

Auswirkungen von periodischen Reflexionen in kleinen Räumen auf die Hörsamkeit

Bachelor-Thesis

zur Erlangung des akademischen Grades B.Sc.

Studiengang Medientechnik

Anouschka Esselun

6221576



Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg
Fakultät Design, Medien und Information
Department Medientechnik

Erstprüferin: Prof. Dr. Eva Wilk

Zweitprüfer: Dr. Hans Hansen

Hamburg, Juli 2015

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Periodische Reflexionen	3
2.1	Übersicht	3
2.1.1	Echo und Flutterecho	3
2.1.2	Klangecho	4
2.1.3	Auftreten	4
2.1.4	Maßnahmen	5
2.2	Raumakustische Parameter für periodische Reflexionen	6
2.2.1	Nachhallzeit	6
2.2.2	Zeitlicher Aufbau des Schallfelds	7
2.2.3	Echokriterium	8
2.2.4	Tannenbaum Kriterium	10
2.2.5	Autokorrelation	10
2.3	Psychoakustische Parameter	11
2.3.1	Rauigkeit	11
2.3.2	Schwankungsstärke	12
3	Raumakustische Modellierung	13
3.1	Verfahren raumakustischer Simulationen	13
3.2	Die Software EASE	15
3.2.1	Raumkonfigurationen	15
3.3	Vorgehensweise	17
3.3.1	Simulation	18
3.4	Zusammenfassung	20
4	Analyse der Impulsantworten	23
4.1	Übersicht	23
4.2	Tannenbaum Kriterium	24
4.3	Echokriterium	24
4.4	Nachhallzeit	25
4.5	Weitere Hörsamkeitsparameter	28
4.6	Autokorrelation	28
4.7	Pegeldifferenz	30
4.7.1	Pegeldifferenz ΔL aus dem Energie-Zeit-Diagramm	30
4.7.2	Pegeldifferenz ΔL aus dem Echokriterium	34
4.8	Rauigkeit	38
4.9	Zusammenfassung	40

Inhaltsverzeichnis

5 Hörversuch	41
5.1 Methode	41
5.2 Stimuli	42
5.2.1 Simulierte Räume	42
5.2.2 Geräusche	43
5.2.3 Lautheit	44
5.3 Darbietung	44
5.4 Durchführung	45
5.5 Ergebnisse	45
5.5.1 Versuchspersonen	46
5.5.2 Statistische Größen	47
5.5.3 Korrelationen	48
5.5.4 Faktorenanalyse	48
5.5.5 Analyse der Varianzen und Konfidenzintervalle	51
5.6 Diskussion	56
6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse	58
6.1 Nachhallzeit	58
6.2 Rauigkeit	59
6.3 Amplitudenschwankung	59
6.4 Lästigkeit	62
6.5 Diskussion	62
7 Fazit	65
A Anhang	67
A.1 Kopfhörerentzerrung	67
A.1.1 Messung	67
A.1.2 Ergebnis	67
A.2 Messgeräte und Programme	69
A.3 Hörversuch	70
A.3.1 Adjektive	70
A.3.2 Fragebogen	70
A.3.3 Beurteilung der Stimuli	73
A.3.4 Faktorenanalyse	83
A.3.5 Lautheit der Stimuli	86
A.4 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse	87
A.5 Matlab Codes	89
B CD	96
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	99
Literaturverzeichnis	100

Abstract

This thesis examines the effects of periodic reflections in small rooms on the acoustical quality and their detection from the impulse response. Two parallel opposite walls that are not acoustically dampened but reverberative lead to periodic reflections. If other room boundaries are dampened, these reflections can cause an audible flutter echo.

Based on an acoustical simulation of a small room (wall distance 5 m), where the absorption coefficients of the opposite walls were varied, listening tests were conducted. These tests have shown that at low absorption coefficients of the opposite walls the sound quality is evaluated fluttering, unclear and annoying if other room boundaries are dampened. The rating differs depending on both the absorption coefficient and the sound event.

The analysis of the room impulse responses shows that no existing common roomacoustic criterion detects flutter echoes in small rooms. The impulse responses show strong periodic amplitude fluctuations due to the flutter echoes. Following the existing echo criterion according to Dietsch and Kraak (1986) the portion of periodic reflections of the impulse response is calculated by means of the level spread between periodic and other reflections. The comparison with the results of the listening test shows high agreement with the subjective evaluation of fluttering.

Zusammenfassung

Diese Arbeit untersucht die Auswirkungen periodischer Reflexionen in kleinen Räumen auf die Hörsamkeit und deren Detektionsmöglichkeiten aus der Impulsantwort. Zwei zueinander parallele Wände, die nicht bedämpft, sondern schallhart sind, führen zu periodischen Reflexionen. Wenn weitere Raumbegrenzungsflächen stark bedämpft sind, können die periodischen Reflexionen zu einem hörbaren Flatterecho führen.

Auf Basis einer akustischen Simulation eines kleinen Raumes (Wandabstand 5 m), in der die Absorptionsgrade gegenüberliegender Wände variieren, wurden Hörversuche durchgeführt. Diese Versuche haben gezeigt, dass bei niedrigen Absorptionsgraden der gegenüberliegenden Wände der Klangeindruck als flatternd, lästig und unklar bewertet wird, wenn weitere Begrenzungsflächen bedämpft sind. Die Bewertung unterscheidet sich stark je nach Schallereignis und Absorptionsgrad.

Die Analyse der Impulsantworten zeigt, dass kein gängiges raumakustisches Kriterium Flatterechos in kleinen Räumen detektiert. Die Impulsantworten zeigen jedoch deutlich periodische Amplitudenschwankungen, bedingt durch die Flatterechos. In Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986) wird der Anteil periodischer Reflexionen der Raumimpulsantwort anhand der Pegeldifferenz zwischen periodischen und restlichen Reflexionen berechnet. Der Vergleich mit den Hörversuchsergebnissen zeigt hohe Übereinstimmung mit der Subjektivbewertung des Flatterns.

1 Einleitung

Die vorliegende Arbeit untersucht periodische Reflexionen in kleinen Räumen und deren Auswirkungen auf die Hörsamkeit sowie Detektionsmöglichkeiten für periodische Reflexionen aus der Impulsantwort.

Periodische Reflexionen in Räumen entstehen durch schallharte parallele Raumbegrenzungsflächen. Je größer der Abstand der Begrenzungsflächen zueinander (Wandabstand oder Abstand zwischen Decke und Boden), desto größer ist die Periodendauer dieser Reflexionsfolge. Je nach Raumstruktur und Schallereignis gibt es die Praxiserfahrung, dass der Raumklang als anstrengend bezeichnet wird und auch in kleinen Räumen der Nachhall flatternd, scheppernd oder schnarrend klingt, obwohl die Nachhallzeit im Empfehlungsbereich der DIN 18041 (2004) liegt und die Wandabstände nicht zu Zeitdifferenzen führen, die echokritisch sind.

Zur Detektion von Flatterechos bestehen bereits Untersuchungen und objektive Kriterien. Das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986), welches aus der Impulsantwort gebildet wird, ist ursprünglich zur Erkennung von einzelnen Echos konzipiert. Es kann jedoch auch für Flatterechos verwendet werden, die durch periodische Überschreitung der sog. *Echogrenze* detektiert werden. Das Kriterium *zeitliche Diffusität* nach Kuttruff (1965/66) betrachtet die Autokorrelation der Impulsantwort und soll Aufschluss über die Gleichmäßigkeit des Nachhallvorgangs liefern. Die Autokorrelationsfunktion macht periodische Anteile, beispielsweise durch Flatterechos, in der Impulsantwort sichtbar. Außerdem liefert ein Rauigkeitsalgorithmus erste Ergebnisse in der Detektion von Flatterechos (Frey et al. 2014).

Genannte Kriterien beziehen sich hauptsächlich auf Flatterechos in großen Räumen mit Wandabständen ab ca. 8,5 m, die zu einer mehrfachen Wahrnehmung des Direktschallereignisses führen. In kleinen Räumen, mit Wandabständen $\leq 8,5$ m entsteht hingegen ein schnarrender Klangeindruck (Mommertz und Müller-BBM 2008) und es ist nicht hinreichend untersucht, inwiefern die vorhandenen Parameter auch hier zur Detektion beitragen können.

Es besteht kein Parameter, welcher bei raumakustischen Messungen zur Erkennung von Flatterechos auch explizit in kleinen Räumen dient. Des Weiteren ist die subjektive Wirkung periodischer Reflexionen bei kleinen Wandabständen und unterschiedlichen Schallereignissen und ob es zu einer systematisch verminderten Hörsamkeit kommt ungeklärt. Daraus ergibt sich die Fragestellung, wie periodische Reflexionen die Hörsamkeit in kleinen Räumen beeinflussen und detektiert werden können.

Um sich dieser Frage anzunähern, wird zunächst ein kleiner rechteckiger Raum (Grundfläche $5 \times 6 \text{ m}^2$), in dem es zu periodischen Reflexionen kommt, in unterschiedlichen Konfigurationen raumakustisch simuliert. Das Raumvolumen beträgt 72 m^3 . Variiert wird der Absorptionsgrad von zwei gegenüberliegenden Wänden

1 Einleitung

mit einem Abstand von 5 m.

Die Simulation liefert Impulsantworten der verschiedenen Raumkonfigurationen, welche im Hinblick auf objektive raum- und psychoakustische Parameter untersucht werden, wie beispielsweise einem Echokriterium und der Rauigkeit. Es wird ein Kriterium zur Detektion periodischer Reflexionen entwickelt.

Zur subjektiven Bewertung der Hörsamkeit dient ein Hörversuch. Mithilfe von Ratingskalen wird die Hörsamkeit unterschiedlicher Geräusche bei verschiedenen Raumkonfigurationen bewertet. Es wird überprüft, ob ein niedrigerer Absorptionsgrad gegenüberliegender paralleler Wände negative Auswirkungen auf die Hörsamkeit hat, die sich in einer verminderten Bewertung der Klarheit, höherer Lästigkeit und Flattern äußert. Abschließend werden die Ergebnisse des Hörversuchs den objektiven Parametern gegenübergestellt.

2 Periodische Reflexionen

Dieses Kapitel gibt eine Übersicht periodischer Reflexionen. Zunächst wird darauf eingegangen, wie periodische Reflexionen zu Flatterechos und Klangechos führen, unter welchen Umständen sie auftreten können und welchen Klangeindruck sie erzeugen.

Daraufhin wird aufgezeigt, welche objektiven Kenngrößen zur Beurteilung der Hörsamkeit für periodische Reflexionen relevant sind und mit welchen psychoakustischen Begriffen Flatterechos in Zusammenhang stehen. Es wird der Frage nachgegangen, inwieweit die jeweiligen Parameter auch für Flatterechos in kleinen Räumen (Wandabständen unter 8,5 m) gelten.

2.1 Übersicht

2.1.1 Echo und Flatterecho

Ein Flatterecho ist die periodische Aneinanderreihung mehrerer Echos. Unter einem Echo wird im Allgemeinen ein Rückwurf des Schalls, der den Eindruck der Wiederholung des Schallsignals erweckt, verstanden, dementsprechend eine deutlich hörbare Wiederholung des Direktschallereignisses verursacht. Entscheidend dafür ist, dass die Reflexion zeitlich derart verzögert am Ohr eintrifft, dass diese getrennt vom Direktschallsignal wahrgenommen wird. Ob die Schallereignisse getrennt wahrgenommen werden, ist vom Schallsignal und der Zeitdifferenz des Echos abhängig. Kurze Geräusche wie Knallen oder Klatschen sind bereits ab einer kurzen Laufzeitdifferenz (unter 50 ms) getrennt wahrnehmbar. Anders bei Sprache oder Musik. Hier werden bei Zeitdifferenzen von 50 ms zwischen Direktschall und Reflexion bei Sprache und 80 ms bei Musik vom Ohr getrennte Signale, sprich Echos registriert (Weinzierl 2008: 197). Bei mehrfacher Wiederholung des Direktschallereignisses kann von einem *Mehrfachecho* gesprochen werden.

Als Mehrfachecho lassen sich auch periodische Reflexionen bezeichnen. Der Begriff *Flatterecho* basiert auf der Wirkung dieser periodischen Reflexionen. Dabei ist zunächst unklar, für welche Zeitabstände der Reflexionen ein *flatternder* Klangeindruck wahrgenommen wird. Nach Möser (2004: 340) werden periodisch wiederkehrende Folgen von Rückwürfen in einem Raum bei größeren Verzögerungszeiten als Flatterecho bezeichnet und sind besonders unangenehm.

Cremer und Müller (1978: 64) hingegen merken an, dass Mehrfach-Echos besonders oft bei kleinen Wandabständen bzw. Verzögerungszeiten zu hören sind und dann als Flatterecho bezeichnet werden. Das Geräusch dieser Erscheinung erinnert an das Geräusch eines flatternden Vogels. Ein schnarrendes Flatterecho ist bei Wandabständen von 7 m hörbar. (Cremer und Müller 1978: 64)

2.1.2 Klangecho

Ist die Verzögerungszeit zwischen Rückwürfen sehr klein, so werden die mehrfachen Rückwürfe nicht mehr als Flatterecho bezeichnet, sondern als Klangecho (Cremer und Müller 1978: 62).

Bei einem Klangecho folgen die einzelnen Echoimpulse sehr dicht aufeinander, sodass sie vom Ohr nicht mehr als einzelne Schallsignale, sondern als Klang wahrgenommen werden. Dieser Klang besitzt die Periodendauer des Abstands zweier dieser Echos. Beschriebenes Phänomen weisen Amphitheater mit hohen Bänken auf, wenn diese unbesetzt sind. Dieser Fall beschreibt jedoch mehrere Echos und keine mehrfachen Echos. Mehrfach-Echos treten auf, wenn gleiche Schallwellenanteile zwischen Wänden hin und her geworfen werden (Cremer und Müller 1978: 62). Mehrere Echos, bzw. Klangechos, sind in der Raumakustik demnach weniger zu finden, da es sich bei zwischen Wänden hin und her geworfenen Schallanteilen um Mehrfach-Echos handelt und derartig kurze Zeitabstände nicht erreicht werden. Periodische Reflexionen zwischen Wänden mit kleinem Abstand verursachen demzufolge kein Klangecho, sondern Mehrfach-Echos bzw. Flatterechos.

2.1.3 Auftreten

Die Problematik von Flatterechos ist im Allgemeinen auf große Räumen mit Wegdifferenzen über 17 m bezogen, die zu einer periodischen Wiederholung des Direktschallereignisses führen. Dies wird häufig als störend und unangenehm wahrgenommen (Fasold und Veres 2003: 159).

Praxiserfahrungen zeigen jedoch, dass es ebenfalls in kleinen Räumen zu Problemen durch Flatterechos kommen kann. Betroffene Räume haben stets zwei gegenüberliegende, parallele Wände, die unbedämpft sind, eine schematische Darstellung ist Abbildung 2.1 zu entnehmen. Wahrnehmbar ist allgemein ein *unklarer* Raumklang, der Schallereignisse verwischt klingen lässt. Besonders bei schnell abklingenden, transienten Geräuschen kann ein scheppernder oder flatternder Nachhall hörbar sein.

Eine verminderte Hörsamkeit kann durch unterschiedliche Aspekte begünstigt werden. In Bezug auf Flatterechos spielen sowohl die Raumstruktur, die Möblierung als auch das Schallereignis eine Rolle.

Für die Struktur eines Raums ist sowohl die Primär- als auch die Sekundärstruktur bedeutsam. Die Primärstruktur beschreibt die Raumgröße und Raumform, die Sekundärstruktur die Oberflächenbeschaffenheit der Raumbegrenzungsflächen sowie Einrichtungsgegenstände und Anordnungen. Beide Aspekte können Flatterechos begünstigen. Bei der Primärstruktur tritt diese Begünstigung durch zueinander parallel stehende Wände auf, sekundär, wenn diese Begrenzungsflächen unbedämpft, also unbedämpft, sind. Bei der Sekundärstruktur spielt außerdem die Verteilung von schallabsorbierenden Flächen eine Rolle. Ist der Raum in eine Richtung unbedämpft und in die andere stark bedämpft (z.B. durch Schallabsorber oder Möbel), werden Flatterechos besonders begünstigt und durch das Fehlen anderer starker Reflexionen demaskiert. Es kann demnach passieren, dass beispielsweise beim Austausch einer wenig absorbierenden Decke, ein Flatterecho hervortritt,

2 Periodische Reflexionen

das vorher bei längerem Nachhall im Raum nicht wahrnehmbar war; Flatterechos können immer dann auftreten, wenn eine Raumrichtung deutlich weniger bedämpft wird als die anderen Raumrichtungen (Nocke 2014: 121).

Raumbeispiele können ganz allgemein Wohnräume sein, wie auch Räume von Kindertagesstätten. In Kitas kann es häufig zu lauten Geräuschen kommen. Wenn zusätzlich noch eine nachteilige Raumakustik vorhanden ist, können Geräusche besonders lästig und unangenehm klingen, selbst wenn die Nachhallzeit dieser Räume im Normalbereich ist (entspricht Anforderung der DIN 18041 (2004)). Beschrieben wird der Nachhall kurzer Geräusche oft mit einem „Nachscheppern“.

Ein schnarrender Nachhall wird beispielsweise bei einem Wandabstand von 7 m festgestellt. Diese Erscheinung lässt sich häufig in einseitig möblierten Zimmern beobachten und vermutet wird meist einen Gegenstand, der mitzittert. (Cremer und Müller 1978: 64)

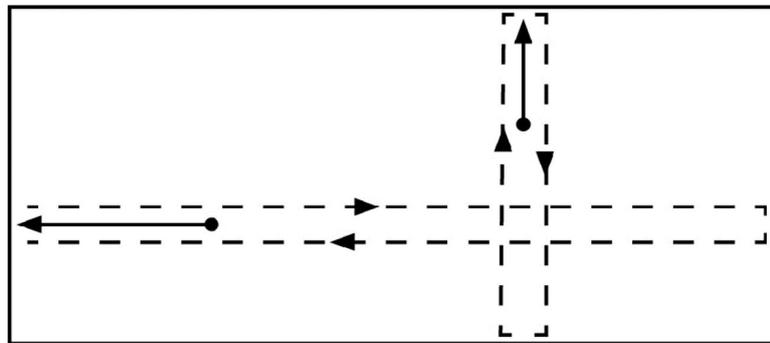


Abbildung 2.1: Schematische Darstellung von Flatterechos (DIN 18041 2004), die Wände sind unbedämpft, der Schall wird zwischen ihnen hin und her geworfen

2.1.4 Maßnahmen

Periodische Reflexionen werden durch genannte Raumstrukturen begünstigt und können zu hörbaren Flatterechos führen. Im Folgenden werden Maßnahmen genannt, die durch Veränderung der Raumstruktur zur Beseitigung von Flatterechos dienen.

In kleinen Räume mit rechtwinkligem Grundriss und ebenen schallharten Wänden können nach DIN 18041 (2004) Flatterechos auftreten, falls die Decke vollständig schallabsorbierend bekleidet ist. Dies kann durch ein mittleres schallreflektierendes Deckenfeld vermieden werden. Diese schallreflektierende Fläche sollte durch teilweise schallabsorbierende Wände ausgeglichen werden (DIN 18041 2004: 21).

Explizit nur für „*Mitteltgroße Räume und kleine Hallen mit Volumina von etwa 250 m³ bis 5000 m³*“ empfiehlt DIN 18041 (2004), dass parallele Flächen im Raum ohne zusätzliche raumakustische Maßnahmen (schallabsorbierend, diffus streuend oder mindestens 5° geneigt) vermieden werden sollten.

Diese Empfehlung ließe sich auch auf kleine Räume mit Volumina unter 250 m^3 übertragen. Nocke (2014: 121) rät ergänzend an, schallabsorbierende Flächen möglichst gleichmäßig zu verteilen. Flächen sollten in zwei, idealerweise allen drei Raumrichtungen mit Schallabsorbern belegt sein, eine alleinige Belegung der Decke ist nicht zu empfehlen (Nocke 2014: 121). Grundsätzlich gilt, Flatterechos durch schallabsorbierende Maßnahmen an den parallelen schallharten Flächen, welche zu periodischen Reflexionen des Schalls führen, zu beseitigen. Cremer und Müller (1978: 64) zeigt zusätzlich die gegenteilige Methode auf. Ein Flatterecho lässt sich folglich ebenfalls durch das Einbringen zusätzlicher reflektierender Flächen beseitigen.

2.2 Raumakustische Parameter für periodische Reflexionen

Es existieren eine Vielzahl raumakustischer Parameter, mit denen die Hörsamkeit anhand von Raumimpulsantworten beurteilt werden kann.

Der Begriff Hörsamkeit wurde von Cremer und Müller (1978) für die Beschreibung der Eignung eines Raumes für bestimmte akustische Darbietungen eingeführt. Gemäß Nocke (2014: 110) wird die Hörsamkeit eines Raums durch die Raumgeometrie, Auswahl und Verteilung schallabsorbierender und schallreflektierender Flächen, die Nachhallzeit und den Gesamtstörschalldruckpegel beeinflusst.

Für die Beurteilung der Hörsamkeit eines Raumes sind raumakustische Kriterien vorhanden. Die Hörsamkeit ist abhängig von Schallsender- und Schallempfängerposition sowie vom Schallsignal selbst. Je nach Nutzungsart kann es unterschiedliche Anforderungen geben, was eine gute Hörsamkeit ausmacht. Anhaltspunkte für eine gute Hörsamkeit geben objektive Parameter bzw. Hörsamkeitsparameter zur Beschreibung der Raumakustik. Für sie gibt es im Allgemeinen Richtwerte für eine gute Hörsamkeit. Die Hörsamkeit kann auch als die Eignung des Raums für bestimmte Nutzungsprofile bezeichnet werden oder als akustische Gesamtqualität eines Raums.

Im Folgenden werden relevante Hörsamkeitsparameter aufgezeigt und analysiert, inwieweit sie mit periodischen Reflexionen, besonders bei kurzen Wegdifferenzen, in Zusammenhang stehen und sie detektieren können.

2.2.1 Nachhallzeit

Die Nachhallzeit ist die bekannteste Kenngröße, wenn es um die raumakustische Beschreibung von Räumen geht. Sie beschreibt, wie viel Zeit vergeht, bis nach Abschalten einer Schallquelle in einem Raum der Schalldruckpegel um 60 dB abgeklungen ist und ist frequenzabhängig.

Für kleine Räume (hier beispielsweise für ein Raumvolumen von 72 m^3) empfiehlt DIN 18041 (2004) für eine gute Hörsamkeit eine Nachhallzeit $T_{\text{soil}} = 0,8 \text{ s}$ für Musik, $0,7 \text{ s}$ für Sprache und $0,6 \text{ s}$ für Unterricht. Nun treten Flatterechos jedoch auch in Räumen auf, dessen Nachhallzeit angemessen ist und sind weit-

gehend unabhängig von der über den gesamten Raum gemittelten Nachhallzeit. Vielmehr ist bei Flatterechos eine richtungsabhängige Nachhallzeit von Bedeutung. Die Energie zwischen den parallelen, Flatterecho-auslösenden Wänden bleibt länger erhalten, als die in andere Raumrichtungen. Dies ist auf die unterschiedlichen Absorptionsgrade zurückzuführen. Hohe Absorptionsgrade und damit eine geringe Nachhallzeit zwischen den restlichen Wänden, lassen Flatterechos zwischen anderen Begrenzungsflächen erst demaskiert hörbar werden (Nocke 2014: 121). Für Räume mit unregelmäßiger Absorptionsverteilung lässt sich nach DIN EN 12354-6 (2004) die richtungsabhängige Nachhallzeit berechnen.

Die gemittelte von Raumposition und Richtung unabhängige Nachhallzeit kann als objektive Kenngröße demnach kein Flatterecho beschreiben.

2.2.2 Zeitlicher Aufbau des Schallfelds

Eine Vielzahl raumakustischer Parameter beruht auf der Annahme, dass Schalenergie innerhalb bestimmter Verzögerungszeiten zum Direktschall nützlich ist und danach einer guten Hörsamkeit entgegenwirkt. Die Darstellung eines schematischen Reflektogramms in Abbildung 2.2 von Fasold und Veres (2003) zeigt diese Einteilung. Die Impulsantwort bzw. das Reflektogramm setzt sich zusammen aus Direktschall, Anfangsreflexionen und dem Nachhall, der aus späten Reflexionen besteht. Für Sprache sind Reflexionen bis 50 ms im Allgemeinen nützlich für eine höhere Lautstärke sowie für die Verständlichkeit. Bei Musik nützen Reflexionen bis zu einer Verzögerungszeit von 80 ms einer höheren Lautstärke und Durchsichtigkeit.

Tabelle 2.1 gemäß Mommertz und Müller-BBM (2008: 13) bringt Zeit- und Wegdifferenzen mit den subjektiven Wirkungen in Verbindung und beinhaltet auch periodische Reflexionen. Ebenfalls werden hier nützliche Reflexionen für Sprache bis 50 ms und für Musik bis 80 ms aufgeführt. Treten Reflexionen nach diesen Zeiträumen auf, kann ein Echo hörbar werden. Periodischen Reflexionen wird keine bestimmte Zeitdifferenz zum Direktschall zugeordnet. Es wird jedoch angegeben, dass ab einer Wegdifferenz kleiner 17 m (bzw. ca. 50 ms) ein schnarrender Klangeindruck entsteht.

Ein raumakustischer Parameter, der auf den Verzögerungszeiten beruht, ist das Deutlichkeitsmaß C_{50} für Sprache. Es berechnet sich nach

$$C_{50} = 10 \log\left(\frac{E_{50}}{E_{\infty} - E_{50}}\right) [\text{dB}],$$

folglich aus dem Verhältnis der Energie der ersten 50 ms zur restlichen Energie der Impulsantwort. Auf ein starkes Echo außerhalb der ersten 50 ms könnte ein geringes Deutlichkeitsmaß hindeuten. Analog hierzu existiert das Klarheitsmaß C_{80} für Musik.

