1955), S. 207. issn: 0001-4966 (1955)
- [SL12] SALT, A. N. ; LICHTENHAN, J. T.: Perception-based protection from low-frequency sounds may not be enough. In: *Internoise* (2012)
- [SNK11] SCHUPP, J. ; NELKEN, I. ; KING, A.: *Auditory Neuroscience*. The MIT Press, 2011
- [SS06] SCHMIDT ; SCHAIBLE: *Neuro- und Sinnesphysiologie*. Springer Medizin Verlag, 2006
- [SYM04] SUBEDI, J. K. ; YAMAGUCHI, H. ; MATSUMOTO, Y.: Masked perception thresholds of low frequency tones under background noises and their estimation by loudness model. In: *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control* 23 (2004), S. 145 – 157. – Maskierung
- [VHH98] VARY, P. ; HEUTE, U. ; HESS, W.: *Digitale Sprachsignalverarbeitung*. B.G. Teubner Stuttgart, 1998
- [Way09] WAYE, K. P.: Effects of Low Frequency Noise on Sleep. In: *Noise and Health* (2009)
- [WBKB09] WAYE, K. P. ; BENGTTSSON, J. ; KJELLBERG, A. ; BENTON, S.: Low frequency noise "pollution" interferes with performance. In: *Noise and Health* (2009)
- [WK11] WEIGLER, T. ; KRAHÉ, D.: The influence of synchrony in audio-visual stimuli on annoyance. In: *Polish-German Structured Conference on Acoustics OSA* (2011)
- [WKK11] WEIGLER, T. ; KLEINHENRICH, C. ; KRAHÉ, D.: Multi-sensorische Wahrnehmung und Wirkung bei Präsenz von tieffrequentem Lärm. In:

Fortschritte der Akustik, 37. Jahrestagung für Akustik, DAGA 2011, Düsseldorf (2011), S. 335–336

- [WY10] WATANABE, T. ; YAMADA, S.: Auditory masking of low-frequency sound and the relation between masking characteristic and psychological response. In: *Journal of low frequency noise, vibration and active control* 29 No. 2 (2010), S. 73 – 89
- [ZF90] ZWICKER, E. ; FASTL, H.: *Psychoacoustics*. Springer Verlag, 1990
- [ZTL01] ZACHAROV, N. ; TUOMI, O. ; LORHO, G.: Auditory periphery, HRTF's and directional loudness perception. In: *Audio Engineering Society, 110th convention, Amsterdam* (2001)

Abbildungsverzeichnis

1.1	Spektrogramm aus dem Haus Betroffener	2
2.1	Querschnitt durch das Gehör	6
2.2	Querschnitt durch eine Windung der <i>cochlea</i>	8
2.3	Seitenansicht der abgerollten <i>cochlea</i>	9
2.4	Schematische Ansicht der Hörbahn	10
2.5	Richtungshören durch Laufzeitunterschied	12
2.6	Frequenzabhängige Verstärkung durch die Kopfanatomie	13
2.7	Die Hörfläche	14
2.8	Maskierung durch weißes Rauschen	16
2.9	Maskierung durch einen 1kHz Ton	17
2.10	Zeitliche Maskierung	18
2.11	Zusammenhang zwischen Frequenz und Tonheit	19
2.12	Auf die Länge der <i>cochlea</i> bezogene Tonheitsskalen	20
2.13	Kurven gleicher Lautheit	21
2.14	Lautheitsverdoppelung	22
2.15	Schärfe von Rauschsignalen	23
2.16	Schwankungsstärke von verschiedenen Signalformen	24
2.17	Schwankungsstärke abhängig von dem Schalldruckpegel	25
2.18	Schwankungsstärke abhängig von der Modulationstiefe	26
2.19	Schwankungsstärke von amplitudenmodulierten Rauschsignalen	27
2.20	Rauheit eines 1-kHz-Tons in Abhängigkeit vom Modulationsgrad.	28
2.21	Rauheit eines Sinustons in Abhängigkeit von Träger- und Modulations- frequenz	29
2.22	Erklärung des Boxplots	31
2.23	Hörversuch 1: Spektrum des akustischen Stimulus	32
2.24	Hörversuch 1: Verlaufsdiagramm	34
2.25	Hörversuch 1: Boxplot der Lästigkeit der Einzelstimuli	35
2.26	Hörversuch 1: Boxplot der Lästigkeit des audiovisuellen Stimulus	36
2.27	Hörversuch 1: Prozentuale Anzahl richtiger Antworten	37
2.28	Hörversuch 1: Prozentuale Anzahl richtiger Antworten	38
2.29	Hörversuch 1: Temperaturverlauf der Probanden	39