Die Schwerpunktzeit t_s soll Auskunft über die Durchsichtigkeit geben. Je geringer sie ist, desto früher ist das Energiemaximum der Impulsantwort. Ein Richtwert ist 60 ms bis 80 ms für Sprache und 70 ms bis 150 ms für Musik. Berechnet wird

2 Periodische Reflexionen

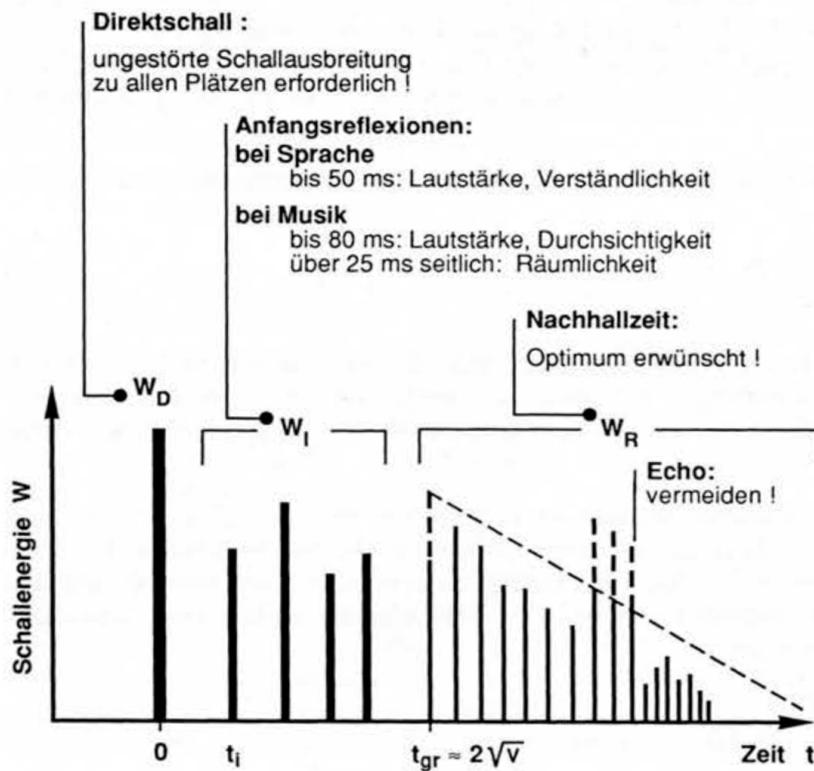


Abbildung 2.2: Schema eines Reflektogramms mit der Darstellung von Direktschall, Anfangsreflexionen, Nachhall und Echo. Dargestellt ist die Schallenergie über die Zeit (Fasold und Veres 2003: 149)

sie anhand folgender Formel (Weinzierl 2008: 197):

$$t_s = \frac{\int_0^{\infty} p(t)^2 t dt}{\int_0^{\infty} p(t)^2 dt} \text{ [s]}$$

Die Maße C_{50} , C_{80} und t_s können nur beschränkt Flatterechos und Echos berücksichtigen, da die Energieanteile der Echos im späten Teil der Impulsantwort im Gegensatz zu den Anfangsreflexionen sehr hoch sein müssen.

Es ist zu überprüfen, ob Impulsantworten, die ein Flatterecho enthalten (wodurch ggf. eine subjektiv geringere Klarheit vorhanden ist) auch einen niedrigen C_{50} , C_{80} -Wert oder eine höhere Schwerpunktszeit aufweisen (siehe Kapitel 4).

2.2.3 Echokriterium

Eine späte Wiederholung des Direktschallereignisses kann zur Wahrnehmung eines Echos führen. Dazu muss die späte Reflexion nicht nur eine entsprechende Laufzeitverschiebung, sondern auch im Vergleich zum Direktschall einen hohen Schalldruckpegel aufweisen. Ob aufgrund einer Verzögerungszeit ein Echo hörbar ist oder nicht, hängt außerdem mit der Art des Direktschallereignisses zusammen und dem zeitlichen Auflösungsvermögen des Gehörs. Die Detektion auf hörbare Echos ermöglicht beispielsweise das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986).

2 Periodische Reflexionen

Tabelle 2.1: Subjektive Wirkung einzelner Reflexionen bzw. Reflexionsfolgen gemäß Mommertz und Müller-BBM (2008: 13). Gegenübergestellt wird die Zeit- und Wegdifferenz zwischen Direktschall und Reflexionen der subjektiven Wirkung

Zeitdifferenz	Wegdifferenz	Subjektive Wirkung
≤ 1 ms	$\leq 0,3$ m	Klangverfärbung, ggf. Verschiebung der Schallquellenlokalisierung
1 ms - 50 ms	0,3 m - 17 m	Erhöhung der Deutlichkeit von Sprache durch subjektive Verstärkung des Direktschalls
1 ms - 80 ms	0,3 m - 27 m	Erhöhung der Transparenz von Musik, falls Reflexionen aus seitlichen Richtungen eintreffen: Erhöhung des akustischen Räumlichkeitseindrucks
≥ 50 bzw. 80 ms	≥ 17 bzw. 27 m	Echo, d.h. doppelte Wahrnehmung des Schallsignals
Periodische Reflexionen in gleichen Zeitabständen		Flatterecho: mehrfache Wahrnehmung des Schallsignals, bei Wegunterschieden ≤ 17 m schnarrender Klangeindruck

Es soll dazu dienen, einzuschätzen, ob eine Impulsantwort eine deutlich hörbare Wiederholung des Direktschallereignisses auslöst und orientiert sich dazu an einer Echogrenze. Diese ist für Sprache und Musik verschieden, da Sprachmotive im Versuch zur Bestimmung der Echoschwelle wesentlich echokritischer als Musik waren (Dietsch und Kraak 1986).

Zunächst wird die Aufbaufunktion $t_s(\tau)$ gebildet, die für $n = 2$ der Schwerpunktzeit t_s (siehe Abschnitt 2.2.2) und dem ersten Moment der quadrierten Impulsantwort entspricht. Für Musik ist $n = 1$ und für Sprache beträgt $n = 2/3$.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |p(t)|^n t dt}{\int_0^\tau |p(t)|^n dt}$$

Eine starke Reflexion in der Impulsantwort äußert sich in der Aufbaufunktion $t_s(\tau)$ als ruckartiger Anstieg. Das Echokriterium $EK(\tau)$ ist der über die Aufbaufunktion gleitende Differenzenquotient. Der Differenzenquotient gibt die Steigung der Aufbaufunktion an, mit unterschiedlichen Zeitdifferenzen für Musik ($\Delta\tau = 14$ ms) und Sprache ($\Delta\tau = 9$ ms).

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta\tau}$$

Die Grenzwerte EK_{grenz} wurden durch Versuche von Dietsch und Kraak (1986) festgelegt. Bei $EK_{\text{grenz},50\%} = 1,0$ für Musik fühlen sich demnach 50% der Menschen durch das Echo gestört und bei Sprache liegt der Wert bei 1,8.

Wird der Grenzwert in periodischen Zeitabständen überschritten, wird ein Flatterecho hörbar (Weinzierl 2008:198). Es ist unklar, ob das Kriterium auch für

Flatterechos in kleinen Räumen befriedigende Ergebnisse liefert. Schließlich wären die Zeitabstände kürzer als bei typischen Echos, für die das Kriterium das eigentliche Werkzeug darstellt.

2.2.4 Tannenbaum Kriterium

Das Tannenbaum Kriterium beschreibt keinen numerischen Parameter, sondern einen optischen. Betrachtet wird die Raumimpulsantwort mit ihrem typisch exponentiell abklingenden Zeitverlauf. Wird die Darstellung der Raumimpulsantwort um 90° gegen den Uhrzeigersinn gedreht, ergibt sich ein Tannenbaum-ähnliches Bild (Görne 2011:90). Der Direktschall befindet sich unten und nach oben hin klingt die Impulsantwort ab. Gemäß des Kriteriums wird nun nach „Ästen“ gesucht, die später als 50 ms deutlich aus der Tannenbaum-Silhouette herausragen und deshalb als Echo hörbar sein können. Ragen Äste in periodischen Zeitabständen aus der Silhouette heraus, kann ein Flatterecho der Grund dafür sein. Gemäß des Tannenbaum Kriteriums sollte der abklingende Zeitverlauf der Impulsantwort möglichst gleichmäßig sein. Zur quantitativen Analyse eignet sich dieses Kriterium nicht, da es keine Zahlenwerte oder Maßstäbe liefert. Es kann jedoch in der Praxis als grobe qualitative Beurteilung von Raumimpulsantworten verwendet werden.

2.2.5 Autokorrelation

Kuttruff (1965/66) entwickelte das Kriterium *zeitliche Diffusität*, welches aus der Autokorrelationsfunktion berechnet wird und Raumeigenschaften beschreiben soll.

Die Autokorrelation gibt an, wie ähnlich das um $t - \tau$ verschobene Signal dem ursprünglichem Signal $x(t)$ ist. Die Formel für die Autokorrelation $r_{xx}(\tau)$ des Signals $x(t)$ lautet

$$r_{xx}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t + \tau)dt = x^*(-\tau) * x(\tau)$$

x^* stellt die konjugiert komplexe Form von x dar.

Für diskrete Signale, demnach auch Impulsantworten in digitaler Form, ergibt sich statt dem Integral die Summe

$$r_{xx}(k) = \sum_n x(n) \cdot x(n + k)$$

k steht für die diskrete Verschiebung des Signals um k Samples.

Die Autokorrelationsfunktion soll erkennbar machen, wie unregelmäßig die den Nachhall bildenden Rückwürfe zeitlich verteilt sind. Kuttruff setzt dazu die Spitze der Autokorrelationsfunktion bei $\tau = 0$ ins Verhältnis zum Rest der Autokorrelationsfunktion. Quantitativ wird die Hauptspitze, demnach bei $\tau = 0$, ins Verhältnis zum nächsthöchsten Wert gesetzt:

$$\Delta = \frac{r_{xx}(0)}{\text{Max}(r_{xx})}$$

Das Hauptmaximum der Autokorrelationsfunktion bei $\tau = 0$ enthält alle Zufallskomponenten einer Rückwurffolge. Je größer diese Zufallskomponenten zum

2 Periodische Reflexionen

höchsten periodischen Anteil der Autokorrelationsfunktion sind, desto höher ist die zeitliche Diffusität.

Dieses Kriterium trifft noch keine Aussage über eventuell wahrnehmbare Echos oder Flatterechos. Ist das erste Nebenmaximum im Verhältnis zum Hauptmaximum sehr hoch, ist die zeitliche Diffusität niedrig, jedoch kann das erste Nebenmaximum auch sehr nah an $\tau = 0$ liegen. Wenn dies der Fall ist, wäre kein Flatterecho oder Echo hörbar (jedoch eventuell eine Klangfärbung), da die Zeitdifferenz zu gering ist.

Srodecki (1994) analysierte zusätzlich zur Autokorrelationsfunktion das Leistungsspektrum von Raumimpulsantworten und untersuchte auf diese Weise die Nachhallqualität. Beide geben Aufschluss über die Zufallskomponenten im Hauptmaximum und die restlichen Reflexionen in Nebenmaxima. Sie zeigen, wie gleichmäßig verteilt Reflexionen in der Impulsantwort sind und inwieweit Zufälligkeit oder Periodizität vorliegen. Im Gegensatz zur Autokorrelation wird beim Cepstrum das Leistungsdichtespektrum der Fouriertransformierten logarithmiert. Durch die Logarithmierung ändern sich die Amplituden der Spektrum-Koeffizienten, dies kann Periodizität deutlicher sichtbar machen, das Grundprinzip von Autokorrelationsfunktion und Cepstrum ist jedoch ähnlich.

Eine periodische Raumimpulsantwort liefert eine periodische Autokorrelationsfunktion. Die Autokorrelationsfunktion von einer Raumimpulsantwort sollte demnach periodische Anteile, z.B. durch Flatterechos, in einer Impulsantwort sichtbar machen und Informationen über die Rückwurfstatistik vermitteln. Dafür müssen zusätzlich die Zeitabstände betrachtet werden und ob diese ein hörbares Echo oder Flatterecho zulassen oder lediglich eine Klangfärbung.

2.3 Psychoakustische Parameter

Zusätzlich zu den raumakustischen Kenngrößen zur Analyse und Beschreibung von Flatterechos werden auch psychoakustische Aspekte betrachtet, die mit Flatterechos in Verbindung gebracht werden. Flatterechos erzeugen einen charakteristischen subjektiven Klangeindruck, der durch psychoakustische Begriffe beschreibbar ist.

2.3.1 Rauigkeit

Die Rauigkeit stellt eine wichtige Empfindungsgröße bei der Charakterisierung von Geräuschen dar und wird beispielsweise durch rasche Amplitudenschwankungen des Schallsignals hervorgerufen (DIN 1320 2009). Rauigkeit wird normalerweise durch die Hörempfindung auf einer Skala von *glatt* bis *rau* skaliert, die Hörempfindung kann auch als *schnarrend* oder *brummend* beschrieben werden. Gemäß Fastl und Zwicker (2007) wird Rauigkeit am stärksten bei einem 1kHz-Ton, der mit einer Frequenz von 70 Hz amplitudenmoduliert wird, wahrgenommen und in der Einheit „asper“ als 1 definiert. Rauigkeit tritt ab einer Amplitudenschwankung von circa 15 Hz auf und kann bis ca. 300 Hz wahrgenommen werden.

2 Periodische Reflexionen

Der Nachhall, den Flatterechos erzeugen, besteht aus periodischen Amplitudenschwankungen. Es ist anzunehmen, dass Flatterechos einen rau klingenden Nachhall verursachen können und daher auch hier den Begriff Rauigkeit zu verwenden.

Nicht nur in Bezug auf den Klangeindruck, sondern auch bei der Detektion von Flatterechos ist Rauigkeit relevant. Nach Frey et al. (2014) könnte ein Rauigkeitsalgorithmus Flatterechos detektieren. Im Rahmen von Versuchen lieferte die Rauigkeit erste gute Ergebnisse in der Detektion von Flatterechos (Frey et al. 2014).

Hauptsächlich wird die Empfindungsgröße zur Beurteilung der Soundqualität, besonders in Bezug auf Motorengeräusche, verwendet. Allgemein korreliert Rauigkeit hoch mit der wahrgenommenen Unangenehmheit und Lästigkeit von Sound (Vorländer et al. 2008:264). Auch Fastl und Zwicker (2007:243) schreiben der Rauigkeit einen elementaren Einfluss auf den Wohlklang zu.

2.3.2 Schwankungsstärke

Der psychoakustische Begriff Schwankungsstärke beschreibt eine Hörempfindung, die, wie Rauigkeit, durch Amplitudenschwankungen ausgelöst wird. Hier ist die Schwankungsstärke als 1 „vacil“ definiert, die bei einem 1 kHz Ton, der mit 4 Hz amplitudenmoduliert ist, empfunden wird. Bis zu einer Modulationsfrequenz von 20 Hz kann Schwankungsstärke stark vorhanden sein. Für Frequenzen ab 20 Hz herum gibt es einen Übergangsbereich zwischen Schwankungsstärke und Rauigkeit, welcher nicht durch eine starre Grenze zwischen beiden Empfindungen gekennzeichnet ist (Fastl und Zwicker 2007:247). Flatterechos sind in der Impulsantwort als Amplitudenschwankungen zu finden. Je nach Raumgröße bzw. Verzögerungszeiten könnte diese sich im Bereich von Schwankung befinden, beispielsweise würde ein Wandabstand von 15 m eine Amplitudenschwankung des Flatterechos von 11 Hz verursachen. Inwieweit die subjektive Wahrnehmung von Flatterechos in kleinen Räumen als schwankend, flatternd oder rau bezeichnet werden kann ist jedoch fraglich.

3 Raumakustische Modellierung

Ein Raum, der für Flatterechos anfällig ist, wird raumakustisch simuliert. Es wird mit einer Simulation gearbeitet, da hier die akustischen Eigenschaften des Raums einfacher variabel sind als in einem realen Raum. Erzeugt werden Impulsantworten, für die gezielt Absorptionsgrade von einzelnen Raumbegrenzungsflächen verändert werden. Die Simulation ermöglicht die Erzeugung von Impulsantworten und somit die Auralisation; der simulierte Raum wird hörbar gemacht.

3.1 Verfahren raumakustischer Simulationen

Programme zur raumakustischen Simulation¹ erlauben die Konstruktion eines virtuellen Raums. Es werden Raumgeometrie und Details des Raums, z.B. Oberflächenbeschaffenheit, eingegeben sowie die Absorptionsgrade und Diffusitätsgrade der Begrenzungsflächen, die im Raum vorhanden sind. Es gibt grundsätzlich unterschiedliche Verfahren, die bei der raumakustischen Simulation zur Anwendung kommen. Hier werden das Spiegelschallquellenverfahren und die Strahlverfolgungsmethode betrachtet.

Das Spiegelschallquellenverfahren stellt geometrisch gerichtete Reflexionsvorgänge anhand von Spiegelschallquellen dar, siehe Abbildung 3.1. Eine Schallquelle erzeugt an den Begrenzungsflächen des Raums Spiegelschallquellen. Diese werden bis zur gewünschten Ordnung durch Spiegelung an den Wänden konstruiert. Abschließend werden die Schallstrahlen von der Schallquelle bis zum Empfänger berechnet. Bei der Ausbreitung werden Energieverluste berücksichtigt, zum einen durch Luftabsorption, Absorption der Begrenzungsflächen und zum anderen geometrischer Ausbreitung. Nicht alle der ermittelten Spiegelschallquellen sind am Empfangsort auch tatsächlich „sichtbar“, d.h. dass geometrisch ein sinnvoller Weg zurückgelegt wird. Diese Sichtbarkeit muss noch zusätzlich für jede Spiegelschallquelle überprüft werden.

Durch diese Methode werden die geometrischen Reflexionen in einem Raum genau berechnet. Bei diesem geometrischen Verfahren werden die Welleneigenschaften des Schalls; Streuung und Beugung sowie die Eigenfrequenzen des Raums jedoch nicht berücksichtigt. Außerdem steigt der Rechenaufwand mit steigender Spiegelschallquellen-Ordnung und Anzahl der Raumbegrenzungsflächen exponentiell an (Weinzierl 2008: 245).

Ein weiteres Verfahren der raumakustischen Simulation ist die Strahlverfolgungsmethode, das sogenannte *Ray Tracing*. Prinzipiell gehen hier von der Schallquelle Schallteilchen aus, bei der jedes einen Ausschnitt einer Kugelwelle reprä-

¹beispielsweise *CATT*, *EASE* oder *ODEON*

3 Raumakustische Modellierung

sentiert. Die Wege der einzelnen Schallteilchen werden verfolgt, die Wandoberflächen werden geprüft, um Reflexionspunkte unter Einbeziehung von Absorption und Streuung zu finden. Auf dem Weg der Schallteilchen wird ihre Energie durch geometrische Ausbreitung und die Absorptionsgrade der Oberflächen, an denen Reflexionen stattfinden, reduziert. Wenn diese Reduzierung einen bestimmten Wert erreicht oder eine bestimmte Verfolgungszeit überschreitet, wird die Strahlenverfolgung beendet. Treffen Schallteilchen den Bereich des Empfängers, werden Zeit und Energie registriert. Aus diesen Daten wird letztendlich die Impulsantwort ermittelt. Diese Methode stellt räumlich und zeitlich eine näherungsweise Berechnung der spiegelnden Reflexionen dar, die Ergebnisse sind weniger exakt als die der Spiegelschallquellenmethode. Der Rechenaufwand nimmt proportional zur Anzahl der Raumbegrenzungsflächen zu und das Verfahren ist weniger zeitaufwändig als das Spiegelschallquellenverfahren. Außerdem kann theoretisch Streuung und Beugung berücksichtigt werden (Weinzierl 2008: 245).

Hybride Verfahren kombinieren die beiden vorgestellten Verfahren und nutzen die jeweiligen Vorteile. Ray Tracing wird zur Identifikation hörbarer Schallstrahlenwege verwendet. Diesen werden Spiegelschallquellen zugeordnet. Wie beim Spiegelschallquellenverfahren werden auf dem Weg der Schallstrahlen von Quelle zu Empfänger nun die Absorptionsgrade der Begrenzungsflächen sowie Luftabsorption und Energieverluste aufgrund geometrischer Ausbreitung berücksichtigt. Das Verfahren hat deutliche zeitliche Vorteile, da nicht im Nachhinein alle Schallwege auf geometrische Plausibilität überprüft werden, sondern im Vorhinein.

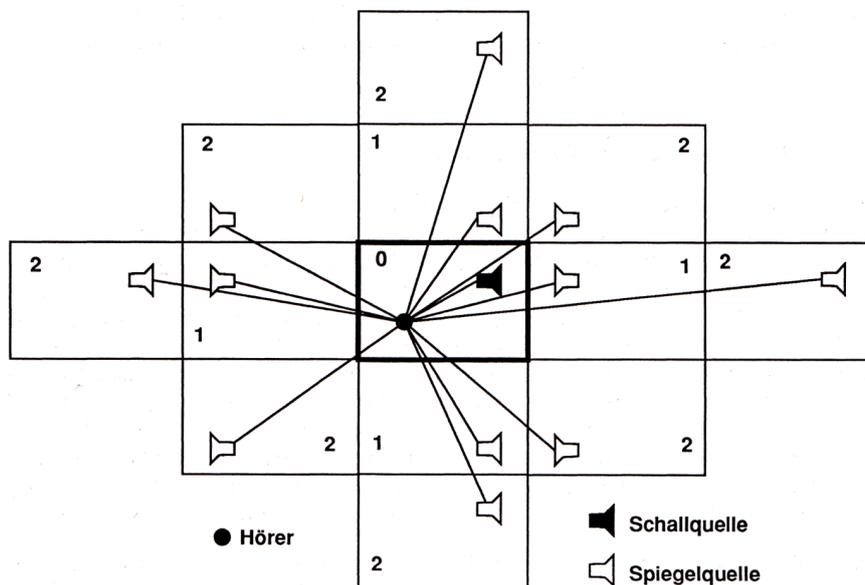


Abbildung 3.1: Zweidimensionale Darstellung der Spiegelschallquellen 1. und 2. Ordnung eines rechteckigen Raums (Fasold und Veres 2003: 106)

3.2 Die Software EASE

Für die Simulation wird die Software EASE² in der Version 4.3 verwendet. EASE stellt verschiedene Methoden und Module zur Simulation zur Verfügung. Für die Berechnung von Impulsantworten für die Auralisation wurde das Modul *Aura Response* verwendet, das auf CAESAR basierenden Algorithmen basiert. Dabei werden zwei Verfahren kombiniert. Für frühe geometrische Reflexionen wird ein hybrides Spiegelschallquellenverfahren verwendet. Der spätere Bereich wird mithilfe des Schallteilchenverfahrens mit gleichförmiger Richtungsverteilung berechnet. Abschließend werden die Ergebnisse beider Teile zusammengefügt (Renkus-Heinz Inc. 2009: 262). Für die Simulation gibt es einstellbare Parameter, die in Tabelle 3.2 zu finden sind. Für die Verfolgung einzelner Reflexionen wurde das Modul *Ray Tracing and Mirror Images* angewandt. Es beruht auf dem Prinzip der Strahlverfolgung.

3.2.1 Raumkonfigurationen

Für die Simulation von periodischen Reflexionen in kleinen Räumen werden die Raumeigenschaften entsprechend gewählt. Anhand von Praxiserfahrung, in welchen Räumen Flatterechos beispielsweise hörbar sind, wurde die Raumgeometrie ausgewählt. Die Grundfläche beträgt $6\text{ m} \times 5\text{ m}$. Bei einer Raumhöhe von $2,4\text{ m}$ beträgt das Raumvolumen 72 m^3 . Die Abmessungen des Raumes wurde nicht variiert. Schallquelle und Empfänger wurden gegenüberliegend platziert. Beide hatten einen Abstand von 3 m zueinander. Der Empfänger war an einer 6 m langen Wand platziert, mit einem Abstand von $0,9\text{ m}$. Die Schallquelle war an der gegenüberliegenden 6 m langen Wand mit einem Abstand von $1,1\text{ m}$ platziert. Schallquelle und Empfänger hatten eine Höhe von $1,2\text{ m}$ über dem Boden, was ungefähr einer normalen Sitzhöhe entspricht. Zu beachten war hier, keine symmetrischen Positionen zu wählen, die dann zufällig einzelne Reflexionen überlagern lassen und zu einem Spezialfall führen. Als Quelle war in EASE eine Abstrahlcharakteristik zu wählen oder auch ganz bestimmte Lautsprechertypen. Es wurde eine Kugel-Abstrahlcharakteristik ausgewählt.

In der Simulation war das Wandmaterial und der daraus resultierende Absorptionsgrad auszuwählen und die Diffusität des Materials. Standardmäßig wurde eine Diffusität von 0 eingestellt. Dies bedeutet, dass es sich um glatte Oberflächen handelt, die den Schall nicht streuen. Bei den Wandmaterialien gibt es die Möglichkeit, den Absorptionsgrad über alle Frequenzen gleich zu halten oder zu variieren. Hier wurde sich für einen geraden Verlauf der Absorptionsgrade entschieden, also gleicher Absorptionsgrad über alle Frequenzen.

Es verschiedene Möglichkeiten, welche Absorptionsgrade für welche Raumbegrenzungsflächen variiert und fest gehalten werden, um die Anteile von periodischen Reflexionen in der Impulsantwort zu verändern. Im Folgenden werden drei Möglichkeiten kurz vorgestellt und die passendste schließlich umgesetzt. Die Wände, die periodische Reflexionen auslösen sollen, werden dafür als „Flatterecho-

²EASE: Enhanced Acoustic Simulator for Engineers

3 Raumakustische Modellierung

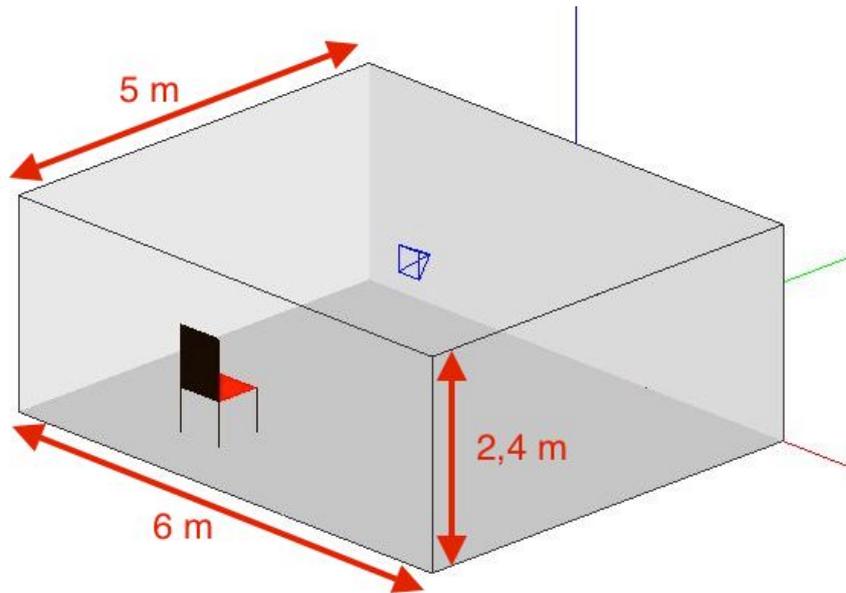


Abbildung 3.2: Screenshot des in EASE simulierten Raumes mit Raumabmessungen: Die Quelle ist der blaue Lautsprecher, der Abhörplatz der rote Sitzplatz

Wände“ bezeichnet. Diese zwei Wände liegen direkt vor und hinter dem Abhörplatz. Sie haben Abmessungen von jeweils $6\text{ m} \times 2,4\text{ m}$. Die Raummaße sind Abbildung 3.2 zu entnehmen.

Es gibt die Möglichkeit, den Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände zu variieren und den der restlichen Begrenzungsflächen beizubehalten. Die Nachhallzeit würde sich bei der Variation ändern.

Das Gegenteil ist auch denkbar: die Flatterecho-Wände mit gleichem Absorptionsgrad zu haben und die restlichen Schallabsorptionswerte zu variieren. Auch hier würde sich die Nachhallzeit ändern. Realitätsnah wäre diese Konfiguration ebenfalls kaum. Bei einem störenden Flatterecho würde in der Praxis der Raum selten insgesamt halliger gestaltet werden.

Die dritte Möglichkeit ist, alle Absorptionsgrade dahingehend zu verändern, dass die Nachhallzeit gleich bliebe und sich nur das Verhältnis des Absorptionsgrades der Flatterecho-Wände zu den restlichen Oberflächen ändert. Es würden also alle Absorptionsgrade variiert werden. Vorteilig wäre die konstante Nachhallzeit. Nachteilig hingegen wieder die fehlende Praxisnähe und die Schwierigkeit, einer gleichen Nachhallzeit mit der Simulation gerecht zu werden.

Schlussendlich wurde die erste Möglichkeit ausgewählt: der Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände wurde variiert, der der restlichen Raumbegrenzungsflächen beibehalten. Sie ist am realitätsnächsten, da in der Praxis ein Flatterecho auch direkt an den Wänden, an denen es entsteht gedämpft wird und deren Absorptionsgrad sich hiermit ändert. Dass die Nachhallzeit sich hier ändert, lässt sich nicht verhindern, da mit einem anderen Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände sich die Nachhallzeit ebenfalls ändert. Durch mehrmaliges simulieren und probetören wur-

3 Raumakustische Modellierung

den die Absorptionsgrade ausgewählt. Als Extrembeispiel sollten die Flatterecho-Wände einen α -Wert von 0 aufweisen. Es galt, den Absorptionsgrad der anderen Wände so auszuwählen, dass der gewünschte Effekt hörbar ist, sich nicht zu synthetisch anhört und auch wertmäßig nicht realitätsfern ist. Aus diesen Gründen wurde den restlichen Oberflächen ein Absorptionsgrad von 0,6 zugewiesen.

Allgemein ist der Raum simpel aufgebaut, da er nur aus seinen Begrenzungsflächen ohne weiteres Mobiliar besteht. Dies hilft, die Konfiguration einfach zu halten und die Impulsantwort nachvollziehbarer zu machen.

Tabelle 3.1: Raumkonfigurationen der Simulation

Bezeichnung	α	α
	Flatterecho-Wände	restliche Begrenzungsflächen
0006	0	0,6
00506	0,05	0,6
0106	0,1	0,6
01506	0,15	0,6
0206	0,2	0,6
02506	0,25	0,6
0306	0,3	0,6
Ref	0,5	0,5

3.3 Vorgehensweise

Der Raum wurde wie angegeben in *EASE* simuliert. Für die Auralisation werden Berechnungsparameter angegeben, damit die Ergebnisse für die Anwendung passend sind. Sie sind im Folgenden erläutert. Die *Partikelanzahl* wurde auf die höchste Auflösung gestellt. Die Länge der Impulsantworten beträgt einheitlich 1 Sekunde. Die Anzahl der verfolgten Strahlen wird über den Durchmesser, welche die Zählkugel nach 1 Sekunde Laufzeit hat, festgelegt. Bei feiner Raumstruktur sollte der Durchmesser klein sein, als Richtwert dient der Durchmesser der kleinsten Teilfläche im Raum. Es wurde ein Durchmesser von 2 m gewählt. Die *Cut-Off-Order* gibt an, bis zu welcher Reflexionsordnung die Berechnung mittels Spiegelschallquellenmethode durchgeführt wird. Überhalb dieser Ordnung wird das statistische Schallteilchenverfahren angewandt. Da in vorliegender Simulation Flatterechos zu erwarten waren, wurde der Maximalwert 30 gewählt. Der *Dichtefaktor* wurde mit 20 angegeben. Er gibt die Anzahl der Impulse pro Millisekunde an, die für den späten Anteil in der Impulsantwort verwendet werden. Das Programm akzeptiert Werte zwischen 10 und 30, hier wurde die Standardeinstellung gewählt. Der Parameter *Tail Resolution* bestimmt die zeitliche Auflösung für die Berechnung des späten Anteils des Echogramms. Er gibt die Breite des Zeitfensters an, das für die Energieverteilung im späten Anteil verwendet wird. Einstellungen von 1 bis 10 ms sind akzeptabel, hier wurde 2 ms verwendet. Einstellbar war außerdem noch der

3 Raumakustische Modellierung

Standardwert für den Streuungsgrad für Wandmaterialien, dessen Streuungsgrad nicht hinterlegt ist. In dieser Simulation waren alle Streuungsgrade bereits durch das Material definiert und betragen 0. Die Option *Diffuse Rain* wurde deaktiviert. Sie ist bei sehr halligen Räumen oder Räumen mit abgeteilten Bereichen nützlich, da weitere Schallstrahlen generiert werden (Renkus-Heinz Inc. 2009).

Tabelle 3.2: Eingestellte Parameter für die EASE Aura Response Calculation: *Particles* entspricht der Partikelanzahl, *Length* der Impulsantwortlänge, *Density Factor* gibt den Dichtefaktor an und *Tail Resolution* die zeitliche Auflösung des späten Echogramm-Teils

EASE Aura Response Calculation	
Particles	very high resolution
Length	1000 ms
Max Diameter after 1s	2 m
Cut Off Order	30
Density Factor	20
Tail Resolution	2 ms
Default Value Surfaces with our Scattering Data	20
Number of Calculation Threads	1
Diffuse Rain	off

3.3.1 Simulation

Bei einer Auralisation ist mit einer Abweichung zum realen Klang zu rechnen. Die Simulation kann nur ein Modell sein, sowohl bei der Raumkonstruktion als auch bei der eigentlichen Berechnung / Auralisation wird auf diverse Details verzichtet.

Trotz dieser Einschränkungen stellt die Auralisation hier ein adäquates Mittel zur Beurteilung unterschiedlicher Raumkonfigurationen dar. Nachdem alle Parameter eingegeben sind, hat bei diesem Raum die eigentliche Berechnung circa 45 Minuten pro Raumkonfiguration gedauert. Die Impulsantworten werden anschließend im .wav-Format exportiert. Betrachten lässt sich zuvor noch das Reflektogramm, in Abbildung 3.3 beispielsweise das für die Raumkonfiguration 0006.

Neben der Impulsantwort liefert EASE weitere Darstellungen und Kalkulationsmöglichkeiten, u.a. die Option *Find Impacts* im Modul *Ray Tracing and Mirror Images*. Zweck ist hier keine Berechnung der Impulsantwort als .wav-Datei zur Auralisation, sondern die Strahlverfolgung. Bei dieser Kalkulation sendet der Lautsprecher eine festgelegte Anzahl an Strahlen aus (hier 100000) und es wird gespeichert, welche Schallstrahlen den Empfänger treffen. Registriert wird dabei der Weg des Schallstrahls, die Zeitverzögerung, mit dem der Empfänger erreicht wird und der Schalldruckpegel. Für eine angemessene Berechnungszeit, wird die

3 Raumakustische Modellierung

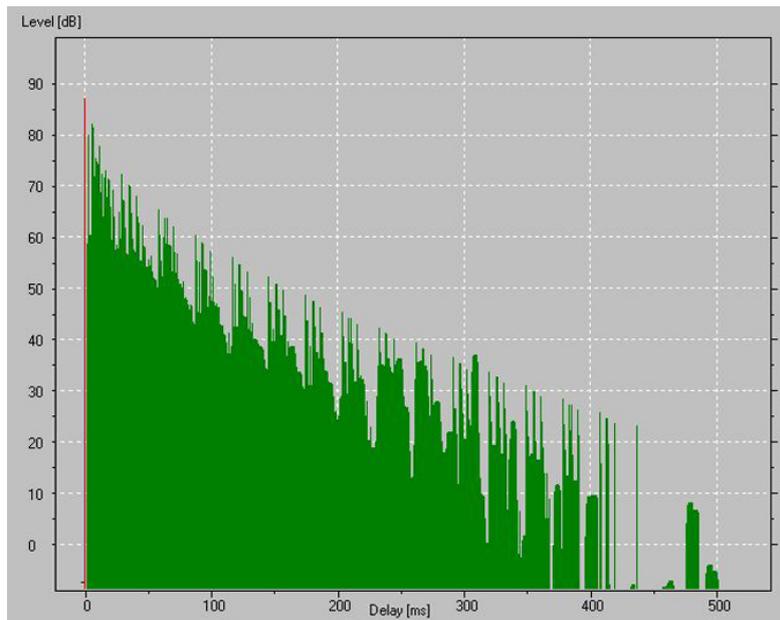


Abbildung 3.3: EASE Screenshot: Reflektogramm der Raumkonfiguration 0006. Dargestellt sind die Pegel der einzelnen Reflexionen über die Zeit

Strahlenverfolgung bis zur 10. Ordnung durchgeführt. Standardmäßig sendet der Lautsprecher mit einem Pegel von 97 dB über den Frequenzbereich 20 Hz bis 20 kHz. Die vorgenommenen Einstellungen haben zu insgesamt 1255 Treffern der Schallstrahlen auf den Empfänger geführt. Es werden einzelne Schallstrahlen verfolgt und im Reflektogramm betrachtet.

Zunächst werden die 6 Reflexionen erster Ordnung betrachtet, siehe Abbildung 3.4. Diese Reflexionen laufen alle jeweils über eine der 6 Begrenzungsflächen des Raums vom Sender zum Empfänger.

Mithilfe der Strahlverfolgung können einzelne Strahlenwege den Reflexionen im Reflektogramm zugeordnet werden. Im Reflektogramm (Abb. 3.3) ist sichtbar, dass in periodischen Abständen eine Folge von hohen Peaks auftritt. Dazwischen liegen jeweils Reflexionen mit niedrigerem Pegel. Die hohen periodischen Peaks werden vom Flatterecho zwischen den Wänden F2 und F3 verursacht, was mithilfe der Strahlenverfolgung nachzuvollziehen ist. Das Reflektogramm für die Strahlenverfolgung ist grober aufgelöst und kürzer als das in Abbildung 3.3, für die Verfolgung einiger Strahlen jedoch ausreichend (für die Auralisation wurde eine ausführlichere Berechnung durchgeführt).

Abbildung 3.5 zeigt eine periodische Reflexion zwischen den Wänden F2 und F3 und deren zugehörigen Peak im Reflektogramm. Der Strahl läuft zu Wand F2, F3, F2 und wieder F3, bevor er schließlich mit einer Verzögerung von circa 60 ms nach dem Direktschall beim Empfänger mit einem Pegel von 69 dB ankommt. Ähnlich verhält es sich mit anderen Reflexionen, die Teil der periodischen Reflexionen sind. Ein weiteres Beispiel zeigt Abbildung 3.6. Auch hier läuft der Strahl ausschließlich über beide Flatterecho-Wände, bis er circa 64 ms später als der Direktschall beim Empfängerplatz mit einem Schalldruckpegel von 69 dB ankommt,

3 Raumakustische Modellierung

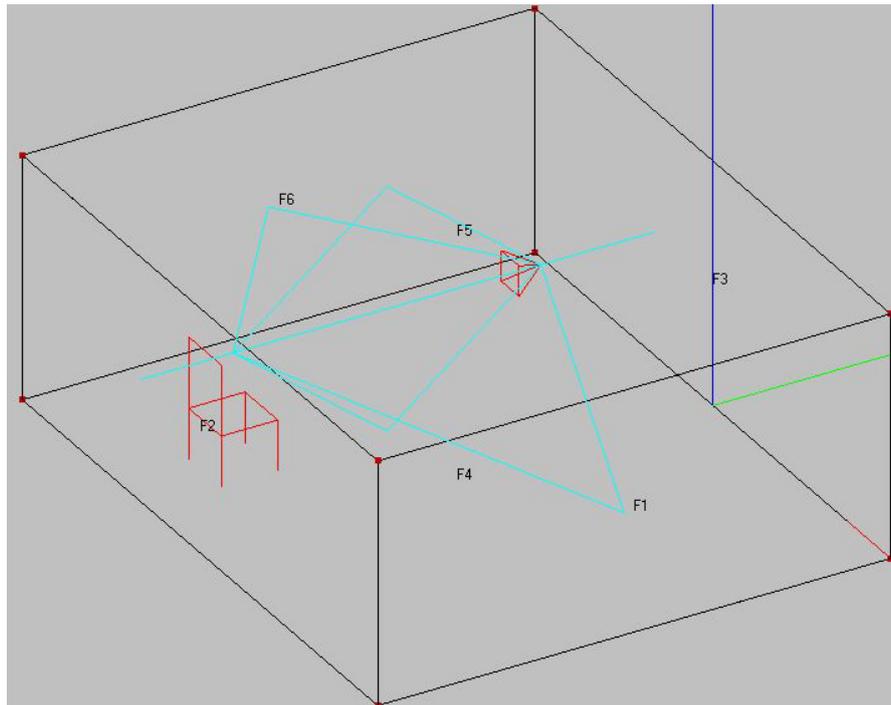


Abbildung 3.4: EASE Screenshot: Strahlenverfolgung der Raumkonfiguration 0006. Die Flutterecho-Wände sind mit F2 und F3 beschriftet, F4 und F5 sind Boden und Decke und F1 und F6 sind die anderen beiden Seitenwände. Die blauen Linien zeigen die Strahlenwege der Reflexionen erster Ordnung

was 17 dB Pegelminderung gegenüber dem Direktschall entspricht.

Es stellt sich noch die Frage, wie die Reflexionen zwischen den periodischen Flutterecho-Anteilen im Reflektogramm einzuordnen sind. Die Analyse mittels EASE zeigt, welche Wege diese Strahlen zurücklegen. Es gibt Strahlen, die ausschließlich über die Begrenzungsflächen, die einen niedrigeren Absorptionsgrad aufweisen (Seitenwände, Decke und Boden) reflektiert werden. Wieder andere Strahlen laufen sowohl über die Flutterecho-Wände, als auch über weitere Wände. Abbildung 3.7 zeigt einen Reflexionsweg, der zu einer zwischen den periodischen Reflexionen liegenden Reflexion liegt. Der Strahlenweg geht hier ausschließlich über die Seitenwände F1 und F6. Es sind jedoch auch Reflexionen vorhanden, die sowohl über Flutterecho-Wände, als auch über die anderen Wände zum Empfänger gelangen, siehe Abbildung 3.8.

3.4 Zusammenfassung

In der Simulation wird der Absorptionsgrad der Flutterecho-Wände geändert. Die Vergrößerung des Absorptionsgrads hat zunächst einen Einfluss auf die periodischen Reflexionen, die auch klar im Reflektogramm auszumachen sind. Ihr Pegel sinkt dadurch. Der Pegel der restlichen Reflexionen verhält sich unterschiedlich.

3 Raumakustische Modellierung

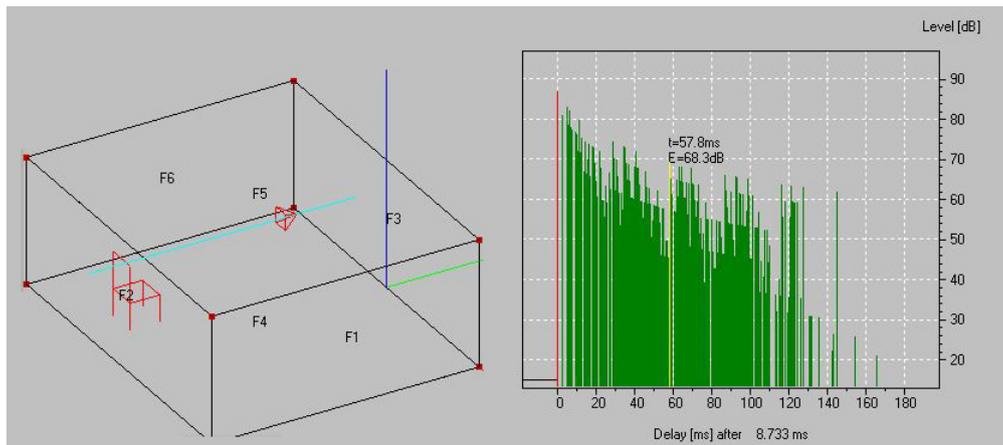


Abbildung 3.5: EASE Screenshot: Strahlenverfolgung der Raumkonfiguration 0006 und dazugehörige Reflexion (gelb markiert) im Reflektogramm. Der Strahl läuft über beide Flatterecho-Wände.

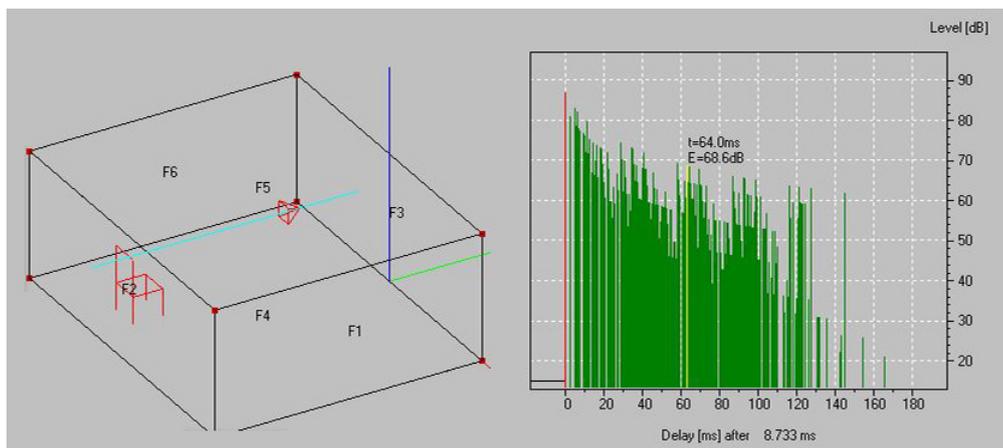


Abbildung 3.6: EASE Screenshot: Strahlenverfolgung der Raumkonfiguration 0006 und dazugehörige Reflexion (gelb markiert) im Reflektogramm. Der Strahl (blau) läuft über beide Flatterecho-Wände.

Der Pegel aller Reflexionen, die ebenfalls mindestens einmal von den Flatterecho-Wänden reflektiert werden, sinkt auch. Der Pegel der Reflexionen, die nur über andere Raum-Begrenzungsflächen zum Empfänger gelangen verändert sich nicht.

Ein Teil der Reflexionen, die nicht den periodischen Peaks im Reflektogramm zuzuordnen sind, verändert sich mit einem anderen α der Flatterecho-Wände demnach ebenfalls leicht, ein weiterer Teil bleibt stabil.

Die Simulation hat Impulsantworten der verschiedenen Raumkonfigurationen geliefert. Diese dienen als Ausgangsmaterial für die weitere Arbeit, sowohl für die Analyse als auch für den Hörversuch.

3 Raumakustische Modellierung

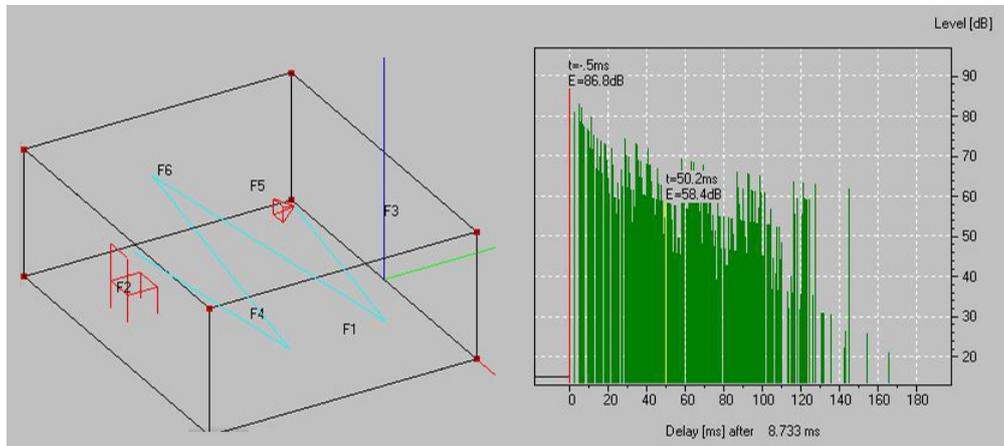


Abbildung 3.7: EASE Screenshot - Strahlenverfolgung der Raumkonfiguration 0006 und dazugehörige Reflexion (gelb markiert) im Reflektogramm. Der Strahl (blau) läuft über die Seitenwände F1 und F6

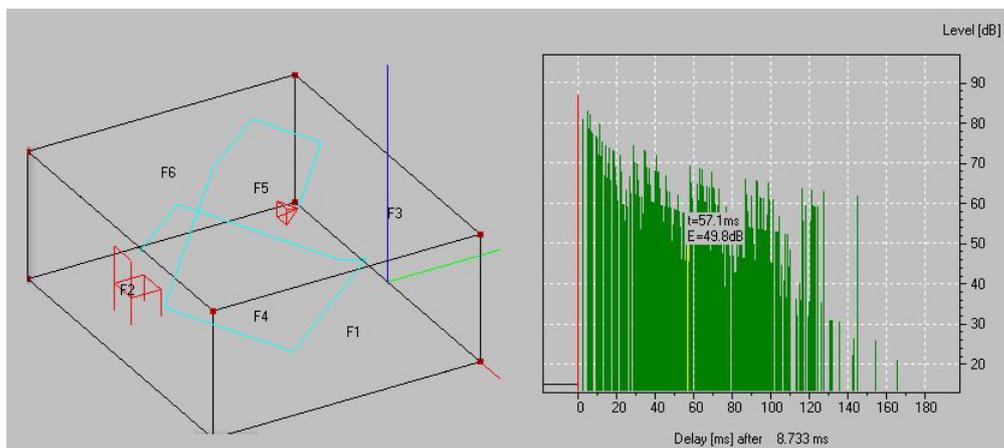


Abbildung 3.8: EASE Screenshot: Strahlenverfolgung der Raumkonfiguration 0006 und dazugehörige Reflexion (gelb markiert) im Reflektogramm. Der Strahl (blau) läuft sowohl über die Flatterecho-Wände, als auch über die restlichen Raumbegrenzungsflächen.

4 Analyse der Impulsantworten

Die Analyse, wie sich Flatterechos in kleinen Räumen auf raum- und psychoakustische Parameter auswirken, basiert auf den Impulsantworten, die verschiedene Raumkonfigurationen aus der Simulation liefern.

Die raumakustisch simulierten Räume verursachen durch schallharte parallele Wände periodische Reflexionen aus, die in den Impulsantworten enthalten sind. Es gilt, diese periodischen Reflexionen in der Impulsantwort durch objektive Kriterien zu erkennen.

Ein Flatterecho lässt sich sowohl anhand der Frequenz als auch der Stärke beschreiben. In vorliegenden Impulsantworten ist die Frequenz des Flatterechos über alle Raumkonfigurationen gleich, sie liegt bei ca. 33 Hz. Die Stärke der periodischen Reflexionen ändert sich jedoch (durch die Variation des Absorptionsgrads ändert sich auch die Nachhallzeit). Es gilt, diesen Anteil der Flatterecho-Reflexionen in der Impulsantwort eines Raumes zu analysieren.

Die im Folgenden analysierten Parameter beziehen sich auf die in Kapitel 2 aufgeführten Kenngrößen, die zur objektiven Betrachtung von Raumimpulsantworten dienen. Des Weiteren wird der Anteil der periodischen Reflexionen anhand der Pegeldifferenz zwischen Flatterechos und restlichen Reflexionen bestimmt.

4.1 Übersicht

Bereits in den Impulsantworten und Energie-Zeit-Diagrammen (Energy–Time–Curve, kurz *ETC*) sind die periodischen Amplitudenschwankungen, ausgelöst durch das Flatterecho, erkennbar. Abbildung 4.1 zeigt diese Darstellungen der Raumkonfiguration 0006, die Flatterecho-Wände haben den Absorptionsgrad $\alpha = 0$. Die periodischen Reflexionen sind sowohl in der Impulsantwort als auch in der ETC-Darstellung deutlich auszumachen, die Amplitudenschwankungen sind sichtbar. Besonders eindeutig sind sie bei der Darstellung des Schallenergiepegels (ETC) zu sehen. In periodischen Zeitabständen tritt eine Folge von Peaks als Spitzen heraus, dazwischen liegen Reflexionen mit einer geringeren Schallenergie. Die Spitzen treten mit einer Periode von 30 ms auf, die Flatterecho-Frequenz beträgt ca. 33 Hz. Dieser Zeitabstand ist auf den Wandabstand im simulierten Raum zurückzuführen. Der Wandabstand beträgt 5 Meter, somit bilden sich Spiegelschallquellen im Abstand vom 10 Metern. Diese 10 Meter entsprechen einer Wiederholung des Direktschalls nach $10 \text{ m} \cdot 343 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 29,2 \text{ ms}$. Die Periodizität ist mit circa 30 ms in der Impulsantwort sowie im Energie-Zeit-Diagramm sichtbar.

4 Analyse der Impulsantworten

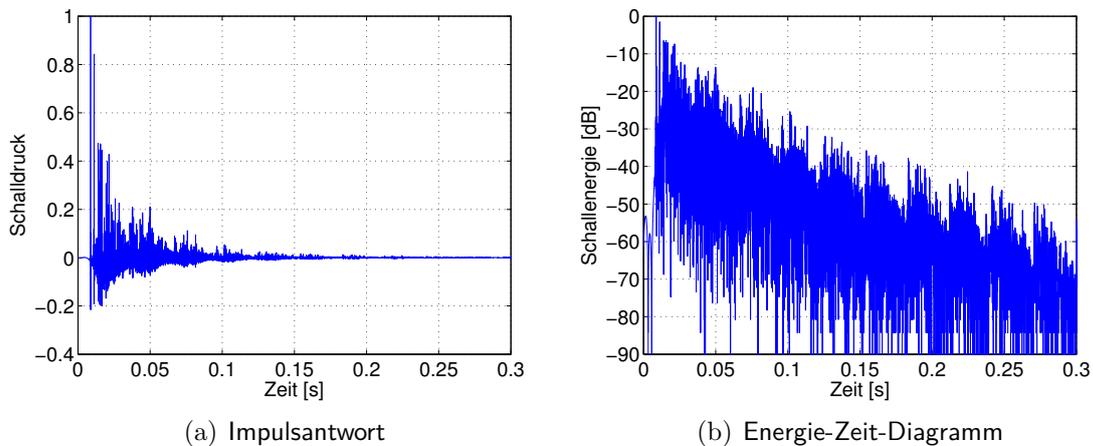


Abbildung 4.1: Impulsantwort und Energie-Zeit-Diagramm der Raumkonfiguration 0006, der Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände beträgt $\alpha = 0$. Sichtbar sind die periodischen Amplitudenschwankungen, bedingt durch das Flatterecho

4.2 Tannenbaum Kriterium

Die Betrachtung des Tannenbaum Kriteriums anhand der vorliegenden Impulsantworten ist nur bedingt aufschlussreich, da es sich lediglich um ein optisches Kriterium handelt und es nur einen ersten Anhaltspunkt liefern kann. Dargestellt ist die um 90° gedrehte Impulsantwort, sie zeigt ein Tannenbaum-ähnliches Bild in Abbildung 4.2 für die Impulsantwort. Sichtbar wird bei der Betrachtung der Impulsantworten eine unregelmäßige Struktur. Der „Tannenbaum“ der Impulsantwort 0006 ($\alpha = 0$) ist höher als der der Impulsantwort 0306 ($\alpha = 0,3$), um die Extrembeispiele eines Absorptionsgrads von 0 zu einem Absorptionsgrad von 0,3 zu vergleichen. Der erste Tannenbaum hat stärkere „Äste“ die herausragen. Es gibt jedoch bei beiden Impulsantworten keine einzelnen Äste, die deutlich heraustreten. Der Verlauf ist bei beiden Fällen ähnlich, im ersten Fall mit weiter ausladenden Ästen, im zweiten Fall mit sehr kurzen Ästen. Diese Methode liefert Anhaltspunkte dafür, wie der Zeitverlauf zu bewerten ist, periodisch hervortretenden Äste deuten z.B. auf ein Flatterecho hin. Sie liefert nicht mehr Informationen, als die Impulsantwort oder der Energie-Zeit-Verlauf selber.