2.30	Hörversuch 1: Pulsverlauf der Probanden	39
2.31	Hörversuch 2: Spektrum der akustischen Stimuli	41
2.32	Hörversuch 2: Quetschball	44
2.33	Hörversuch 2: Verlaufsdiagramm	45
2.34	Hörversuch 2: Boxplot der Lästigkeit der Stimuli aus DG1	46
2.35	Hörversuch 2: Boxplot der Druckwerte aus DG1	48
2.36	Hörversuch 2: Boxplot der Lästigkeit der Stimuli aus DG2	49
2.37	Hörversuch 2: Boxplot der Druckwerte aus DG2	50
2.38	Hörversuch 3: Verlaufsdiagramm	54
2.39	Hörversuch 3: Boxplot der Antworten aus DG3	55
2.40	Hörversuch 4: Spektrum der Stimuli	57
2.41	Hörversuch 4: Spektrum des Rauschsignals	57
2.42	Hörversuch 4: Verteilung der EEG-Elektroden	59
2.43	Hörversuch 4: EEG-Kappe	60
2.44	Hörversuch 4: Verlaufsdiagramm	60
2.45	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEGs von Proband 5	64
2.46	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEGs von Proband 8	65
2.47	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEGs von Proband 11	66
2.48	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 1	68
2.49	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 2	69
2.50	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 3	70
2.51	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 4	71
2.52	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 5	72
2.53	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 6	73
2.54	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 7	74
2.55	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 8	75
2.56	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 9	76
2.57	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 10	77
2.58	Hörversuch 4: EEG-Karten Proband 11	78
2.59	Hörversuch 4: Korrelation zwischen Elektroden gegenüberliegender Ge- hirnhälften - I	80
2.60	Hörversuch 4: Korrelation zwischen Elektroden gegenüberliegender Ge- hirnhälften - II	81
3.1	Spektrogramm aus dem Haus Betroffener	85
3.2	Reflexion als Leistungsbetrachtung	94
3.3	Raummoden im zweidimensionalen Raum	99
3.4	Abmessungen FC 1.19	101
3.5	1 1 0 Mode in FC 1.19	103

3.6	2 0 0 Mode in FC 1.19	104
3.7	Einfluss der Lautsprecherposition auf die Modenausbildung	105
3.8	Einfluss der Lautsprecherposition auf die Modenausbildung	106
3.9	Einfluss der Lautsprecherposition auf die Modenausbildung	107
3.10	Schematischer Aufbau des Feedforward ANC Systems.	109
3.11	Schematischer Aufbau des Feedback ANC Systems.	110
3.12	Signalflussgraph des grundlegenden LMS Algorithmus.	110
3.13	Signalflussgraph des FXLMS Algorithmus.	113
3.14	Signalflussgraph eines einfachen ANC Systems mit FX-NLMS	114
3.15	Dämpfung der 1 0 0 Mode mit dem einfachen ANC System	115
3.16	Signalflussgraph der linearen Prädiktion.	116
3.17	Signalflussgraph der adaptiven linearen Prädiktion.	116
3.18	Signalflussgraph des neuen ALPC-ANC Systems.	117
3.19	Reaktion der ALPC auf verschiedene Eingangssignale Teil 1.	119
3.20	Reaktion der ALPC auf verschiedene Eingangssignale Teil 2.	120
3.21	Messung der 2 1 0 Mode mit ausgeschaltetem ALPCANC System.	122
3.22	Messung der Kombination von 1 0 0 und 2 1 0 Mode mit aktivem ALPCANC System.	122
5.1	Hörversuch 1: Empfundene Lästigkeit der einzelnen Probanden (Kon- trollgruppe)	127
5.2	Hörversuch 1: Empfundene Lästigkeit der einzelnen Probanden (Test- gruppe)	128
5.3	Hörversuch 1: Richtige Antworten Kontrollgruppe	129
5.4	Hörversuch 1: Richtige Antworten Kontrollgruppe	130
5.5	Hörversuch 1: der einzelnen Probanden, Kontrollgruppe	131
5.6	Hörversuch 1: Körpertemperatur der einzelnen Probanden, Testgruppe	132
5.7	Hörversuch 1: Puls der einzelnen Probanden, Kontrollgruppe	133
5.8	Hörversuch 1: Puls der einzelnen Probanden, Testgruppe	134
5.9	Hörversuch 2: Einzelantworten der Probanden aus dem ersten Durchgang	135
5.10	Hörversuch 2: Einzelantworten der Probanden aus dem zweiten Durch- gang	136
5.11	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 1	137
5.12	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 2	138
5.13	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 3	139
5.14	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 4	140
5.15	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 6	141
5.16	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 7	142
5.17	Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 9	143

5.18 Hörversuch 4:Spektrogramm des EEG von Proband 10 144

Tabellenverzeichnis

2.1	Hörschwelle unterhalb von 200 Hz	15
2.2	Beispiel Daten	30
2.3	Hörversuch 1: Verwendete Stimuli	33
2.4	Hörversuch 1: Länge der Reaktionstests	37
2.5	Hörversuch 2: Stimuli in Durchgang 1	43
2.6	Hörversuch 2: Stimuli in Durchgang 2	43
2.7	Hörversuch 2: Ausgewählte Antworten	51
2.8	Hörversuch 3: Verwendete Stimuli	53
2.9	Hörversuch 4: Probanden	58
2.10	Hörversuch 4: Reihenfolge der LFN Stimuli	61
3.1	Raummoden in FC 1.19	102
3.2	Ergebnisse des Vergleichs zwischen ANC und ALPCANC System	121

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

Wuppertal den 21. September 2017

Tobias Weigler