4.3 Echokriterium

Das Echokriterium lässt sich mithilfe des Programms EASERA¹ betrachten. Dargestellt wird der Verlauf der Kurve sowie die Echogrenze für Musik bzw. Sprache. Sogar beim Extrembeispiel von Absorptionsgrad $\alpha = 0$ der Flatterecho-Wände wird diese Grenze nicht periodisch überschritten, wie es für Flatterechos bei grö-

¹EASERA: Electronic and Acoustic System Evaluation and Response Analysis

4 Analyse der Impulsantworten

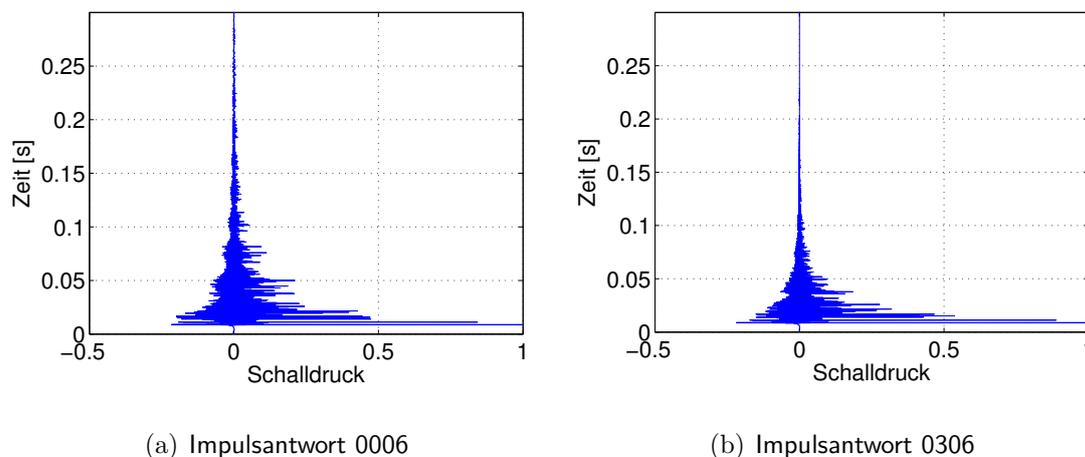


Abbildung 4.2: Tannenbaum-Darstellung der Impulsantworten mit $\alpha = 0$ (0006) und $\alpha = 0,3$ der Flatterecho-Wände. Es treten keine einzelnen Äste heraus, der Verlauf nach oben ist jedoch unregelmäßig

berer Zeitabständen der Fall ist (Weinzierl 2008: 198). Der Verlauf der Kurve zeigt jedoch in periodischen Zeitabständen deutliche Amplitudenschwankungen. Die Abbildungen 4.3 und 4.4 zeigen den Kurvenverlauf für das Echokriterium in Bezug auf Sprache und Musik für eine Auswahl der simulierten Raumkonfigurationen. Die rote Linie zeigt die Grenze für ein störendes Echo, die in keinem der Fälle überschritten wird. Für eine Überschreitung sind die Reflexionen im Vergleich zum Direktschall nicht stark und spät genug. Es wird höchstens $EK = 0,45$ für Sprache von der ersten Reflexion erreicht, die Echogrenze liegt bei $EK_{\text{grenz},50\%} = 1,0$. Das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986) liefert hier für Flatterechos in kleinen Räumen keine Detektionsmöglichkeit. Das liegt an den kurzen Zeitabständen von 30 ms zwischen den einzelnen Echo Rückwürfen und an der für dieses Kriterium zu geringen Amplitude der Rückwürfe. Das Kriterium kann hier keinen Hörbarkeitsparameter liefern.

Das Prinzip des Echokriteriums kann für eine weiterführende Auswertung jedoch hilfreich sein, denn in der Darstellung des Echokriteriums ist die periodisch an- und absteigende Energie deutlich sichtbar. Eine weiterführende Auswertung auf Basis dieses Echokriteriums nutzt den Ansatz um den Anteil der periodischen Reflexionen zu quantifizieren und befindet sich in Abschnitt 4.7

4.4 Nachhallzeit

Durch die Variation der Absorptionsgrade im vorliegenden simulierten Raum hat sich auch die Nachhallzeit T_N verändert. Die Nachhallzeiten der unterschiedlichen Raumkonfigurationen sind in Tabelle 4.1 dargestellt. Die Nachhallzeit T_N wird hier nach der Formel $T_N = 0,163 \cdot \frac{V}{A}$ in Sekunden nach Sabine berechnet. Das Raumvolumen des simulierten Raums beträgt 72 m^3 . Die Werte für T_{10} , T_{20} und T_{30} wurden durch die Software EASERA aus den Impulsantworten ermittelt. Zu-

4 Analyse der Impulsantworten

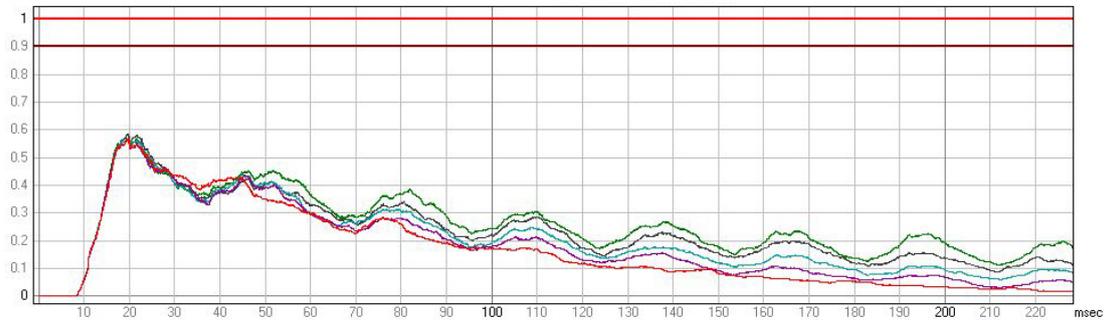


Abbildung 4.3: EASERA Screenshot: Echokriterium für Sprache für die Impulsantworten mit einem Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände von $\alpha = 0$ (grün), $\alpha = 0,1$ (grau), $\alpha = 0,2$ (blau), $\alpha = 0,3$ (lila) und $\alpha = 0,5$ (rot). Die Echogrenze ist in braun bzw. rot dargestellt. Sie wird von keiner Impulsantwort erreicht (Dietsch und Kraak 1986)

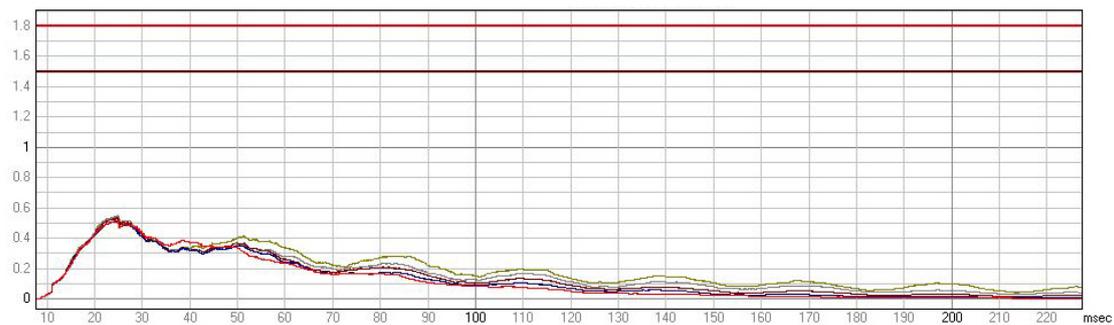


Abbildung 4.4: EASERA Screenshot: Echokriterium für Musik für die Impulsantworten mit einem Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände von $\alpha = 0$ (grün), $\alpha = 0,1$ (grau), $\alpha = 0,2$ (braun), $\alpha = 0,3$ (blau) und $\alpha = 0,5$ (rot). Die Echogrenze ist in braun bzw. rot dargestellt. Sie wird von keiner Impulsantwort erreicht (Dietsch und Kraak 1986)

4 Analyse der Impulsantworten

nächst wird der Schroeder-Plot durch die Rückwärtsintegration der Impulsantwort berechnet. An den Schroeder-Plot werden Tangenten angelegt, die jeweils 10 dB, 20 dB und 30 dB Pegelunterschied haben. Diese Tangenten werden auf einen Pegelunterschied von 60 dB extrapoliert und liefern die Nachhallzeit-Werte T_{10} , T_{20} und T_{30} (Software Design Ahnert GmbH 2006). Je nach Schroeder-Kurve können die Werte unterschiedlich stark variieren, dies ist von der Gleichmäßigkeit sowie der Steigung der Schroeder-Kurve abhängig. Die Schroeder Kurven sind in Abbildung 4.5 abgebildet.

Die berechnete Nachhallzeit T_N unterscheidet sich von den aus den Impulsantworten ermittelten Nachhallzeiten. Der Vergleich von T_{30} und T_N , ergibt für T_{30} eine höhere Nachhallzeit von bis zu 0,13 bei $\alpha = 0$. Nur beim Referenzbeispiel *Ref* ist T_{30} signifikant niedriger. Obwohl das Referenzbeispiel eine äquivalente Absorptionsfläche wie im Beispiel $\alpha = 0,2$ aufweist, ist die Nachhallzeit hier niedriger. Das liegt an der Beschaffenheit des Referenzbeispiels: in dieser Raumkonfiguration wiesen alle Raumbegrenzungsflächen einen Absorptionsgrad von $\alpha = 0,5$ auf, es ist kein Flatterecho vorhanden, das deutlich aus der Impulsantwort heraustritt. Raumkonfiguration *0206* mit $\alpha = 0,2$ hingegen weist unregelmäßig verteilte Absorptionswerte auf. Die Flatterecho-Wände haben einen Absorptionsgrad von 0,2, dies hat zur Folge, dass die Energie zwischen diesen Wänden länger erhalten bleibt, die Nachhallzeit ist höher.

Tabelle 4.1: Nachhallzeiten des simulierten Raums. Dargestellt sind die aus der Impulsantwort kalkulierten T_{10} , T_{20} und T_{30} -Werte sowie die aus der äquivalenten Absorptionsfläche berechnete Nachhallzeit T_N nach Sabine

Konfiguration	T_{10} [s]	T_{20} [s]	T_{30} [s]	T_N [s]	A_{eq} [m ²]
0006, $\alpha = 0$	0,25	0,31	0,36	0,233	50,40
00506, $\alpha = 0,05$	0,24	0,28	0,33	0,226	51,84
0106, $\alpha = 0,1$	0,22	0,25	0,29	0,220	53,28
01506, $\alpha = 0,15$	0,21	0,24	0,26	0,214	54,72
0206, $\alpha = 0,2$	0,21	0,20	0,23	0,209	56,16
02506, $\alpha = 0,25$	0,19	0,20	0,21	0,204	57,60
0306, $\alpha = 0,3$	0,19	0,18	0,19	0,199	59,04
Ref, $\alpha = 0,5$	0,16	0,17	0,17	0,208	56,40

Gemäß DIN 18041 (2004) liegen diese Nachhallzeiten allesamt unter den empfohlenen Werten. Bei einem Raumvolumen von 72 m³ sieht die Norm für die Nutzung *Unterricht* eine Nachhallzeit T_{soll} von 0,34 s bis 0,51 s vor, für *Sprache* 0,44 s bis 0,66 s und für *Musik* 0,72 s bis 1,09 s. Diese Werte werden deutlich unterschritten, eine zu hohe Nachhallzeit kann für die vorliegenden Impulsantworten ausgeschlossen werden. Es ist denkbar, dass durch eine niedrige Nachhallzeit und Fehlen weiterer Reflexionen das Flatterecho erst demaskiert und hörbar wird (Cremer und Müller 1978: 64).

4 Analyse der Impulsantworten

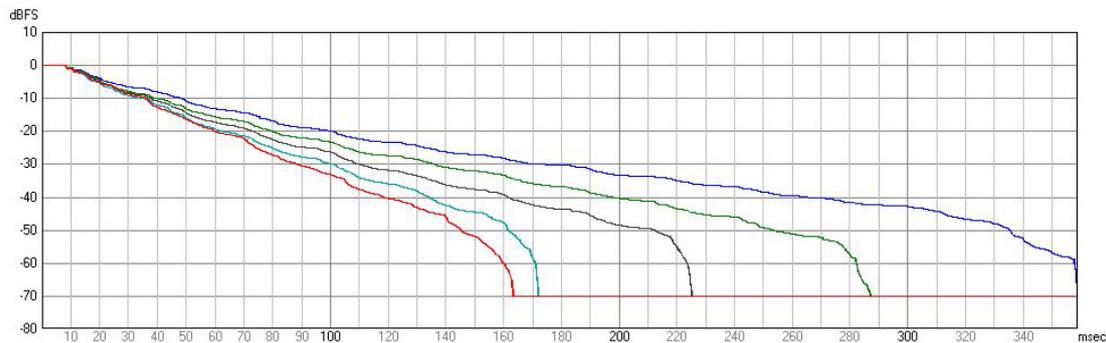


Abbildung 4.5: EASERA Screenshot: Schroeder Kurve für die Impulsantworten *0006* (blau), *0106* (grün), *0206* (schwarz), *0306* (cyan) und *Ref* (rot). Dargestellt ist der Schalldruckpegel über die Zeit

4.5 Weitere Hörsamkeitsparameter

Tabelle 4.2 zeigt weitere raumakustische Parameter, wie die Schwerpunktzeit t_s und das Deutlichkeitsmaß C_{50} für die Impulsantworten. Sie liegen allesamt trotz Flatterecho im empfohlenen Bereich. Die Schwerpunktzeit sollte möglichst für Sprache unter 80 ms liegen, dies wird eingehalten (Fasold und Veres 2003:151). Eine gute Deutlichkeit von Sprache ist bei $C_{50} > 0$ dB gegeben und Klarheit von Musik bei C_{80} von -1 bis +3 dB (Fasold und Veres 2003:150). $C_{50} > 0$ dB liegt überall vor. Der empfohlene C_{80} -Wert wird bei allen Impulsantworten überschritten. Ein hoher C_{80} -Wert hat eine hohe zeitliche Durchsichtigkeit zur Folge. Dies kann bei Musik einen zu trockenen Klang verursachen, ist bei Sprache jedoch unkritisch.

Die Hörsamkeitsparameter C_{50} , C_{80} und t_s deuten allesamt auf eine hohe zeitliche Durchsichtigkeit hin. Selbst bei der Raumkonfiguration mit einem Absorptionsgrad $\alpha = 0$ (*0006*) der Flatterecho-Wände mit einem starken Flatterecho ist dies nicht anders und die Durchsichtigkeit und Klarheit sollten gemäß dieser Kriterien hoch sein. Die genannten Kriterien erkennen ein Flatterecho in kleinen Räumen demnach nicht, da die Reflexionen nicht in einem kritischen Zeitbereich (ab 50 ms Zeitdifferenz zum Direktschall) liegen und die Periodizität nicht berücksichtigt wird.

4.6 Autokorrelation

Die Autokorrelationsfunktion einer periodischen Impulsantwort liefert eine periodische Autokorrelationsfunktion. In Anbetracht der vorliegenden Impulsantworten ist somit auch eine periodische Autokorrelationsfunktion (AKF) zu erwarten. Die AKF der Raumkonfiguration *0006* ($\alpha = 0$) ist in Abbildung 4.6 zu sehen. Das Hauptmaximum liegt bei $t = 0$ s. Die ersten Nebenmaxima liegen bei $t = 5$ ms und $t = 6$ ms. Ein weiteres Maximum ist bei $t = 29$ ms sichtbar, die Periode des Flatterechos findet sich in der AKF wieder. Die 6 ms lassen sich auf einen Abstand

4 Analyse der Impulsantworten

Tabelle 4.2: Raumakustische Kenngrößen des simulierten Raums. Dargestellt sind die aus der Impulsantwort kalkulierten Werte Schwerpunktzeit t_s , Deutlichkeit von Sprache C_{50} und Klarheit von Musik C_{80}

Konfiguration	t_s [ms]	C_{50} [dB]	C_{80} [dB]
0006, $\alpha = 0$	15,5	12,7	18,4
00506, $\alpha = 0,05$	15,0	13,8	20,0
0106, $\alpha = 0,1$	12,6	15,0	21,2
01506, $\alpha = 0,15$	12,2	15,8	22,1
0206, $\alpha = 0,2$	11,5	16,6	23,4
02506, $\alpha = 0,25$	10,7	17,4	24,6
0306, $\alpha = 0,3$	10,0	18,3	25,2
Ref, $\alpha = 0,5$	10,3	18,8	26,6

von circa 2 m umrechnen. Diese Maxima der AKF hat demnach der Wandabstand von Quelle und Empfänger zur Wand ausgelöst. Im Hauptmaximum sammelt sich die Signalenergie der Impulsantwort, in den Nebenmaxima die jeweilige Energie aller Reflexionen mit entsprechender Periode. Es liegt nahe, die Spitze bei der Frequenz des Flatterechos mit dem Hauptmaximum der AKF zu vergleichen, ähnlich der zeitlichen Diffusität nach Kuttruff (1965/66). Wird das für die vorliegenden Impulsantworten durchgeführt, wird das jeweilige Verhältnis des Werts bei ca. 30 ms zum Wert des Hauptmaximums erhalten. Dieses Verfahren jedoch keine verwendbaren Ergebnisse, da Ergebnis stark schwankt und bei einem niedrigeren Absorptionsgrad teilweise auch der Wert des Nebenmaximum sinkt, obwohl ein höheren Wert zu erwarten ist. Dies kann unterschiedliche Gründe haben: Nur kleine Unregelmäßigkeiten in den Impulsantworten können zu einem anderen Wert des Nebenmaxima bei circa 30 ms führen. Diese Unregelmäßigkeiten können durch die Simulation zustande kommen. Verschiebt sich eine Reflexion um wenige Samples, wird sie schon nicht mehr mit in das Nebenmaximum aufsummiert. Des Weiteren ist der Wert des Hauptmaximums auch nicht als stabil anzusehen. Je nach Länge der Impulsantwort kann der Wert stark variieren. Je länger die Impulsantwort, desto höher auch die Signalenergie im Hauptmaximum. Diese Unterscheidung nach Länge ist hier nicht sinnvoll, da sich gerade die Reflexionen im sehr späten Zeitbereich durch Ungenauigkeiten der Simulation unterscheiden. Die Simulation hängt an das Ende der Impulsantwort einen „Nachhallschwanz“ der leicht variieren kann. Außerdem können unterschiedliche Samplerraten bei gleichen Impulsantworten zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Die zeitliche Diffusität nach Kuttruff (1965/66) liefert ebenfalls keine Ergebnisse, die zur Detektion beitragen können, sie beruht auf der Autokorrelation. Verglichen wird das erste Nebenmaximum mit dem Hauptmaximum. Hier ist das erste Nebenmaximum stets im Bereich 5 ms bzw. 6 ms und ist unabhängig von den periodischen Reflexionen zum späteren Zeitpunkt. Die Höhe des Hauptmaximums ist aus genannten Gründen ebenfalls nicht konsistent.

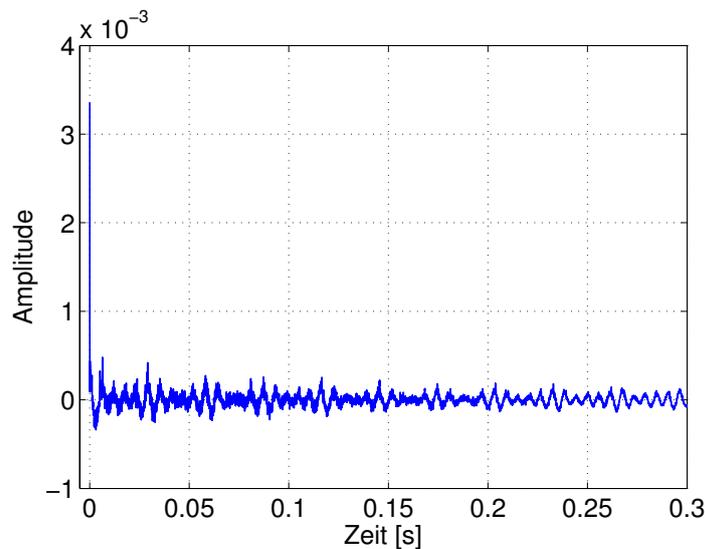


Abbildung 4.6: Autokorrelationsfunktion der Impulsantwort der Raumkonfiguration 0006. Sichtbar ist das Hauptmaximum bei $t = 0$ und das Nebenmaximum bei $t = 30$ ms, bedingt durch das Flutterecho

Die Autokorrelationsfunktion verdeutlicht die Periodizität der Impulsantworten. Sie liefert jedoch keine zuverlässigen Informationen über den tatsächlichen Anteil der Flutterecho-Reflexionen im Vergleich zu anderen Reflexionen in der Impulsantwort. Die AKF kann jedoch dazu verwendet werden, die Periode des Flutterechos zu erkennen.

4.7 Pegeldifferenz

Die genannten Kenngrößen und Analysen bieten noch keine Möglichkeit, den Anteil von periodischen Reflexionen bzw. Flutterechos in vorliegenden Impulsantworten zu erfassen und damit ein Maß für eine verminderte Hörsamkeit zu finden.

Die periodischen Reflexionen zeigen sich im Energie-Zeit-Diagramm als periodische Amplitudenschwankungen (mit über Zeit abfallender Amplitude). Die Stärke der Amplitudenschwankungen soll quantifiziert werden, hier mithilfe einer Pegeldifferenz zwischen nicht- und periodischen Reflexionen. Die Pegeldifferenz ist mit dem Modulationsgrad einer Amplitudenmodulation vergleichbar. Dieser beziffert das Verhältnis vom periodischen Wechselanteil zum Gleichanteil, eignet sich jedoch nur für stationäre Signale.

Diese Analyse ist nur für periodische Reflexionen anwendbar, ein einzelnes Echo wird nicht erkannt.

4.7.1 Pegeldifferenz ΔL aus dem Energie-Zeit-Diagramm

Hier wird der Ansatz verwendet, die Pegeldifferenz zwischen periodischen Reflexionen und restlichen Reflexionen im Energie-Zeit-Diagramm zu berechnen.

4 Analyse der Impulsantworten

Zunächst wird überprüft, ob die Pegeldifferenz zwischen periodischen Reflexionen und den Reflexionen, die dazwischen liegen im ersten Bereich der ETC stets gleich ist. Ansonsten würde sich die Differenz ändern, was eine Beschreibung des Flatterecho-Anteils anhand eines Werts schwierig macht. Dann wird eine Gerade durch die periodischen Maxima des Flatterechos gelegt. Eine weitere Gerade wird an die Minima, die durch die übrigen Reflexionen verursacht werden, gelegt. Der Abstand ΔL dieser beiden Geraden dient nun dazu, die Differenz zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen zu kennzeichnen.

Abbildung 4.8 zeigt die einzelnen Schritte der Berechnung der Pegeldifferenz ΔL . Zunächst wird die Impulsantwort eingelesen und normalisiert. Mithilfe der Autokorrelationsfunktion wird die Periode des Flatterechos erfasst. Dafür wird die Autokorrelationsfunktion nach Maxima durchsucht. Da Maxima zu Beginn der AKF keine Rolle spielen, da zu kurze Perioden kein Flatterecho mehr verursachen, wird erst ab 20 ms das Maximum erfasst. Bei kleineren Zeitabständen würden periodische Reflexionen nicht mehr in ihrer zeitlichen Struktur wahrgenommen werden, sondern es würden Klangfärbungen hörbar werden (Rubak 2004). Als Maximum, bzw. Flatterecho-Periode, ergibt sich für alle Impulsantworten 29,1 ms, was wiederum auf den Wandabstand von 5 Metern zurückzuführen ist.

Die Energie-Zeit-Darstellung, somit die logarithmische Darstellung der quadrierten Impulsantwort ist in der ursprünglichen Form für Berechnungen nicht verwendbar, da der Verlauf zu unregelmäßig ist und sehr niedrige, für die Wahrnehmung irrelevante Werte enthält.

In der Impulsantwort sind auch Samples vorhanden, deren Werte 0 oder nahe 0 sind. Bei der Logarithmierung wird aus diesen Werten ein $-\text{Inf}$, ein Wert der gegen minus Unendlich läuft. Für die Auswertung von Maxima und Minima ist das nicht geeignet, da die Minima stets durch Nullwerte aus der Impulsantwort bestimmt würden und nicht durch Peaks von schwächeren Reflexionen. Zeitliche Lücken in einem Schallsignal werden vom menschlichen Ohr erst ab einer Dauer von 2-3 ms wahrgenommen, daher können hier einzelne Samples, deren Werte 0 sind, außer Acht gelassen werden (Shailer und Moore 1983).

Mithilfe einer anderen Darstellung werden nur die Spitzen des ETC-Diagramms verwendet. Dies liefert einen Verlauf, der die Amplituden der einzelnen Reflexionen sichtbar macht, ohne niedrige Zwischenwerten. Die hellblaue Kurve in Abbildung 4.7 zeigt den neuen Verlauf im Gegensatz zur vollständigen ETC-Darstellung (dunkelblau). Im Folgenden wird stets die hellblaue Kurve, die Linie der ETC-Maxima verwendet.

Um die Peaks der periodischen Reflexionen zu erfassen, wird zunächst die zeitliche Position des Direktschalls festgestellt. Aus der Autokorrelationsfunktion steht die Periode der Reflexionen fest. Mit diesen Informationen lässt sich der Bereich festlegen, in dem nach Maxima gesucht wird. Entsprechend wird hier in Zeitabständen von ≈ 30 ms jeweils nach Maxima gesucht, die durch die Wiederholung des Direktschallereignisses entstehen. Die nicht periodischen Reflexionen hingegen, stehen stets zwischen den periodischen Reflexionen. Sie werden als Minima in diesen Bereichen detektiert. Es wird jeweils eine Gerade an die Minima und die Maxima angelegt, der Abstand dieser Geraden ist die Pegeldifferenz ΔL .

4 Analyse der Impulsantworten

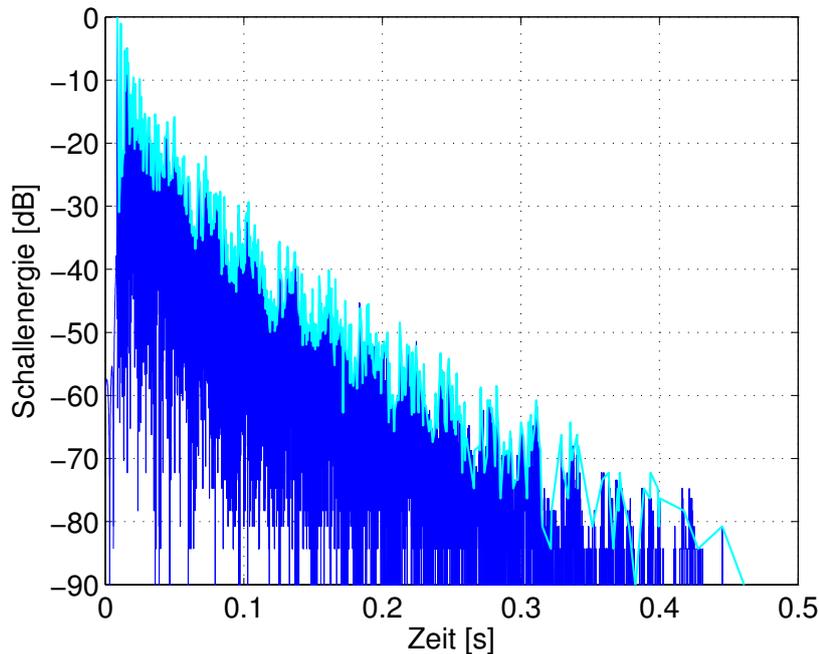


Abbildung 4.7: Dargestellt ist die ETC in dunkelblau sowie die Maxima-Darstellung der ETC in hellblau für die Impulsantwort *0106* mit dem Absorptionsgrad $\alpha = 0,1$ der Flatterecho-Wände

Der ΔL -Wert beschreibt die Pegeldifferenz zwischen Flatterecho-Reflexionen und restlichen Reflexionen im Energie-Zeit-Diagramm. Er gibt an, wie weit die Flatterecho-Reflexionen aus der Impulsantwort herausragen.

Tabelle 4.3 gibt die Werte für die Impulsantworten an. Abbildung 4.9 ist zu entnehmen, wie die Gerade im jeweiligen Fall aussehen. Den Abbildungen ist ein deutlicher Unterschied zwischen den Geraden zu entnehmen, sowohl im Abstand als auch in der Steigung. Der Steigungsunterschied ist mit der unterschiedlichen Abklingzeit zu erklären, denn durch Variation der Absorptionsgrade, hat sich ebenfalls die Nachhallzeit verändert. Diese wird für den Wert nicht beachtet, sondern nur die Differenz zwischen Flatterecho-Reflexionen und restlichen Reflexionen. ΔL berechnet sich deshalb lediglich aus dem Abstand beider Geraden und ignoriert deren Steigung.

Die Werte der Berechnung sind in Tabelle 4.3 dargestellt. Im Bereich von der Raumkonfiguration *0006* bis *02506* sinkt ΔL lediglich von 17 dB auf 16 dB. Danach sinken die Werte stärker, auf 14 dB bei *0306* und sogar auf 11 dB beim Referenzbeispiel ohne Flatterecho. Die geringen Unterschiede zwischen den ersten Raumkonfigurationen können durch die Unsicherheit von ΔL verursacht sein und durch die Möglichkeit, dass es grundsätzlich nur geringe Unterschiede zwischen den ersten Raumkonfigurationen gibt. Durch den unregelmäßigen Verlauf des Energie-Zeit-Diagramms kommt es zu Abweichungen bei der Anpassung der Geraden. Diese Abweichungen sind mit ca. ± 1 dB zu beziffern.

4 Analyse der Impulsantworten

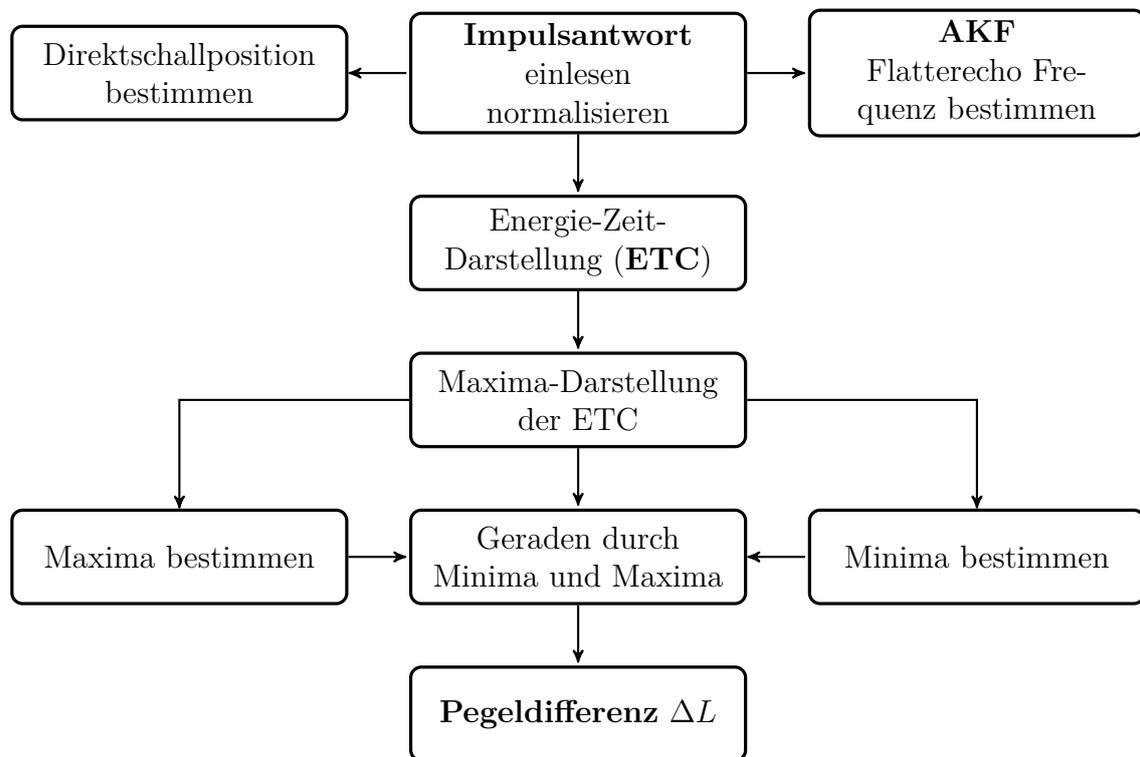


Abbildung 4.8: Flussdiagramm für die Berechnung der Pegeldifferenz ΔL zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen

Tabelle 4.3: Pegeldifferenz ΔL der Impulsantworten. Dargestellt ist der aus der Impulsantwort berechnete Wert der Pegeldifferenz zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen der jeweiligen Raumkonfiguration

Konfiguration	ΔL [dB]
0006, $\alpha = 0$	17
00506, $\alpha = 0,05$	17
0106, $\alpha = 0,1$	17
01506, $\alpha = 0,15$	16
0206, $\alpha = 0,2$	16
02506, $\alpha = 0,25$	16
0306, $\alpha = 0,3$	14
Ref, $\alpha = 0,5$	11

4 Analyse der Impulsantworten

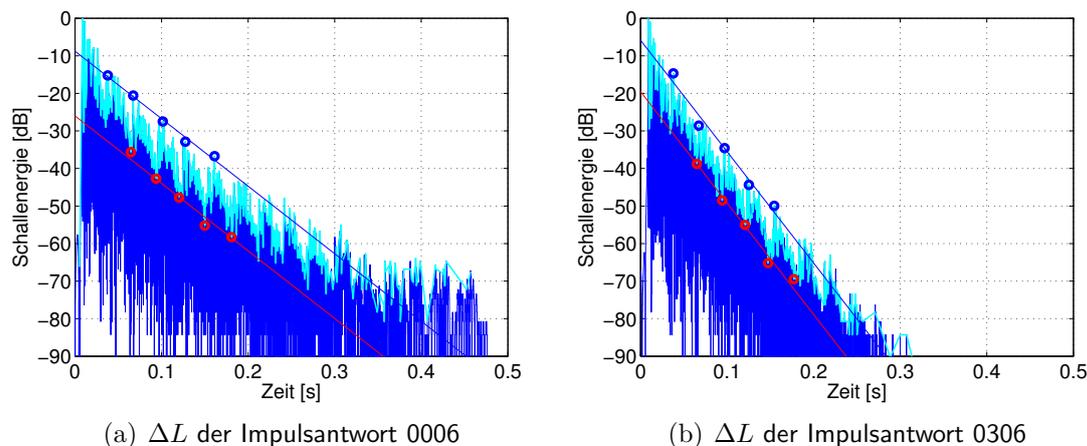


Abbildung 4.9: Darstellung des ETC-Diagramms mit Geraden durch Maxima und Minima der Reflexionen. Aus dem Abstand dieser Geraden berechnet sich ΔL

4.7.2 Pegeldifferenz ΔL aus dem Echokriterium

In Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986) lässt sich für eine Berechnung der Flatterecho-Anteile ein alternativer Ansatz finden. Das Echokriterium selbst liefert keine detektierten Echos für die Impulsantwort, der Berechnungsansatz ist jedoch nützlich, da die Amplitudenschwankung deutlich hervortritt. Für das Echokriterium wird zunächst die Aufbaufunktion der Schwerpunktzeit $t_s(\tau)$ gebildet. Hier für $n = 2/3$, dieser Wert wird für Schallsignale der Art *Sprache* verwendet und wurde von Dietsch und Kraak (1986) durch umfangreiche Versuche empfohlen, bzw. lieferte eine gute Übereinstimmung von Messung und Berechnung der Echoschwelle.

Zunächst wird die Aufbaufunktion $t_s(\tau)$ gebildet.

$$t_s(\tau) = \frac{\int_0^\tau |p(t)|^n t dt}{\int_0^\tau |p(t)|^n dt}$$

Der Differenzenquotient $EK(\tau)$ bildet das Echokriterium mit unterschiedlichen Zeitbereichen für Musik ($\Delta\tau = 14$ ms) und Sprache ($\Delta\tau = 9$ ms):

$$EK(\tau) = \frac{\Delta t_s(\tau)}{\Delta\tau}$$

Mithilfe dieser Zeitbereiche werden Unregelmäßigkeiten, die im Energie–Zeit–Diagramm (Abbildung 4.9) in Abschnitt 4.7.1 vorhanden waren, verringert. Außerdem entspricht durch die Integration über festgelegte Zeitbereiche die Kurve des Echokriteriums eher der gehörrichtigen Wahrnehmung als die der ETC.

Der Ablauf der Berechnung ähnelt der Berechnung der vorangegangenen Pegeldifferenz. Er ist in Abbildung 4.11 dargestellt. Zunächst wird das Echokriterium gebildet. Mithilfe der Autokorrelationsfunktion wird die Periode ermittelt. Das

4 Analyse der Impulsantworten

Echokriterium wird logarithmiert. In periodischen Zeitabständen werden daraus Maxima ermittelt, in den Bereichen dazwischen die Minima. Es wird jeweils eine Gerade durch Maxima und Minima gelegt. Der Abstand der geraden beschreibt die Amplitudenschwankung und wird als Pegeldifferenz in dB angegeben. Mit Anlegen der Gerade entstehen Abweichungen, da die Minima und Maxima nicht exakt auf einer Linie liegen. Die mittlere Abweichung von ΔL liegt im Bereich 0,2. In der Auswertung hat sich gezeigt, dass eine Anpassung des Wertes $\Delta\tau$ (von 9 ms für Sprache) auf 5 ms geeignet ist. Mit der Anpassung ergeben sich größere Unterschiede der Pegeldifferenzen zwischen den einzelnen Raumkonfigurationen und die Berechnung verliert diese Unterschiede nicht durch eine Mittelung über eine größere Zeit $\Delta\tau$.

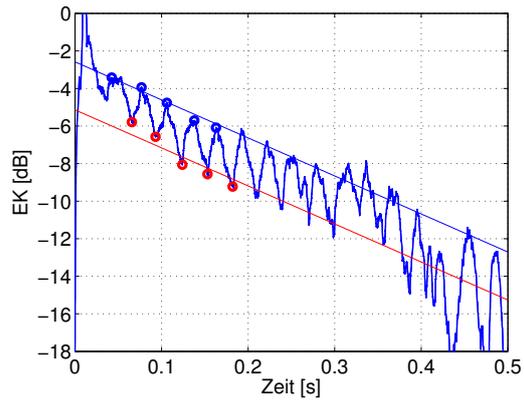
Das Echokriterium ist für die Detektion einzelner Echostörungen konzipiert. Hier wird es für einen anderen Zweck verwendet, feinere Strukturen sollen durch die kürzere Zeitdifferenz $\Delta\tau$ sichtbar werden. Für Flatterechos in kleinen Räumen lieferte das Echokriterium aufgrund der kürzeren Zeitabstände der Reflexionen bisher keine Detektionsmöglichkeit. Die ursprünglichen Mindestabstände der Reflexionen für das Echokriterium werden in kleinen Räumen nicht erreicht, wodurch sich die Anpassung der Zeitdifferenzen sowie die weitere Verarbeitung bei der Berechnung begründet. Die angepassten Zeitdifferenzen könnten in weiteren Untersuchungen für andere Wandabstände validiert werden.

Tabelle 4.4 zeigt die berechneten Pegeldifferenzen für die Impulsantworten. Mit steigendem Absorptionsgrad α sinkt die Pegeldifferenz ΔL . Die Ergebnisse der Pegeldifferenz zeigen bei dem niedrigeren $\Delta\tau = 5$ ms größere Abstufungen zwischen den Impulsantworten. Auffällig ist, dass die Pegeldifferenz beim Referenzbeispiel (keine Flatterechos vorhanden) auch deutlich niedrigerer ist, als bei den Impulsantworten mit Flatterecho.

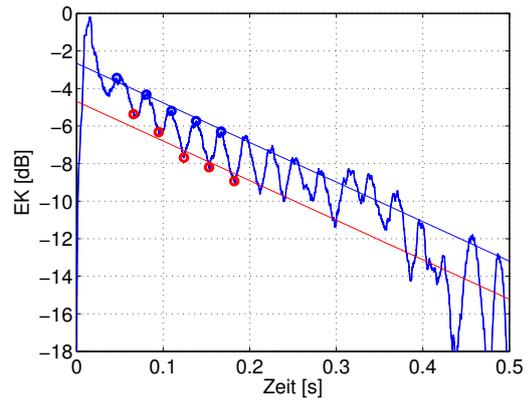
Die Unterschiede lassen sich auch in der grafischen Darstellung auf Abbildung 4.10 ausmachen. Bei gleicher Impulsantwort werden durch eine niedrigere Zeitdifferenz $\Delta\tau = 5$ ms feinere Abstufungen sichtbar, die bei einem größeren $\Delta\tau = 9$ ms durch längere Mittelung verschwinden.

Bei einem Absorptionsgrad von $\alpha = 0,2$ gegenüber $\alpha = 0$ wird der Abstand zwischen beiden angelegten Geraden sichtbar kleiner, er sinkt von 2,6 dB auf 2,2 dB. In der Impulsantwort *Ref*, die das Referenzbeispiel ohne Flatterecho darstellt, ist keine periodische Amplitudenschwankung auszumachen, was auch die Pegeldifferenz von 1,1 dB deutlich zeigt. Wie bei der Pegeldifferenz aus dem Energie-Zeit-Diagramm wird erst ab einem Zeitabstand von 20 ms zwischen den Reflexionen ein Flatterecho detektiert, da bei kleineren Zeitabständen der Nachhall hauptsächlich nicht in seiner zeitlichen Struktur wahrgenommen wird, sondern Klangfärbungen hörbar werden würden (Rubak 2004). Der Algorithmus erfasst Amplitudenschwankungen bis zu einer Frequenz von ≈ 50 Hz. Die Amplitudenschwankungen befinden sich im psychoakustischen Wahrnehmungsbereich der Schwankungsstärke (bis ≈ 20 Hz) und Rauigkeit (ab ≈ 15 Hz) (Fastl und Zwicker 2007: 257).

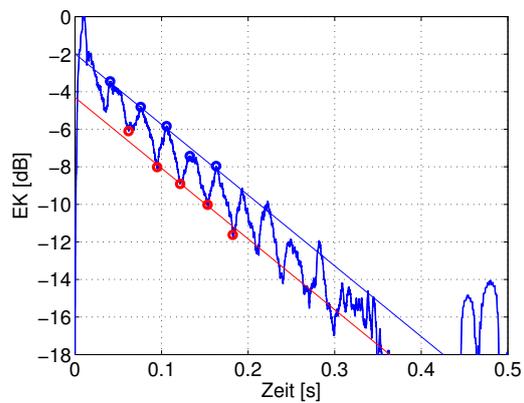
4 Analyse der Impulsantworten



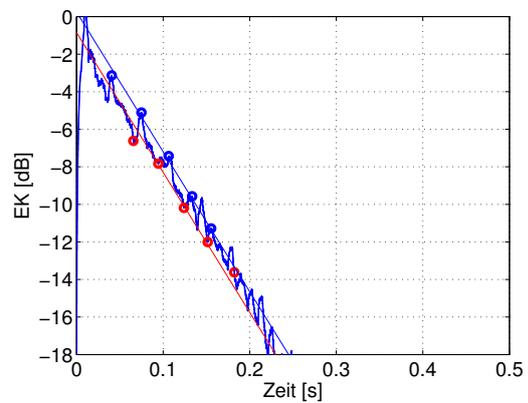
(a) Impulsantwort 0006, $\Delta\tau = 5$ ms



(b) Impulsantwort 0006, $\Delta\tau = 9$ ms



(c) Impulsantwort 0206, $\Delta\tau = 5$ ms



(d) Impulsantwort Ref, $\Delta\tau = 5$ ms

Abbildung 4.10: Darstellung des zeitabhängigen Echokriteriums verschiedener Impulsantworten. Die blaue Kurve zeigt das logarithmisch skalierte Echokriterium. Die blaue Gerade kennzeichnet die Maxima, die rote Gerade die Minima der Kurve

Tabelle 4.4: Berechnete Pegeldifferenz zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen in Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986) für die unterschiedlichen Raumkonfigurationen

Konfiguration	Pegeldifferenz ΔL	
	$\Delta\tau = 9 \text{ ms}$	$\Delta\tau = 5 \text{ ms}$
0006, $\alpha = 0$	2,0	2,6
00506, $\alpha = 0,05$	2,0	2,5
0106, $\alpha = 0,1$	1,8	2,3
01506, $\alpha = 0,15$	1,8	2,2
0206, $\alpha = 0,2$	1,7	2,2
02506, $\alpha = 0,25$	1,7	2,2
0306, $\alpha = 0,3$	1,6	2,1
Ref, $\alpha = 0,5$	0,5	1,1

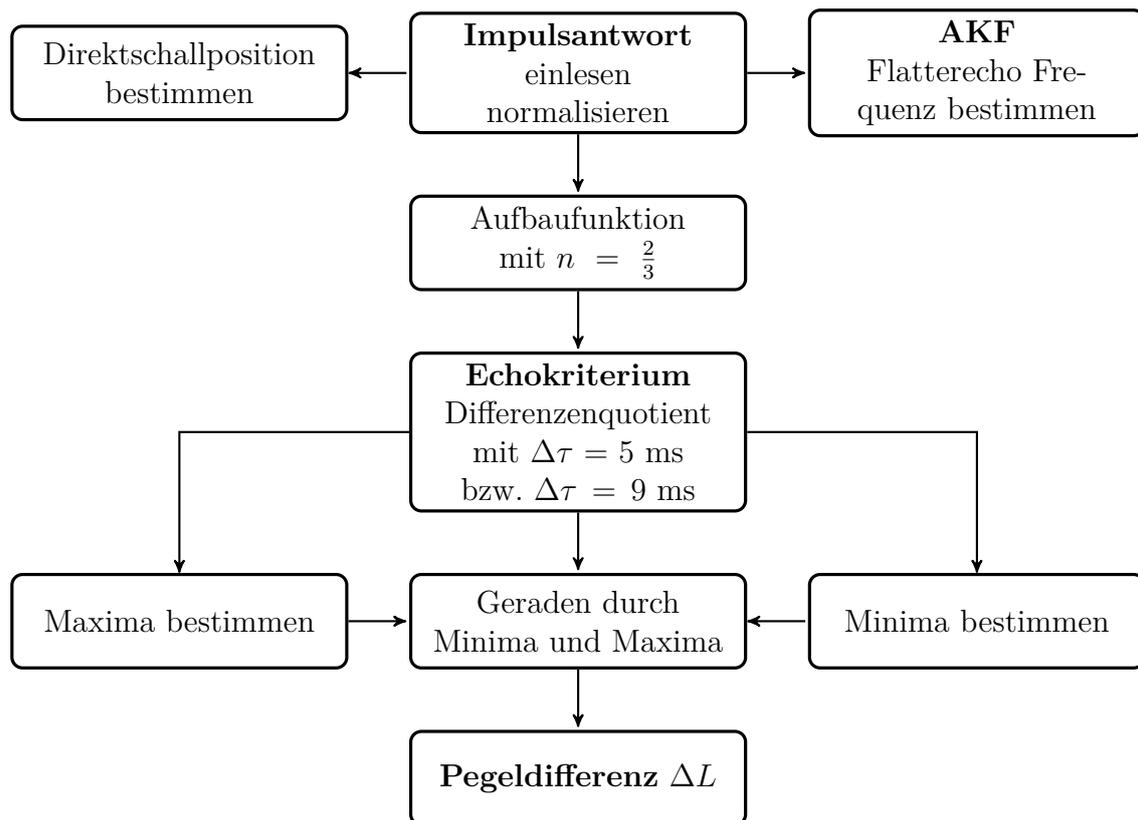


Abbildung 4.11: Flussdiagramm für die Berechnung der Pegeldifferenz ΔL zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen in Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986)

4.8 Rauigkeit

Da Rauigkeit durch Amplitudenschwankung entsteht, wird angenommen, dass die Impulsantworten ebenfalls eine Form von Rauigkeit enthalten und subjektiv als rau bewertet werden. Die Frequenz der Amplitudenschwankung der vorliegenden Impulsantworten beträgt, bedingt durch den Wandabstand von 5 m, 33 Hz. In der psychoakustischen Bewertung kann diese Frequenz sowohl zu Rauigkeit als auch zu Schwankungsstärke gehören, sie befindet sich in einem Übergangsbereich (Fastl und Zwicker 2007: 247).

Zur Analyse der Rauigkeit dient der Rauigkeitsalgorithmus nach Oetjen et al. (2012). Dieser basiert auf der psychoakustisch gemessenen Beeinflussung der Rauigkeit durch die Form der Einhüllenden. Gegenüber Algorithmen, deren berechnete Rauigkeit ausschließlich bei sinusförmig modulierten Signalen mit der Subjektivbewertung übereinstimmt, liefert dieser eine verbesserte Korrelation mit Subjektivurteilen (Oetjen et al. 2012).

Dieses Verfahren eignet sich für viele, teilweise sehr unterschiedliche Signaltypen (Oetjen et al. 2014). Für kurze Geräusche, wie Impulsantworten, ist der Algorithmus nicht gezielt konzipiert worden.

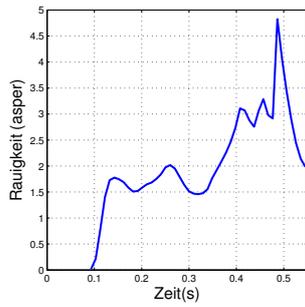
Die Rauigkeitsberechnung nach dem Modell von Oetjen et al. (2012) wurde auf die Impulsantworten angewandt, die hier berechneten Einzahlwerte sind in Tabelle 4.5 angegeben². Der Kalibrationspegel für die Berechnung entsprach einem A-bewerteten Schalldruckpegel von 80 dB(A), welcher dem Schalldruckpegel für den Hörversuch entsprach.

Die Einzahlwerte liefern über die unterschiedlichen Absorptionsgrade nicht durchgängig konsistente Ergebnisse. Mit sinkendem Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände sinkt hier zwar die kalkulierte Rauigkeit, der Wert für den Absorptionsgrad $\alpha = 0,05$, Raumkonfiguration 00506 fällt jedoch aus der Reihe.

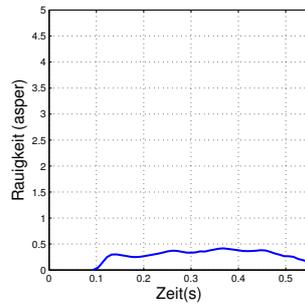
Die zeitabhängige Rauigkeit der Impulsantworten ist in Abbildung 4.12 zu finden. Die Rauigkeit steigt mit fortschreitender Zeit an. Bei den Impulsantworten 02506 bis Ref ist die Rauigkeit gering, sodass kaum Rauigkeit sichtbar ist. Mit sinkendem Absorptionsgrad der Flatterecho-Wände wird der Zeitbereich breiter, in welchem Rauigkeit vorhanden ist. Außerdem verschiebt sich das Maximum der zeitabhängigen Rauigkeit mit steigendem Absorptionsgrad nach vorne.

²Durchführung von A. Oetjen, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg

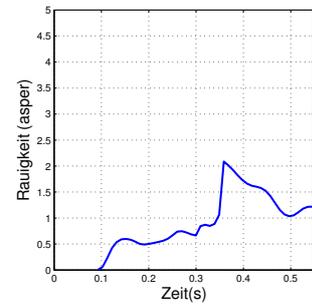
4 Analyse der Impulsantworten



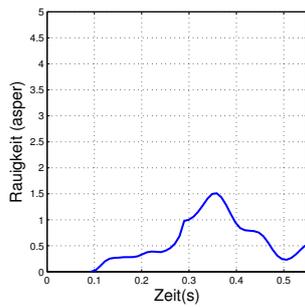
(a) Impulsantwort 0006



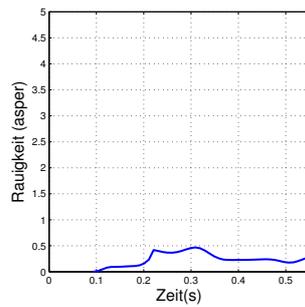
(b) Impulsantwort 00506



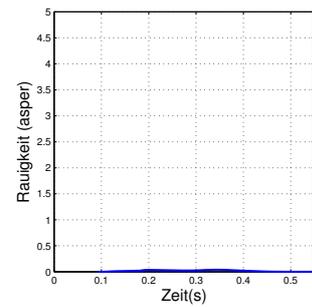
(c) Impulsantwort 0106



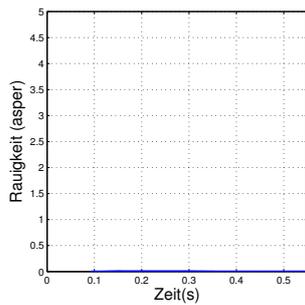
(d) Impulsantwort 01506



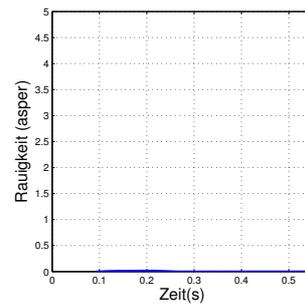
(e) Impulsantwort 0206



(f) Impulsantwort 02506



(g) Impulsantwort 0306



(h) Impulsantwort Ref

Abbildung 4.12: Darstellung der zeitabhängigen Rauigkeit in asper der verschiedenen Impulsantworten

Tabelle 4.5: Berechnete Einzahlwerte der Rauigkeit in asper für die unterschiedlichen Raumkonfigurationen

Konfiguration	Rauigkeit [asper]
0006, $\alpha = 0$	3,1
00506, $\alpha = 0,05$	0,4
0106, $\alpha = 0,1$	1,7
01506, $\alpha = 0,15$	1,3
0206, $\alpha = 0,2$	0,4
02506, $\alpha = 0,25$	0,0
0306, $\alpha = 0,3$	0,0
Ref, $\alpha = 0,5$	0,0

4.9 Zusammenfassung

Die Analyse der Impulsantworten hat gezeigt, dass vorhandene raumakustische Parameter bei Impulsantworten mit ausgeprägten Flatterechos keine Werte aufweisen, die auf eine verminderte Hörsamkeit hinweisen.

Der Rauigkeitsalgorithmus hingegen bietet erste Ergebnisse, die einer Flatterecho-Detektion nützlich sein können und auf eine wahrgenommene Rauigkeit des Nachhalls bei periodischen Reflexionen hinweisen. Für die Impulsantworten mit einem niedrigen Absorptionsgrad (von $\alpha = 0$ bis $\alpha = 0,2$) wurde eine Rauigkeit oberhalb der Wahrnehmungsschwelle ($\approx 0,1$ asper (Fastl und Zwicker 2007: 260)) berechnet.

Mithilfe der Auswertung der Pegeldifferenzen wird die Stärke der Amplitudenschwankung der Flatterecho-Reflexionen im Vergleich zu anderer Reflexionen beschrieben. Die Pegeldifferenz ΔL kann die *Flatterecho-Anfälligkeit* eines Raums angeben. Ein großer Anteil von periodischen Reflexionen im Energie-Zeit-Diagramm führt zu einem hohen ΔL . Die Werte wurden in Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986) berechnet, welches die *Echoanfälligkeit* bestimmt.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse dieser Analyse mit denen des Hörversuchs auf Zusammenhänge überprüft.

5 Hörversuch

Der Hörversuch soll untersuchen, wie periodische Reflexionen in kleinen Räumen die Hörsamkeit beeinflussen. Es wird geprüft, inwiefern ein niedrigerer Absorptionsgrad gegenüberliegender paralleler Wände (Abstand 5 m) negative Auswirkungen auf die Hörsamkeit hat, folglich Geräusche als lästiger, flatternder oder weniger klar beurteilt werden. Als Beurteilungsobjekte dienen die Impulsantworten des simulierten Raums, gefaltet mit verschiedenen Geräuschen. Die Stimuli werden von den Versuchspersonen anhand von fünfstufigen Ratingskalen bewertet, es haben 15 Personen am Hörversuch teilgenommen.

5.1 Methode

Die Auswirkungen von periodischen Reflexionen auf die Hörsamkeit sollten durch beschreibende Adjektive wie *flatternd* und bewertende Adjektive wie *lästig* beurteilt werden. Um ein breiteres Spektrum von möglichen Adjektiven zu erhalten wurden mittels eines Vorversuchs relevante Attribute gesammelt, mit denen der Höreindruck von periodischen Reflexionen in kleinen Räumen beschrieben werden kann. Im Vorversuch wurde 6 Versuchspersonen eine Auswahl der auch im finalen Hörversuch verwendeten Stimuli vorgespielt und sie sollten frei Begriffe notieren, die den Höreindruck beschreiben. Die genannten Begriffe sind im Anhang A.3.1 aufgeführt.

Auf dieser Basis wurden fünfstufige Ratingskalen entwickelt. Grundsätzlich erwiesen sich Ratingskalen im Gegensatz zu anderen Messmethoden als passend, da sie ein ökonomisches, alltagsnahes Verfahren darstellen, mit denen mehrere Reizattribute abgefragt werden können (Ellermeier et al. 2008: 41).

Es wurden unipolare statt bipolare Ratingskalen verwendet. Auf diese Weise sollten die Skalen von den Versuchsteilnehmerinnen und -teilnehmern besser ausgenutzt werden und Adjektive ohne passenden Gegenbegriff (z.B. *flatternd*) konnten abgefragt werden (Bortz und Döring 2006: 177).

Der Versuch untersucht die negativen Auswirkungen auf die Hörsamkeit, jedoch sollte der Fragebogen nicht nur negative Adjektive abfragen. Zur Vermeidung der Jasage-Tendenz (Akquieszenz) sollten Fragen eine ausbalancierte Schlüsselrichtung aufweisen (Bortz und Döring 2006: 236). Aufgrund dessen wurden auch positiv besetzte Adjektive wie *klar* und *angenehm* abgefragt.

Die Versuchspersonen bewerten anhand von fünfstufigen Ratingskalen, mit welcher Intensität das jeweilige Adjektiv den Stimulus beschreibt. Die Ratingskalen waren intervallskaliert, jeder Intervall war mit einer Intensität beschriftet, von links nach rechts mit *gar nicht*, *kaum*, *mittelmäßig*, *ziemlich* und *außerordentlich*.

5 Hörversuch

Gemäß Bortz und Schuster (2010: S.177) können diese verbalen Marken als weitgehend äquidistant aufgefasst werden und demnach kann von einer Intervallskalierung gesprochen werden. Optisch wurden die Ratingskalen horizontal präsentiert und über der Beschriftung der Intervalle befand sich ein Kästchen zum Ankreuzen.

Die erste Seite des Fragebogens bestand aus einer kurzen schriftlichen Instruktion und Fragen zur Selbsteinschätzung der Versuchsperson. Abgefragt wurden Geschlecht, Alter, ob eine Einschränkung des Hörvermögens bekannt ist und ob studiums- oder berufsbedingt Erfahrungen im Audibereich vorhanden sind.

Dem folgte die eigentliche Beurteilung der dargebotenen Geräusche. Pro Geräusch war im Fragebogen eine Seite auszufüllen.

Jedes Geräusch war im Hinblick auf mehrere Adjektive zu beurteilen. Zu jedem Geräusch wurden die Adjektive *angenehm*, *anstrengend*, *flatternd*, *hallig*, *klar*, *lästig*, *laut* und *rau* abgefragt. Die Adjektive wurden so gewählt, dass einige von ihnen nur die subjektive Evaluation (beispielsweise *lästig*) abfragen, andere gezielt die Wirkung des Flatterechos (*flatternd*) und der Nachhallzeit (*hallig*). Die Lautheit wurde abgefragt, um zu überprüfen, ob die Versuchsperson die Stimuli eines Abschnitts im Mittel gleich laut bewertet. Wenn dies nicht der Fall ist, wäre es möglich, dass ein Stimulus nur aufgrund seiner erhöhten Lautheit auch lästiger bewertet wird (Fastl und Zwicker 2007: 327). Im Anhang unter Abschnitt A.3.2 sind Ausschnitte des Fragebogens aufgeführt.

5.2 Stimuli

Die Stimuli sind Geräusche, die mit unterschiedlichen Raumimpulsantworten simulierter Räume gefaltet wurden. In der Simulation wurden die Absorptionsgrade der gegenüberliegenden Wände verändert. Die Auralisation liefert die Impulsantworten, welche mit unterschiedlichen Geräuschen gefaltet werden. Dies ergab schließlich 32 verschiedene Stimuli.

5.2.1 Simulierte Räume

Bei den simulierten Räumen handelt es sich um Räume aus der raumakustischen Modellierung, siehe Kapitel 3. Es wurden 7 Raumimpulsantworten ausgewählt, bei denen der Absorptionsgrad der gegenüberliegenden Wände, die periodische Reflexionen erzeugen, variiert. Außerdem wurde eine weitere Impulsantwort verwendet, bei der alle Wände denselben Absorptionsgrad hatten und unkritisch für Flatterechos sind, sie dient als Referenz. Die Übersicht der Absorptionsgrade der Raumbegrenzungsflächen ist in Tabelle 5.1 zu finden. Die Absorptionsgrade der Konfigurationen weisen eine Änderung von mindestens $\alpha = 0,05$ auf, geringere Unterschiede waren in einem Vorversuch von der Versuchsleiterin nicht wahrnehmbar.

Tabelle 5.1: Übersicht der Impulsantworten, mit denen die Geräusche für den Hörversuch gefaltet wurden

Bezeichnung	Absorptionsgrad α Flatterecho-Wände	Absorptionsgrad α restliche Begrenzungsflächen
0006	0	0,6
00506	0,05	0,6
0106	0,1	0,6
01506	0,15	0,6
0206	0,2	0,6
02506	0,25	0,6
0306	0,3	0,6
Ref	0,5	0,5

5.2.2 Geräusche

Es wurden vier unterschiedliche Geräusche mit den Impulsantworten gefaltet. Es gab mehrere Anforderungen an die Signale. Sie sollten den Versuchspersonen im Allgemeinen bekannt sein und im Alltag in ähnlicher Form vorkommen. Grundsätzlich sollten die Signale noch in unkomprimierter Form, ausreichender Aufnahmequalität und als nachhallfreie Aufnahme vorliegen. Für diese Anwendung wurden Geräusche gesucht, bei denen aus Erfahrung periodische Reflexionen auffällig sind, bzw. die als echo- bzw. flatterechokritisch gelten. Dies ist bei impulshaften Schallereignissen mit kurzer Ausklingzeit der Fall.

Die Geräusche waren

- ein einzelnes Klatschen,
- ein einmalig angeschlagenes Klangholz,
- ein Glas, das angeschlagen wird und
- eine männliche Stimme, die „Stopp“ sagt.

Die Signale lagen als nachhallfreie Aufnahme vor und hatten eine Länge von ca. 1 Sekunde. Im Hinblick auf Alltagssituationen, in welchen periodische Reflexionen auffällig werden können, wurden die Schallereignisse ausgewählt. In Anbetracht von Kindertagesstätten, wo es häufig zu Problemen mit der Raumakustik kommt, wurde das Klatschen und das Klangholz gewählt. Das Klangholz wird repräsentativ für ähnliche Klapper-Geräusche, die beim Spielen entstehen, betrachtet. Das Geräusch des Glases steht für Besteck oder Geschirr, das sowohl in Kindertagesstätten als auch in Wohnräumen einen subjektiv unangenehmen Nachhall erzeugen könnte. Als Sprachbeispiel wurde ein Wort gewählt, welches einen Plosivlaut am Wortende aufweist. Für ein Wort mit einer weichen Endung wären andere Ergebnisse möglich, da es eine längere Ausklingzeit aufweist.

Tabelle 5.2: Geräusche, die für den Hörversuch ausgewählt und mit den Impulsantworten gefaltet wurden

Geräusch	Beschreibung
Klatschen	ein einzelnes Klatschen
Jamblock	ein hohler Plastikblock, der einmal angeschlagen wird
Sprache	eine männliche Stimme sagt in ruhiger Tonlage „Stopp“
Glas	ein Glas, das mit einem metallischen Gegenstand angeschlagen wird

5.2.3 Lautheit

Für die subjektive Beurteilung ist die Lautheit ein wichtiges Kriterium und beeinflusst die empfundene Lästigkeit (Fastl und Zwicker 2007: 327), deshalb wurde die Lautheit der Signale untereinander angepasst. Dieses Vorgehen sollte verhindern, dass Stimuli allein durch ihre höhere Lautheit beispielsweise als anstrengender bewertet werden. Zur Anpassung diente die *Loudness Toolbox* für MATLAB, siehe Tabelle A.2. Diese berechnet die Lautheit für zeitvariante Sounds und liefert die Perzentillautheit N_5 . Sie gibt an, welche Lautheit in 5% der Zeit überschritten wird (GENESIS S.A. 2009).

Alle Stimuli wurden nach dem Lautheitsmodell für instationäre Signale auf eine Lautheit von $N_5 = 32$ sone angepasst (DIN 45631 1991). Ein 1 kHz Sinus-Ton mit derselben Lautheit diente für die Kalibrierung des Schalldruckpegels für den Hörversuch. Überprüft wurde daraufhin noch der A-bewertete Schalldruckpegel am Kopfhörer, der für alle Stimuli $L_{AFmax} \approx 80$ dB(A) betrug.

5.3 Darbietung

Die Stimuli wurden über Kopfhörer dargeboten. So konnte der Versuch unabhängig vom Darbietungsraum sein und nicht von dessen raumakustischen Eigenschaften beeinflusst werden, ein reflexionsarmer Raum war nicht nötig. Nachteile der Wiedergabe über Kopfhörer sind die Im-Kopf-Lokalisation der Schallereignisse sowie eine unnatürliche Hörsituation. Der Frequenzgang des Kopfhörers wurde vor dem Versuch entzerrt, Details sind Anhang A.1 zu entnehmen.

Als Versuchsraum diente ein Regieraum der HAW Hamburg mit einem Rauminhalt von 90 m^3 . Eine Messung lieferte einen A-bewerteten Ruhepegel L_{Aeq} von 27,0 dB(A). Zur Wiedergabe der Stimuli wurde ein Notebook verwendet. Per USB war dieses mit dem Interface *Babyface 400* verbunden, an welches der Kopfhörerverstärker angeschlossen war. An diesen waren die Kopfhörer *Beyerdynamic DT-770 PRO* angeschlossen. Der Versuch konnte mit bis zu 2 Personen gleichzeitig durchgeführt werden. Weitere Informationen zu den verwendeten Geräten sind in Tabelle A.1 aufgeführt.

5.4 Durchführung

Zu Beginn des Hörversuchs wurden alle Versuchspersonen mündlich instruiert. Die Instruktion beinhaltete, dass die Versuchspersonen verschiedene Hörbeispiele beurteilen sollen. Ihnen wurde gesagt, dass es darum geht, welchen Einfluss Räume auf die gehörten Geräusche haben. Nachdem sie die Seite der Selbstauskunft ausgefüllt haben, wurden sie auf das weitere Vorgehen vorbereitet.

Der Versuch gliederte sich in 4 Abschnitte. Zu Beginn jedes Abschnitts hat die Versuchsperson die Möglichkeit, sich mit den Ratingskalen vertraut zu machen und hört einmal alle Stimuli, die in diesem Abschnitt zu bewerten sind, um einen Eindruck der Stimuli zu gewinnen und wie die Ratingskalen für die Stimuli ausgenutzt werden können. Daraufhin wird jedes Geräusch einzeln 3 Mal wiederholt und die Person bewertet das Gehörte anhand der vorgegebenen Skalen. Dieses Vorgehen wird für jedes Geräusch in jedem Abschnitt wiederholt. Zu Beginn des nächsten Abschnitts werden erneut einmal alle Stimuli abgespielt. Wenn die Beurteilung aller Geräusche abgeschlossen ist, wurden die Versuchspersonen gefragt, ob sie etwas anmerken möchten, Probleme hatten oder ihnen etwas aufgefallen ist. Die durchschnittliche Dauer des Versuchs betrug 30 Minuten.

Alle Versuchspersonen wurden zufällig in eine von drei Versuchspersonengruppen eingeteilt. Unter den drei Gruppen unterschied sich die Reihenfolge, in der die Adjektive auf den Fragebogenseiten abgefragt wurden nach Tabelle 5.4. Außerdem wurde die Reihenfolge, in der die Stimuli dargeboten wurden, variiert. Sowohl die Reihenfolge der Stimuli innerhalb der Abschnitte, als auch die Abfolge der Abschnitte wurden variiert, wie in Tabelle 5.3 dargestellt. Dies hatte den Zweck, Sequenzeffekte möglichst auszugleichen (Ellermeier et al. 2008).

Tabelle 5.3: Hörversuchsablaufplan für die unterschiedlichen Versuchsgruppen: Reihenfolge der Geräusche, jeder Gruppe wurden 5 Versuchspersonen zugeordnet

	Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C
Abschnitt 1	Klatschen	Glas	Jamblock
Abschnitt 2	Glas	Sprache	Klatschen
Abschnitt 3	Jamblock	Klatschen	Sprache
Abschnitt 4	Sprache	Jamblock	Glas

5.5 Ergebnisse

Es folgt die Auswertung und Beurteilung der gesammelten Daten. In der Analyse des Hörversuchs werden unterschiedliche Methoden angewandt. Mithilfe der Faktorenanalyse werden die abgefragten Adjektiven auf weniger Hauptfaktoren reduziert. Die Analyse der Varianzen und Konfidenzintervalle zeigt, wie die Hörsamkeit bei niedrigeren Absorptionsgraden gegenüberliegender Wände subjektiv bewertet wird.

Tabelle 5.4: Hörversuchsablaufplan für die unterschiedlichen Versuchsgruppen: Reihenfolge der Adjektive

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C
flatternd	rau	hallig
klar	laut	rau
anstrengend	lästig	angenehm
hallig	angenehm	flatternd
angenehm	hallig	lästig
lästig	anstrengend	klar
laut	klar	anstrengend
rau	flatternd	laut

Beurteilt wurden 4 Geräusche jeweils gefaltet mit 8 unterschiedlichen Impulsantworten im Hinblick auf 8 vorgegebene Adjektive. Zur Übertragung der Ergebnisse in Zahlenwerte wurden die verwendeten fünfstufigen Ratingskalen durch Werte von 1 (entspricht *gar nicht*) bis 5 (entspricht *außerordentlich*) numerisch codiert.

5.5.1 Versuchspersonen

Am Hörversuch haben 15 Personen teilgenommen. 12 Personen waren im Alter von 18 bis 34 Jahren und 3 Personen im Alter von 35 bis 54 Jahren. 6 Versuchspersonen waren weiblich und 9 männlich. 5 Versuchspersonen gaben an, Erfahrungen im Audibereich zu haben und keiner Person war eine Einschränkung ihres Hörvermögens bekannt.

Jeweils nach dem Hörversuch wurde ein informelles Interview mit den Versuchspersonen geführt. 6 Versuchspersonen merkten an, dass für sie der Begriff *rau* schwierig zu beurteilen war. 2 Versuchspersonen haben bemerkt, dass sie einige Geräusche nie als *angenehm* empfanden und eine Versuchsperson gab an, dass die Stimuli aufgrund ihrer Ähnlichkeit schwer zu beurteilen waren.

Es wird überprüft, ob Teilnehmer nach Durchführung des Hörversuchs aufgrund von inkonsistenten Antworten aus der Bewertung ausgeschlossen werden. Jeder Abschnitt des Hörversuch beinhaltet dafür einen Kontrollstimulus, mit dem die Zuverlässigkeit der Urteile der Versuchspersonen abgeschätzt wurde. Der Kontrollstimulus befand sich stets am Ende jedes Abschnitts, es war lediglich ein Geräusch aus dem Abschnitt, welches erneut abgespielt wurde und gemäß den vorgegebenen Skalen beurteilt werden sollte. Auf diese Weise bestand die Möglichkeit, unzuverlässige Versuchspersonen von der Auswertung auszuschließen. Die höchste Differenz zweier Bewertungen einer Versuchsperson bei demselben Stimulus lag bei 20 %, die mittlere Differenz aller Versuchspersonen lag bei 0,61 Skalenteilen, was 12,2 % entspricht und niedriger als die mittlere Standardabweichung ist. Die Intrarater-Reliabilität wird daher als hoch eingeschätzt und keine Versuchsperson wird von der Auswertung ausgeschlossen.

5.5.2 Statistische Größen

Die Auswertung bezieht sich auf folgende statistische Größen:

- Das **arithmetische Mittel** $\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n}$ gibt den Mittelwert an, der über alle Versuchspersonen gebildet wird.
- Die **Standardabweichung** beschreibt die Streuung der Werte um den arithmetischen Mittelwert. Sie gibt an, wie stark die Stichproben miteinander übereinstimmen und wird mit $\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}}$ berechnet.
- Der **Standardfehler** $\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$ normiert die Standardabweichung auf den Stichprobenumfang. Er verringert sich mit zunehmendem Stichprobenumfang und ist ein Maß für die Vertrauenswürdigkeit des Mittelwerts.
- Ein weiteres wichtiges Maß ist die **Varianz** mit $\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}$. Sie kennzeichnet die Variabilität von Messwerten.
- Das **95 %-Konfidenzintervall** gibt den Bereich an, bei dem mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % davon ausgegangen werden kann, dass sich dort der wahre Mittelwert befindet. Überlappen sich Konfidenzintervalle, wird angenommen, dass zwischen den Mittelwerten kein signifikanter Unterschied besteht.

Mit einem größeren Stichprobenumfang würden die Konfidenzintervalle kleiner und die arithmetischen Mittelwerte somit zuverlässiger. Vorausgesetzt alle anderen Parameter blieben gleich, besteht ein Verhältnis von $\frac{x}{\sqrt{x}}$ zwischen dem Stichprobenumfang x und dem Konfidenzintervall. Für eine halb so große Fehlerspanne müsste die Stichprobengröße vervierfacht werden, vorausgesetzt die anderen Parameter bleiben konstant. Die aufgezählten Kenngrößen des Hörversuchs sind im Anhang unter A.3.3 detailliert aufgeführt.

Die mittlere Standardabweichung beträgt 0,85 und der mittlere Standardfehler 0,22. Mit einem Stichprobenumfang von 15 Personen ergibt sich im Mittel ein Konfidenzintervall von $\approx 0,86$ Skaleneinheiten. Arithmetische Mittelwerte mit dem Abstand von einer Skaleneinheit unterscheiden sich bei diesem Konfidenzintervall demnach signifikant.

Für einige statistische Auswertungsmethoden wird eine Normalverteilung sowie Varianzhomogenität der Messwerte vorausgesetzt. Überprüft wird die Normalverteilung mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test. Wird von einem Schwellenwert der α -Fehlerwahrscheinlichkeit von 5 % ausgegangen, werden die Messwerte als normalverteilt getestet. Im Folgenden wird auf dieser Basis von einer Normalverteilung ausgegangen. Die Varianzhomogenität wird mithilfe des Barlett-Tests betrachtet. Es wird überprüft, ob die Nullhypothese, dass Varianzhomogenität vorhanden ist, wahr ist oder verworfen werden muss. Der Test hat ergeben, dass Varianzhomogenität vorliegt.

5.5.3 Korrelationen

Wenn zwei Variablen eine starke Korrelation zeigen, kann dies darauf hinweisen, dass sie einen redundanten Informationsgehalt aufweisen. Die Korrelation für die Adjektive bezüglich aller Stimuli ist in Tabelle 5.5 dargestellt. Sichtbar ist, dass Adjektive wie zum Beispiel *anstrengend* und *lästig* eine hohe Korrelation aufweisen.

Die Korrelation wird nach

$$r = \frac{n \sum_i x_i \cdot y_i - (\sum_i x_i) \cdot (\sum_i y_i)}{\sqrt{[n \sum_i x_i^2 - (\sum_i x_i)^2] \cdot [n \sum_i y_i^2 - (\sum_i y_i)^2]}}$$

berechnet (Bortz und Schuster 2010: S.157).

Tabelle 5.5: Korrelation zwischen den Adjektiven für alle Geräusche. Die markierten Werte zeigen eine hohe Korrelation ($|r| \geq 0,8$)

	angenehm	anstr.	flatternd	hallig	klar	lästig	laut	rau
angenehm	1,00	-0,95	-0,43	-0,43	0,51	-0,93	-0,68	-0,31
anstrengend	-0,95	1,00	0,45	0,45	-0,53	0,95	0,73	0,32
flatternd	-0,43	0,45	1,00	0,79	-0,87	0,45	0,02	0,90
hallig	-0,43	0,45	0,79	1,00	-0,88	0,50	0,01	0,58
klar	0,51	-0,53	-0,87	-0,88	1,00	-0,54	-0,07	-0,76
lästig	-0,93	0,95	0,45	0,50	-0,54	1,00	0,68	0,27
laut	-0,68	0,73	0,02	0,01	-0,07	0,68	1,00	0,09
rau	-0,31	0,32	0,90	0,58	-0,76	0,27	0,09	1,00

5.5.4 Faktorenanalyse

Die Faktorenanalyse untersucht, ob sich die Adjektive auf weniger Hauptfaktoren reduzieren lassen. Im Hörversuch wurden die Stimuli anhand von 8 Adjektiven bewertet. Diese Adjektive lassen sich mithilfe der Faktorenanalyse ordnen und reduzieren. Die Korrelationsmatrix hat bereits korrelative Zusammenhänge zwischen den Adjektiven aufgezeigt. Anhand der Faktorenanalyse können die Adjektive nun in voneinander unabhängige Gruppen klassifiziert werden. Sie liefert Faktorladungen, die angeben, wie gut eine Variable (ein Adjektiv) mit einer Variablen-Gruppe (Faktor) korreliert (Bortz und Schuster 2010: 512). Mit den 8 Adjektiven bzw. Variablen wird ein 8-dimensionaler Raum aufgespannt. Die p Dimensionen sollen verkleinert werden, sodass ein q-dimensionaler Unterraum mit q Dimensionen entsteht.

Ausgehend von den arithmetischen Mittelwerten der Urteile pro Geräusch und Absorptionsgrad wird eine Faktorenanalyse durchgeführt. Um zu bestimmen, wie viele Dimensionen der neue Unterraum aufspannt, bzw. welche Faktorenanzahl bestimmt wird, liefert der Scree-Test einen Anhaltspunkt, Details siehe Anhang A.3.4.

5 Hörversuch

Es wurden drei Faktoren berechnet, das Koordinatensystem mit den zu faktorisierenden Merkmalen als Achsen wird so gedreht, dass neue Achsen entstehen. Rotiert wurde nach dem Varimax-Kriterium. Die Faktoren werden so rotiert, dass die Varianz der quadrierten Ladungen pro Faktor maximiert wird (Bortz und Schuster 2010: 548).

Tabelle 5.6 und Abbildung 5.1 zeigen die Ladungen der 8 Adjektive auf den 3 Faktoren. In der Darstellung ist sichtbar, dass sich die Variablen *lästig* und *anstrengend* nah beieinander in positiver Richtung auf Faktor 1 befinden und gegenüber ist die Variable *angenehm*. *Flatternd* und *rau* liegen hauptsächlich auf Faktor 2 und *hallig* auf Faktor 3. *Klar* hingegen liegt auf den Faktoren 2 und 3 in negativer Richtung. Weitere Darstellungen sind im Anhang unter A.3.4 zu finden.

Von Bedeutung ist dabei auch die Varianz, die von den Faktoren aufgeklärt wird. Sie gibt an, zu welchem Anteil ein Faktor die gesamte Varianz erklärt und berechnet sich aus der Summe der quadrierten Ladungen der Variablen. Der erste Faktor klärt 41 % der Varianz auf, der zweite Faktor 29 % der Varianz und der dritte Faktor 21 %. Die Faktoren klären insgesamt eine Varianz von 91 % auf. Betrachtet wird außerdem die Kommunalität h^2 , d.h. wie gut die Adjektive durch die Faktoren erfasst werden. Sie ist in Tabelle 5.6 in der letzten Spalte dargestellt. Es zeigt sich, dass die Varianz aller Adjektive durch die drei Faktoren zu einem hohen Anteil ($\geq 0,89$) aufgeklärt wird. Lediglich die Varianz des Adjektivs *laut* wird zu nur 69 % durch die Faktoren erfasst.

Tabelle 5.6: Faktorladungen der Adjektive auf den 3 Faktoren sowie Kommunalität h^2 . Die markierten Werte zeigen eine hohe Faktorladung $|a| \geq 0,6$

Adjektive	Faktoren			h^2
	F1	F2	F3	
angenehm	-0,91	-0,23	-0,21	0,92
anstrengend	0,94	0,23	0,22	0,98
flatternd	0,17	0,81	0,50	0,93
hallig	0,17	0,40	0,88	0,97
klar	-0,25	-0,63	-0,66	0,89
lästig	0,90	0,16	0,32	0,95
laut	0,82	-0,11	-0,10	0,69
rau	0,05	0,97	0,21	0,99
aufgeklärte Varianz	41 %	29 %	21 %	91 %

Da die Faktorladungen eng beieinander liegen, ist es sinnvoll, für die Faktoren Überbegriffe zu finden, welche die Faktoren passend beschreiben.

- Der erste Faktor wird auf der positiven Seite durch die Merkmale *anstrengend*, *lästig* und *laut* und auf der negativen Seite durch das Adjektiv *angenehm* beschrieben. Mit diesem Faktor wird der Aspekt der **Lästigkeit** erfasst.

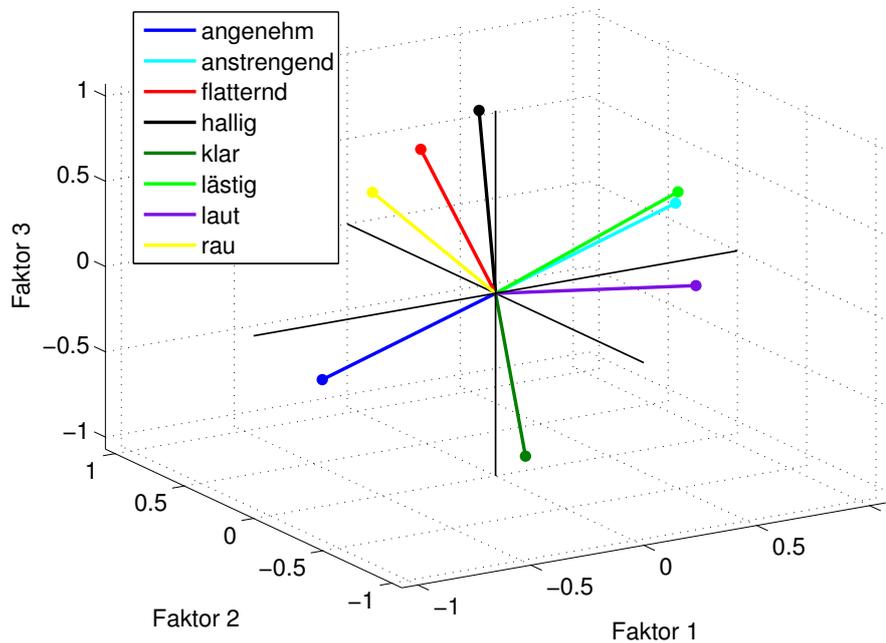


Abbildung 5.1: Grafische Darstellung der Faktorladungen der Adjektive auf den 3 Faktoren. Faktor 1: Lästigkeit, Faktor 2: Flattern, Faktor 3: Halligkeit

- Den zweiten Faktor kennzeichnen auf der positiven Seite hauptsächlich die Adjektive *flutternd* und *rau*. Auf der negativen Seite steht *klar*, jedoch mit einer geringeren Faktorladung (-0,63). Dieser Faktor kennzeichnet den Aspekt **Flattern**.
- Faktor 3 wird auf der positiven Seite durch *hallig* und auf der negativen Seite durch *klar* repräsentiert. Auch hier hat das Adjektiv *klar* die geringere Faktorladung (-0,66 gegenüber 0,88 bei *hallig*). Mit diesem Faktor wird hauptsächlich die **Halligkeit** erfasst.

Die Faktorenanalyse hat bestätigt, dass die im Hörversuch abgefragten Adjektive sich in 3 Gruppen einteilen lassen, in Lästigkeit, Flattern und Halligkeit. Es fällt auf, dass das Adjektiv *klar* gleichermaßen auf Faktor 2 und 3 liegt. Das bedeutet, dass es sowohl Flattern als auch Halligkeit beschreibt. Zusammenfassend wird festgestellt, dass aufgrund dieser Analyse, die Faktoren Lästigkeit, Flattern und Halligkeit für die Charakterisierung relevant sind und die Adjektive in diese 3 Kategorien eingeordnet werden. Wie die Kommunalitäten zeigen, werden die Adjektive mit den 3 Faktoren gut erfasst (bis auf die Ausnahme laut). Des Weiteren kann gesagt werden, dass ein wahrgenommenes Flattern gleichzeitig eine verringerte Klarheit zur Folge hat. Im Folgenden wird repräsentativ für Faktor 1 das Adjektiv *lästig* weiter analysiert und für Faktor 2 *flutternd*. Für Faktor 3 wird *hallig* ausgewählt. *Klar* wird als einzelnes Adjektiv betrachtet, da es sowohl Faktor 2 als auch Faktor 3 zugeschrieben wird.

5.5.5 Analyse der Varianzen und Konfidenzintervalle

Der Faktorenanalyse schließt sich eine Varianzanalyse sowie Betrachtung der Konfidenzintervalle an. Repräsentativ für die durch die Faktorenanalyse erfassten Faktoren werden die Adjektive *lästig*, *flatternd*, *hallig* und zusätzlich *klar* betrachtet.

Mithilfe der Varianzanalyse sowie der Konfidenzintervalle wird analysiert, welche Ergebnisse sich signifikant voneinander unterscheiden. Die Varianzanalyse (Analysis of Variances, ANOVA) überprüft den Einfluss von einer oder mehreren unabhängigen Variablen auf eine abhängige Variable (Bortz und Schuster 2010: 205).

Zunächst dient die Varianzanalyse zur Überprüfung der angepassten Lautheit der Stimuli. Sie lieferte keine signifikanten Unterschiede bei der Lautheitsbewertung, Details sind im Anhang A.3.5 aufgeführt.

Bei der zweifaktoriellen Varianzanalyse wird als unabhängige Variable zusätzlich zum Absorptionsgrad (Faktor A) das Geräusch (Faktor B) gewählt. Faktor A ist somit 8-stufig und Faktor B 4-stufig (Geräusche Jamblock, Klatschen, Glas und Sprache). Die zweifaktorielle Varianzanalyse zeigt, welche Faktoren mehr Varianz aufklären bzw. einen größeren Einfluss auf die Bewertung haben. Des Weiteren werden ggf. Interaktionseffekte sichtbar. Die Effektgröße η^2 gibt an, welcher Anteil der Gesamtvarianz durch einen Effekt bzw. Interaktion erklärt wird. Tabelle 5.7 zeigt die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der Varianzanalysen sowie die Konfidenzintervalle zusammenhängend betrachtet. So kann für die einzelnen Adjektive bzw. subjektiven Aspekte der Hörsamkeit eine differenzierte Auswertung erfolgen.

Die Ergebnisse der zweifaktoriellen Varianzanalyse zeigen bei der **Halligkeit** einen signifikanten Einfluss des Absorptionsgrads α , die Effektgröße (0,54) wird als groß klassifiziert (Bortz und Döring 2006: 606). Das Geräusch sowie Interaktionseffekte verursachen keine signifikanten Unterschiede. Dieses Ergebnis ist auch dem Diagramm 5.2 zu entnehmen, in dem die Konfidenzintervalle der Geräusche übereinander liegen. Bei dem Adjektiv *hallig* auf Abbildung 5.2 ist mit steigendem Absorptionsgrad die bewertete Halligkeit niedriger. Sichtbar ist außerdem, dass sich der Verlauf bei unterschiedlichen Geräuschen ähnlich verhält. Die Konfidenzintervalle der unterschiedlichen Geräusche überlappen jeweils. Es scheint für die wahrgenommene Halligkeit keinen Unterschied zu machen, um welches Geräusch es sich handelt, sondern der Absorptionsgrad und die damit verbundene Nachhallzeit ist von Bedeutung. Des Weiteren sichtbar ist die Überlappung von Konfidenzintervallen, wenn der Absorptionsgrad sich um 0,1 ändert. Kleine Änderungen des Absorptionsgrads führen demnach zu keinem signifikanten Unterschied in der wahrgenommenen Halligkeit.

Die Bewertung der **Klarheit** liefert signifikante Unterschiede bezüglich Geräusch und Absorptionsgrad und wird in Abbildung 5.3 dargestellt. Der Verlauf aller Bewertungen zeigt, dass ein niedriger Absorptionsgrad ($\alpha = 0$) der gegenüberliegenden Wände eine geringe Klarheit zur Folge hat. Ein hoher Absorptionsgrad ($\alpha = 0,3$) hingegen führt zu einer signifikant höheren Klarheit. Die Effektgröße des Absorptionsgrads auf die Bewertung der Klarheit ist nach Bortz und Döring (2006: 606) groß. Auch hier zeigen die Ergebnisse, dass erst große Absorptionsgrad-Unterschiede eine signifikant unterschiedliche Klarheit verursachen. Beim Extrem-

5 Hörversuch

Tabelle 5.7: Ergebnistabelle der zweifaktoriellen Varianzanalyse. Dargestellt sind die Quelle der Variation (Q.d.V., Geräusch, Absorptionsgrad α und Interaktion von Geräusch \times α), die Quadratsumme (QS), die Freiheitsgrade (df), die Varianz (σ^2), der F-Wert (F), der p-Wert (p) und die Effektstärke (η^2). Die beiden ** bedeuten, dass der empirische F-Wert größer als der für das 1 %-Niveau kritische F-Wert und damit sehr signifikant ist

Q.d.V.	Bewertung <i>hallig</i>					
	QS	df	σ^2	F	p	η^2
Geräusch	4,52	3	1,51	2,03	0,11	0,01
α	398,56	7	56,94	76,80 **	0,00	0,54
Geräusch \times α	9,26	21	0,44	0,59	0,92	0,01
Fehler	332,13	448	0,74			0,45
Total	744,48	479				

Q.d.V.	Bewertung <i>klar</i>					
	QS	df	σ^2	F	p	η^2
Geräusch	13,74	3	4,58	5,36 **	0,00	0,02
α	150,03	7	21,43	25,09 **	0,00	0,26
Geräusch \times α	23,16	21	1,10	1,29	0,17	0,04
Fehler	382,67	448	0,85			0,67
Total	569,59	479				

Q.d.V.	Bewertung <i>lästig</i>					
	QS	df	σ^2	F	p	η^2
Geräusch	47,56	3	15,85	18,59 **	0,00	0,10
α	39,31	7	5,62	6,59 **	0,00	0,08
Geräusch \times α	24,13	21	1,15	1,35	0,14	0,05
Fehler	382,00	448	0,85			0,77
Total	493,00	479				

Q.d.V.	Bewertung <i>flutternd</i>					
	QS	df	σ^2	F	p	η^2
Geräusch	55,43	3	18,48	23,72 **	0,00	0,08
α	202,93	7	28,99	37,22 **	0,00	0,31
Geräusch \times α	51,64	21	2,46	3,16 **	0,00	0,08
Fehler	348,93	448	0,78			0,53
Total	658,93	479				

beispiel von einem α -Wert von 0 liegen die Geräusche Jamblock und Klatschen im niedrigsten Bereich, mit Mittelwerten von 1,7 und 1,5. Glas und Sprache liegen bei circa 2,5. Jamblock und Klatschen werden tendenziell weniger klar bewertet

5 Hörversuch

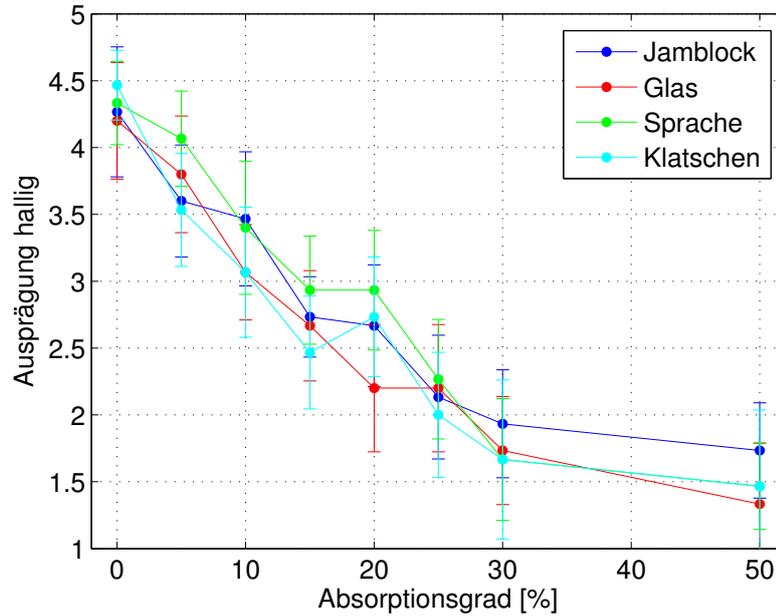


Abbildung 5.2: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung *hallig* über die Absorptionsgrade. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

als Glas und Sprache. Die Kurven vom Jamblock und vom Klatschen zeigen des Weiteren einen steileren Verlauf als die anderen beiden Geräusche.

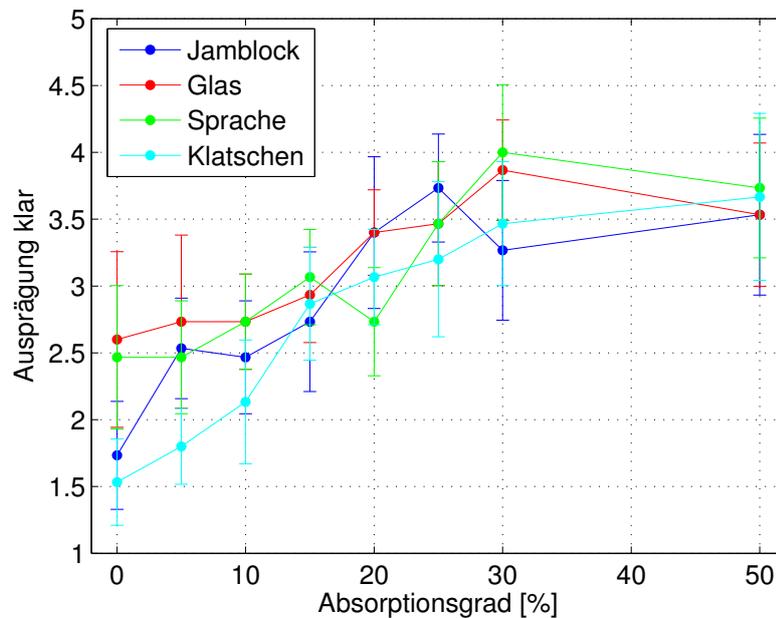


Abbildung 5.3: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung *klar* über die Absorptionsgrade. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

5 Hörversuch

Bei der **Lästigkeit** ist die Bewertung bezüglich Geräusch und Absorptionsgrad signifikant unterschiedlich. Beide Faktoren spielen eine Rolle, Interaktionseffekte hingegen nicht. Die Effektgröße des Geräuschs liegt im mittleren Bereich, die des Absorptionsgrads ist gering (Bortz und Döring 2006: 606). Die Darstellung der Mittelwerte und zugehöriger Konfidenzintervalle in Abbildung 5.4 gibt Aufschluss darüber, welche Geräusche sich unterscheiden. Beim Jamblock und der Sprache steigt die Lästigkeit mit sinkendem Absorptionsgrad im gleichen Maße an. Der Verlauf der Mittelwerte ist im Rahmen der Konfidenzintervalle gleich. Beim Glas und dem Klatschen ist sie über alle Absorptionsgrade in einem ähnlichen Bereich gleichbleibend und über variable Absorptionsgrade nicht signifikant unterschiedlich. Die Lästigkeit von Glas und Klatschen ist stärker ausgeprägt, über die Absorptionsgrade jedoch nicht signifikant unterschiedlich.

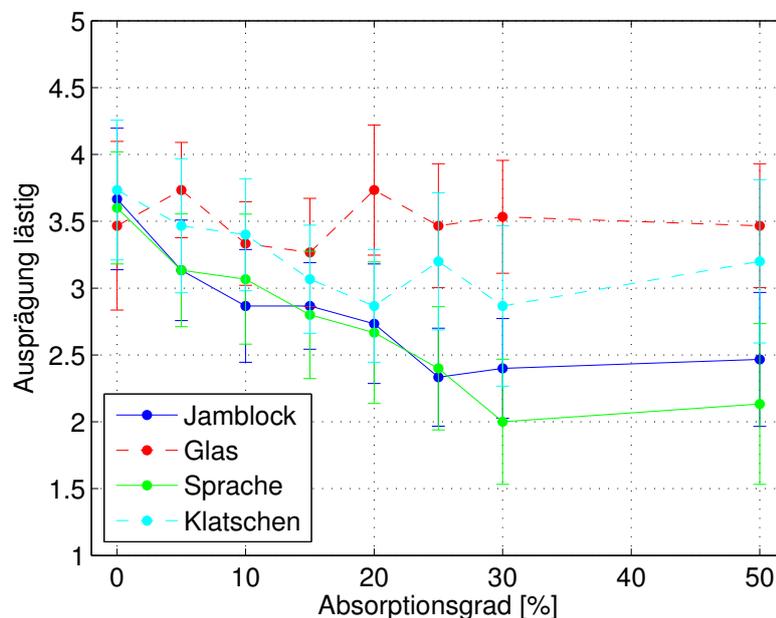


Abbildung 5.4: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung *lästig* über die Absorptionsgrade. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

Die Varianz des **Flatterns** wird nicht nur signifikant durch Geräusch und Absorptionsgrad aufgeklärt, sondern auch durch Interaktionseffekte beider Faktoren. Die Effektgröße des Absorptionsgrades ist groß, die des Geräuschs liegt im mittleren Bereich (Bortz und Döring 2006: 606).

Die Bewertung des *Flatterns* ist in Abbildung 5.5 mit den zugehörigen Konfidenzintervallen dargestellt. Es fällt auf, dass sich die Bewertung über die Absorptionsgrade hinsichtlich unterschiedlicher Geräusche unterscheidet, anders als bei der Halligkeit.

Für Sprache und Glas steigt das Flattern mit sinkendem Absorptionsgrad etwa gleich an. Beim Klatschen hingegen ist die Steigung des bewerteten Flatterns zu

5 Hörversuch

niedrigeren Absorptionsgraden höher, beim Jamblock noch höher; die Kurven verlaufen nicht parallel. Diese Unterschiede zwischen Geräusch und Absorptionsgrad verursachen hier die signifikanten Interaktionseffekte. Die Interaktionseffekte können durch die verschiedenen Geräuscharten und deren Anfälligkeit für Echos bzw. Flatterechos verursacht worden sein. Das Geräusch Jamblock zeigt sich anfälliger gegenüber Flatterechos als das Glas. Das Geräusch Jamblock hat eine kürzere Ausklingzeit als das Glas, ist somit echokritischer und ebenfalls anfälliger gegenüber Flatterechos.

Somit wird der Jamblock und das Klatschen stets flatternder bei einem niedrigen Absorptionsgrad bewertet als die Sprache oder das Glas. Die Bewertung bei einem α -Wert von 0 ergibt, dass der Jamblock als am stärksten *flatternd* bewertet wird, bei einem Mittelwert von 4,7. Dahinter folgt das Geräusch Klatschen mit 4. Mit überlappenden Konfidenzintervallen liegen Sprache und Glas im Bereich 2,5. Grundsätzlich heben sich die Geräusche Jamblock und Klatschen mit sinkendem Absorptionsgrad deutlich von den restlichen Stimuli ab. Im Bereich der Absorptionsgrade von 20 % aufwärts unterscheidet sich die Bewertung im Hinblick auf die Geräusche nicht mehr signifikant.

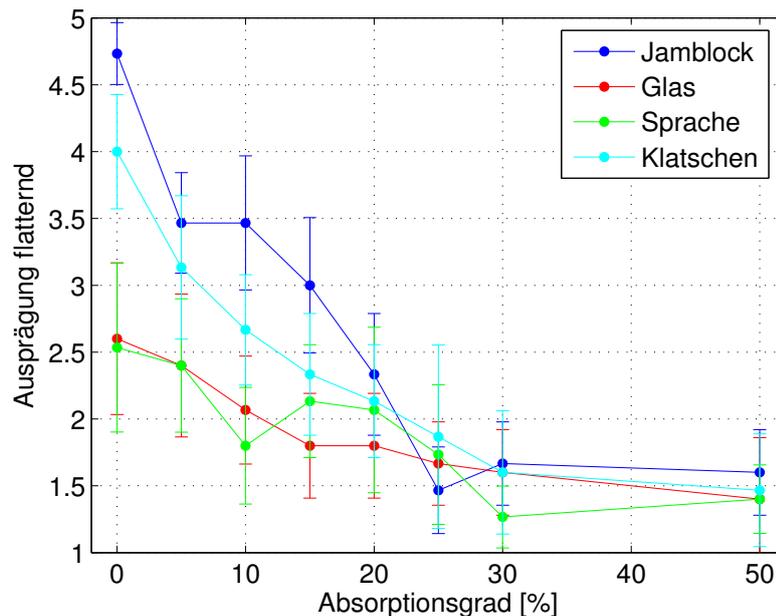


Abbildung 5.5: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung *flatternd* über die Absorptionsgrade. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

Die zweifaktorielle Varianzanalyse zeigt, dass die Bewertung der Hörsamkeit signifikant vom Absorptionsgrad α beeinflusst wird, bei der Bewertung der Klarheit, der Lästigkeit und des Flatterns zusätzlich vom Geräusch selbst.

Bei einigen Geräuschen unterscheidet sich die bewertete Hörsamkeit über verschiedene Absorptionsgrade nicht. Zeigen sich signifikante Unterschiede, so ist, je

5 Hörversuch

nach Geräusch, die Hörsamkeit zu niedrigeren Absorptionsgraden negativ beeinflusst. Konkret lästiger werden die Geräusche Jamblock und Sprache wahrgenommen, wenn der Absorptionsgrad sinkt. Alle Geräusche werden bei einem niedrigen Absorptionsgrad weniger klar sowie halliger beurteilt. Besonders das Klatschen und der Jamblock werden, je niedriger der Absorptionsgrad, als flatternder bewertet.

Die Hörsamkeit ist nicht ab einem bestimmten Absorptionsgrad grundsätzlich vermindert. Dafür weist die Bewertung der Hörsamkeit zu unterschiedliche Aspekte auf. Sie unterscheidet sich, je nachdem, welches Adjektiv betrachtet wird. Eine große Rolle spielt ebenfalls das Schallereignis selber. Wird bei einem 0-prozentigem Absorptionsgrad die Sprache und ein angeschlagenes Glas gerade als *mittelmäßig flatternd* und *mittelmäßig klar* bewertet, so wird ein klapperndes Geräusch (Jamblock) und ein Klatschen bereits als *kaum klar* und *ziemlich* oder *außerordentlich flatternd* beschrieben.

5.6 Diskussion

Durch den Hörversuch wurde getestet, welchen Einfluss periodische Reflexionen in kleinen Räumen auf die Hörsamkeit haben. Der Einfluss der periodischen Reflexionen wurde durch 8 unterschiedliche Absorptionsgrade α der gegenüberliegenden Wände umgesetzt. Pro Raumkonfiguration waren 4 Geräusche zu bewerten, es gab insgesamt 32 Stimuli. Die These, dass periodische Reflexionen eine verminderte Hörsamkeit zur Folge haben, wird bestätigt. Bestimmte Geräusche werden bei niedrigerem Absorptionsgrad negativ bewertet.

Im durchgeführten Hörversuch war eine spezielle Laborsituation nötig, um eine interne Validität zu erhalten, ein Versuch, der isoliert von äußeren Einflüssen stattfindet. Die externe Validität ist u.a. durch die Kopfhörerwiedergabe und der damit verbundenen Im-Kopf-Lokalisation der Schalle verringert und durch die Konzentration der Versuchspersonen auf die Stimuli ohne Hintergrundgeräusche durch die isolierte Darbietung, wie sie im Alltag gewöhnlich nicht vorkommt.

In dieser Konfiguration ändern sich auch stets die Nachhallzeiten und nicht nur die Anteile einer periodischen Reflexion. Für weitere Versuche könnte demnach die Simulation derart angepasst werden, dass die Nachhallzeiten konstant bleiben und sich lediglich der Anteil des Flatterechos ändert. Dies kann durch Anpassung der Absorptionsgrade erreicht werden.

Beispielsweise das Geräusch *Glas* wurde durchweg als lästig wahrgenommen. Dieses hat sich daher nicht zur Beurteilung von Auswirkungen von periodischen Reflexionen geeignet, da die Lästigkeit bei allen Absorptionsgraden gegeben war. Außerdem zeigten sich die Geräusche *Jamblock* und *Klatschen* anfälliger für ein hörbares Flattern als *Sprache* und das *Glas*. Wird bei einem 0-prozentigem Absorptionsgrad die Sprache und ein angeschlagenes Glas gerade als *mittelmäßig flatternd* und *mittelmäßig klar* bewertet, so wird ein klapperndes Geräusch (Jamblock) und ein Klatschen bereits als *kaum klar* und *ziemlich* oder *außerordentlich flatternd* beschrieben. U.a. Dietsch und Kraak (1986) hatten ebenfalls eine unterschiedliche Echoanfälligkeit für verschiedene Motivarten festgestellt und in ihrem

5 Hörversuch

Echokriterium nach der Echogrenze für Musik und Sprache unterschieden, da die Echoanfälligkeit auch von der spektralen und zeitlichen Struktur eines Signals abhängt. Zu beachten ist die Ausklingzeit des Geräuschs und ob durch eine längere Ausklingzeit die zeitliche Feinstruktur eines Flatterechos nicht mehr hörbar ist.

Ein wahrgenommenes Flattern beeinflusst die wahrgenommene Halligkeit nicht signifikant. Obwohl der *Jamblock* flatternder als das *Glas* bewertet wird, werden beide als gleich hallig eingestuft (dies deutete bereits die Faktorenanalyse an, *hallig* und *flatternd* liegen auf unterschiedlichen Faktoren). Dies zeigt, dass die Bewertung des Flatters weitgehend unabhängig von der Halligkeit ist, sondern von weiteren Faktoren wie Anteil der periodischen Reflexionen der Impulsantwort sowie vom Geräusch abhängig ist.

Die Bewertung des Flatters ergibt, dass bei bestimmten Geräuschen auch periodische Reflexionen in kleinen Räumen als Flatterecho wahrgenommen werden bzw. als flatternd und rau bewertet werden. Nach Mommertz und Müller-BBM (2008) entsteht ab Wegunterschieden $\leq 17 \text{ m} \hat{=} 50 \text{ ms}$ von periodischen Reflexionen ein schnarrender Klangeindruck. Auch Dietsch und Kraak (1986) stellten bereits Rauigkeitseffekte bei Zeitabständen $\leq 50 \text{ ms}$ von periodischen Echos (bei Sprache) fest. Diese Evaluierung konnte im durchgeführten Versuch bestätigt werden.

Die Faktorenanalyse hat gezeigt, dass die Bewertung der Rauigkeit und des Flatters auf demselben Faktor liegen und sich die Bewertungen der Rauigkeit und des Flatters nicht signifikant unterscheiden. Der Wandabstand führt zu einem Abstand der einzelnen Flatterecho-Reflexionen von $\approx 30 \text{ ms} \hat{=} 33 \text{ Hz}$. Ein Hörversuch mit variierenden Wandabständen könnte eine weitergehende Einordnung in die psychoakustische Wirkung von periodischen Reflexionen in Räumen liefern und weitere Auswirkungen auf die Hörsamkeit zeigen. Nach Fastl und Zwicker (2007) ist zwischen Schwankungsstärke und Rauigkeit zu unterscheiden, wobei bei 20 Hz ein Übergangsbereich besteht. Bilsen (1967) weist darauf hin, dass Flatterechos bzw. periodische Reflexionen Klangfärbungen verursachen können. Rubak (2004) zufolge ist zu unterscheiden zwischen einer zeitlichen und spektralen Wahrnehmung bezüglich unterschiedlicher Zeitabstände zwischen den Reflexionen, ab einer Zeitdifferenz $\leq 20 \text{ ms}$ wird hauptsächlich eine Klangfarbenänderung und nicht die zeitliche Struktur des Signals wahrgenommen. Andere Wandabstände könnten somit zu einer Unterscheidung zwischen Flattern und Rauigkeit sowie zu Klangfarbenunterschieden führen.

6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

In Kapitel 4 wurden die Impulsantworten, die auch für den Hörversuch verwendet wurden, anhand objektiver Hörsamkeitsparameter ausgewertet. Diese Ergebnisse werden im Folgenden mit den Subjektivbewertungen der Stimuli verglichen und auf Zusammenhänge überprüft.

6.1 Nachhallzeit

Die Bewertung der Halligkeit wird mit der kalkulierten Nachhallzeit T_{30} der Impulsantworten verglichen. Abbildung 6.1 zeigt die Bewertung der Halligkeit der verschiedenen Geräusche mit zugehörigen Konfidenzintervallen aufgetragen über die Nachhallzeit T_{30} der Impulsantworten auf der x-Achse. Die evaluierte Halligkeit steigt mit steigender Nachhallzeit, im Rahmen der Konfidenzintervalle gleich für alle Geräusche. Die subjektiv bewertete Halligkeit steigt zu größer werdender Nachhallzeit linear an, die Übereinstimmung zwischen bewerteter Halligkeit und berechneter Nachhallzeit ist für alle Geräusche hoch (Korrelation $r_{T_{30}, \text{hallig}} \approx 0,9$).

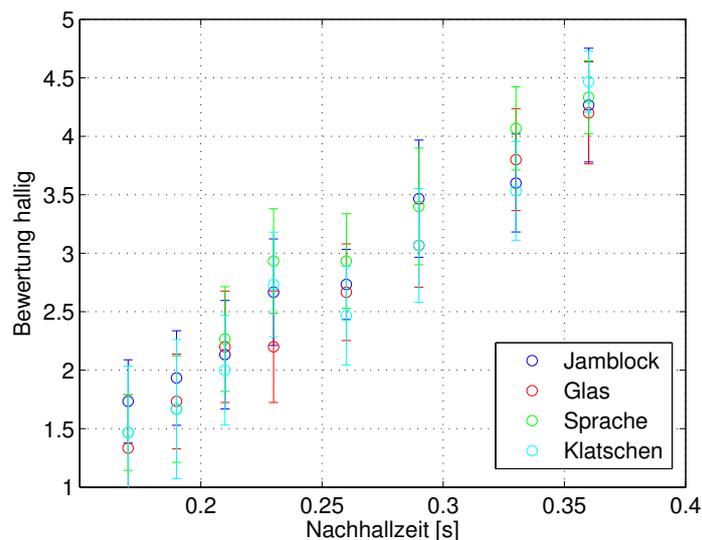


Abbildung 6.1: Bewertung der Halligkeit über die berechnete Nachhallzeit. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

6.2 Rauigkeit

Der Hörversuch hat gezeigt, dass Geräusche in Räumen mit niedrigem Absorptionsgrad gegenüberliegender Wände sowohl flatternd als auch rau empfunden werden. Die Bewertung hat sich je nach Absorptionsgrad und Geräusch unterschieden, die Geräusche Jamblock und Klatschen wurden als besonders flatternd und rau bewertet. Die Bewertung des *Flatterns* eines Geräuschs unterschied sich nicht signifikant von der bewerteten *Rauigkeit*. Abbildung 6.2 stellt das bewertete *Flattern* der berechneten Rauigkeit gegenüber. Die Rauigkeit wurde aus der Impulsantwort gemäß eines Rauigkeitsalgorithmus bestimmt (Oetjen et al. 2012). Für die Geräusche Jamblock und Klatschen zeigt sich eine hohe Übereinstimmung mit den Subjektivurteilen (Korrelation $r_{R,flatternd-Jamblock} = 0,9$, $r_{R,flatternd-Klatschen} = 0,8$). Für einige Impulsantworten (z.B. mit $\alpha = 0,05$) wurde jedoch eine zu niedrige Rauigkeit berechnet, die nicht mit der Subjektivbeurteilung übereinstimmt und nicht zum hohen Anteil der Flatterecho-Reflexionen in der Impulsantwort passt.

Die Berechnung der Rauigkeit der Impulsantworten kann demnach einen Ansatz für die Flatterecho-Anfälligkeit eines Raumes bieten. Je nach Geräusch unterscheidet sich die tatsächlich wahrgenommene Rauigkeit bzw. das Flattern zur berechneten Rauigkeit der Impulsantwort. Besonders das Geräusch *Glas* wurde nicht flatternd bewertet und korreliert daher nicht mit der berechneten Rauigkeit (Korrelation $r_{R,flatternd-Glas} = 0,3$), beim *Jamblock* hingegen ist die Übereinstimmung hoch.

6.3 Amplitudenschwankung

Die Ergebnisse des Hörversuchs liefern für einige Geräusche und Absorptionsgrade Bewertungen im Bereich *außergewöhnlich flatternd* und *außergewöhnlich rau*.

Abbildung 6.3 stellt die kalkulierte Pegeldifferenz ΔL zwischen Flatterecho-Reflexionen und restlichen Reflexionen in der Impulsantwort dem bewerteten Flattern gegenüber. Besonders die subjektive Bewertung von einem *außerordentlich flatterndem* und *überhaupt nicht flatterndem* Geräusch zeigt hohe Übereinstimmung mit der Berechnung. Die mittlere Korrelation zwischen Berechnung und Bewertung beträgt $r_{\Delta L,flatternd} \approx 0,8$.

Die Ergebnisse zeigen, dass die subjektiv bewertete Hörsamkeit in Bezug auf *flatternd* und *rau* nicht nur vom Raum abhängig ist, sondern auch stark vom Schallereignis beeinflusst wird, da die Geräusche hier unterschiedlich *flatternd* bzw. *rau* bewertet wurden.

6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

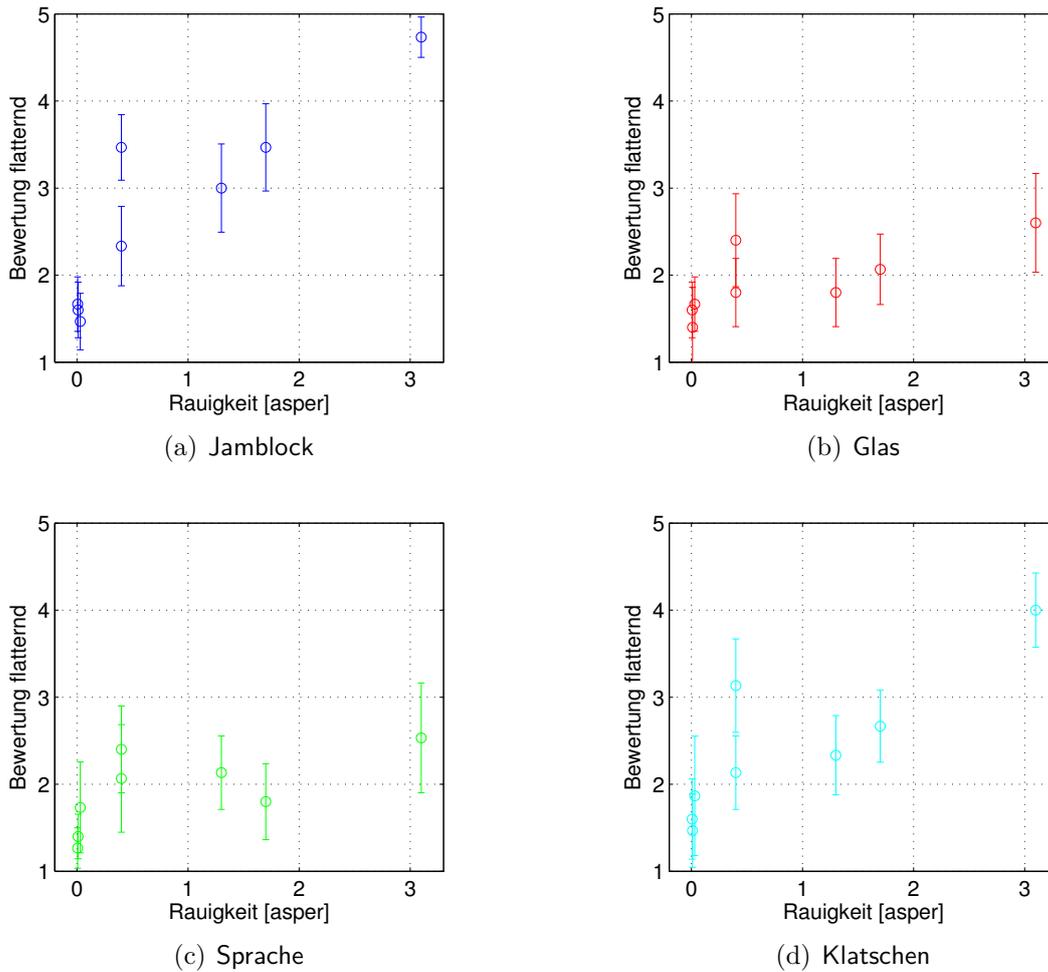


Abbildung 6.2: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Flatters für verschiedene Geräusche über die berechnete Rauigkeit in asper. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

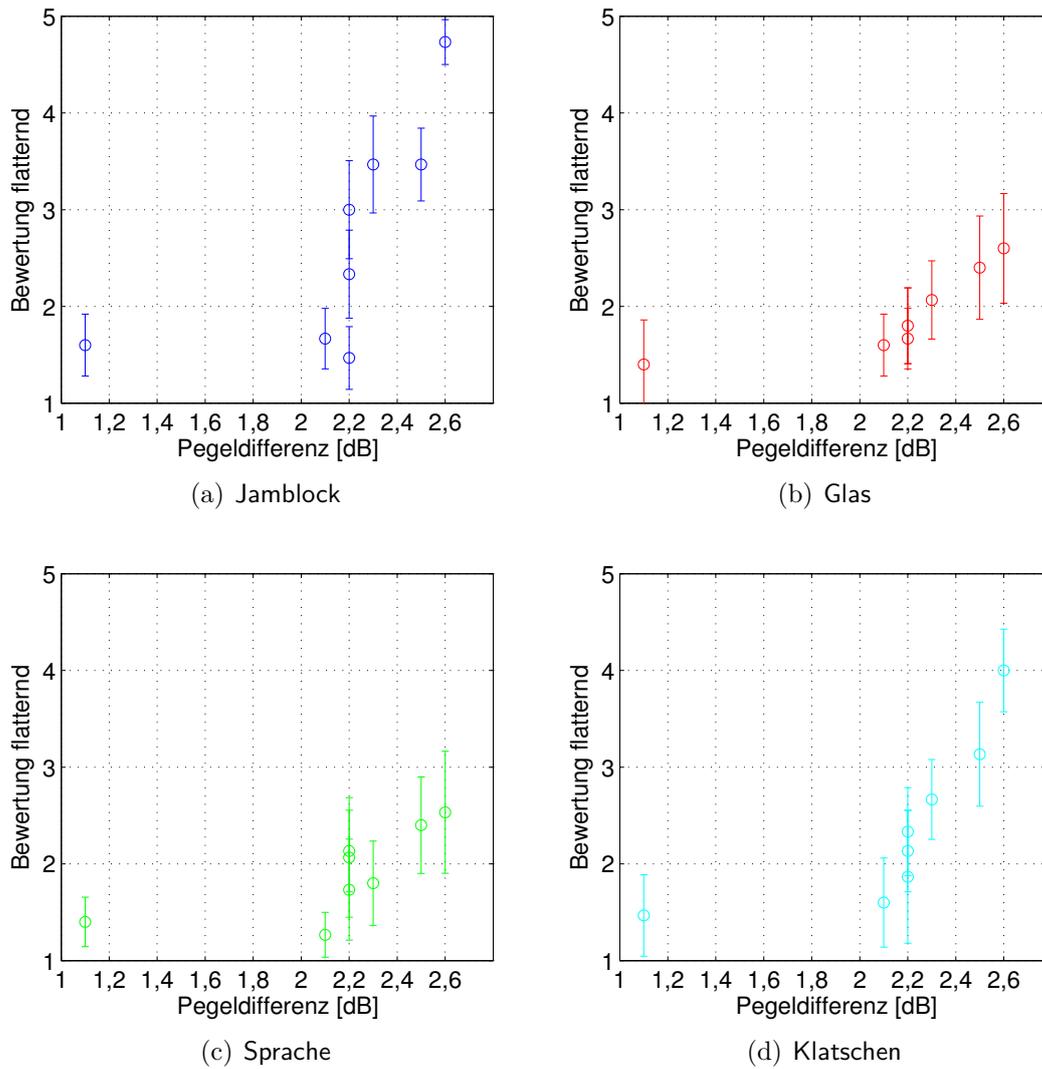


Abbildung 6.3: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Flatters für verschiedene Geräusche über die berechnete Pegeldifferenz ΔL in dB. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

6.4 Lästigkeit

Die Auswirkungen auf die Hörsamkeit von periodischen Reflexionen äußern sich im Hörversuch nicht nur im Flattern oder der Klarheit, sondern auch in der Lästigkeit.

Die empfundene Lästigkeit wird mit der berechneten Stärke der Amplitudenschwankung verglichen. Die Amplitudenschwankung wurde in Abschnitt 4.7 anhand der Pegeldifferenz ΔL zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen angenähert. Die Lästigkeit gegenüber der berechneten Pegeldifferenz ΔL zeigt Abbildung 6.4. Der Vergleich zeigt eine hohe Korrelation der berechneten Pegeldifferenz mit der Subjektivbewertung der Lästigkeit für die Geräusche *Sprache* (Korrelation $r_{\Delta L, \text{l\"astig-Sprache}} = 0,7$) und *Jamblock* (Korrelation $r_{\Delta L, \text{l\"astig-Jamblock}} = 0,6$), für *Glas* ist die Übereinstimmung gering (Korrelation $r_{\Delta L, \text{l\"astig-Glas}} = 0,1$), da es stets mit *ziemlich lästig* bewertet wurde.

Die Pegeldifferenz zeigt hohe Übereinstimmungen mit der Subjektivbewertung der Lästigkeit. Die Bewertung ist jedoch stark geräuschabhängig, bei *Jamblock* und *Sprache* ist die Korrelation hoch, beim *Glas* hingegen sehr gering.

Der Vergleich der evaluierten Lästigkeit mit der berechneten Rauigkeit der Impulsantworten zeigt eine geringere Übereinstimmung, siehe Anhang A.4.

6.5 Diskussion

Wie die Auswertung der Nachhallzeiten gezeigt hat, liegen diese unter dem empfohlenen Bereich (DIN 18041 2004). Trotzdem werden hier Stimuli aus Räumen mit Nachhallzeiten von 0,36 s als *ziemlich hallig* bewertet.

In diesem Versuch unterschied sich die Bewertung des *Flatterns* eines Geräuschs nicht signifikant von der bewerteten *Rauigkeit*. Auch die Faktorenanalyse hat gezeigt, dass beide Bewertungen auf demselben Faktor liegen. Im psychoakustischen Sinne ist die Empfindung *rau* und *flatternd* jedoch nicht gleichbedeutend (Fastl und Zwicker 2007). Für einige der Geräusche (Jamblock und Klatschen) zeigt sich eine hohe Übereinstimmung der berechneten Rauigkeit mit den Subjektivurteilen. Rauigkeitseffekte bei Flatterechos mit Zeitabständen ≤ 50 ms stellten bereits Dietsch und Kraak (1986) fest. Hier konnte, ergänzend zu Versuchen von Frey et al. (2014), gezeigt werden, dass auch eine Rauigkeitsberechnung mit dieser Wahrnehmung übereinstimmt.

Die Impulsantworten weisen, bedingt durch die periodischen Reflexionen, Amplitudenschwankungen auf. Diese haben eine Frequenz von 33 Hz. Bezüglich psychoakustischer Wahrnehmungsgrößen liegt diese Frequenz für Amplitudenschwankungen im Bereich zwischen Rauigkeit und Schwankungsstärke (Fastl und Zwicker 2007). Der verwendete Algorithmus, der zum Vergleich des Anteils periodischer Reflexionen und dem evaluierten Flattern verwendet wurde, ist zur Erkennung von Amplitudenschwankungen mit einem Zeitabstand ≥ 20 ms ausgelegt. Kleinere Zeitabstände würden zu Klangfarbenänderungen führen (Bilsen 1967) und waren nicht Gegenstand der Arbeit.

U.a. Fastl und Zwicker (2007: 243) beschreiben einen starken Einfluss psychoakustischer Wahrnehmungsgrößen wie Rauigkeit, Tonalität, Lautheit und Schärfe auf

6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

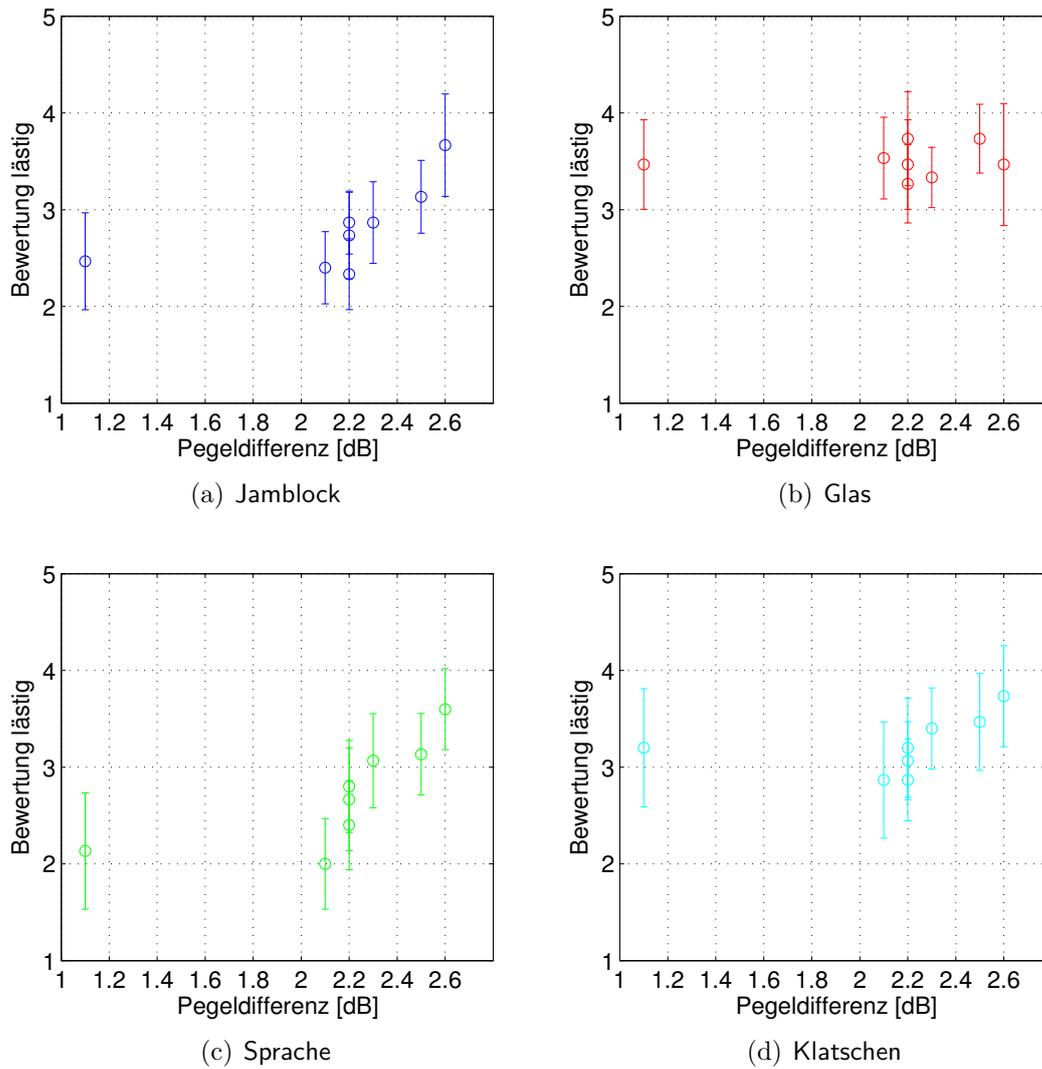


Abbildung 6.4: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung der Lästigkeit für verschiedene Geräusche über die berechnete Pegeldifferenz in dB. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

6 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

den subjektiv empfundenen Wohlklang (*sensory pleasantness*). Dahinter steht die Auffassung, dass grundsätzlich jeder Schall eine Art Störung darstellen kann, die umso größer ist, je stärker solche Schallparameter sind, die als missklingend empfunden werden, wie Rauigkeit (Möser 2010: 630). In diesem Vergleich konnte ebenfalls eine Korrelation zwischen der berechneten Rauigkeit und der bewerteten Lästigkeit festgestellt werden. Für das *Glas* ist die Übereinstimmung gering, hier spielen ggf. andere Geräuscheigenschaften eine größere Rolle. Im durchgeführten Versuch war die Lautheit der Stimuli gleich, die Rauigkeit wurde durch die verschiedenen Absorptionsgrade und Geräusche beeinflusst. Die Tonalität und Schärfe können hingegen stark vom Geräusch abhängig sein. Das *Glas* weist eine hohe Tonalität auf, die möglicherweise die von den Versuchspersonen evaluierte stets hohe Lästigkeit zur Folge hat.

Die psychoakustische Lästigkeit (*psychoacoustic annoyance*) wird ebenfalls von Rauigkeit, Lautheit, Schärfe und zudem von der Schwankungsstärke beeinflusst (Fastl und Zwicker 2007: 327). Dieser Zusammenhang zwischen Anteil des Flatterechos bzw. Amplitudenschwankung und Lästigkeit wird hier auf Raumimpulsantworten übertragen; er ist jedoch stark abhängig vom Geräusch und welche weiteren Einflüsse es auf die Parameter der psychoakustischen Lästigkeit hat. Die Lautheit zwischen den Geräuschen wurde angeglichen und die Rauigkeit und Schwankungsstärke wird hauptsächlich durch den Wandabstand bzw. die Periode des Flatterechos bestimmt. Das Geräusch kann jedoch die Schärfe beeinflussen und durch seine eigene Ausklingzeit, ob Rauigkeit bzw. Schwankungsstärke wahrnehmbar ist. Außerdem ist die empfundene Lästigkeit von Geräuschen von weiteren, nicht für die psychoakustische Lästigkeit parametrisierten Größen wie persönliche Einstellung zum dargebotenen Geräusch abhängig.

Nach Dietsch und Kraak (1986) würde sich anbieten, vom kritischsten Geräusch auszugehen, bzw. dem Geräusch mit der höchsten Anfälligkeit für die Wahrnehmung eines Flatterechos oder von Rauigkeitseffekten, und anhand dessen die zu erwartende Lästigkeit mithilfe der Pegeldifferenz aus der Impulsantwort abzuschätzen.

7 Fazit

In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwieweit Flatterechos ebenso bei kleinen Wandabständen ($\leq 8,5$ m) die Hörsamkeit beeinflussen und wie eine Detektion der periodischen Reflexionen aus der Impulsantwort möglich ist.

Die Simulation ermöglichte die akustische Modellierung kleiner Räume, die aufgrund ihrer Struktur anfällig für periodische Reflexionen zwischen zwei gegenüberliegenden Wänden sind. Diese Impulsantworten stellten die Basis für den Hörversuch sowie für die Impulsantwortanalyse dar.

Der Hörversuch auf Basis der raumakustischen Simulation bestätigte die These, dass ein niedrigerer Absorptionsgrad gegenüberliegender paralleler Wände (Wandabstand hier 5 m) eine verminderte Hörsamkeit zur Folge hat. Da in der Simulation der Absorptionsgrad variiert wurde, änderte sich nicht nur der Anteil der periodischen Reflexionen, sondern ebenso die Nachhallzeit. Dies hat zur Folge, dass im Hörversuch zwei Parameter variierten: die Nachhallzeit und der Anteil des Flatterechos. Die Schallereignisse wurden bei einem niedrigeren Absorptionsgrad (demnach einem höheren Anteil von Flatterecho-Reflexionen) als flatternder, lästiger und weniger klar bewertet. Die Anfälligkeit für Flatterechos ist sowohl vom Absorptionsgrad als auch von den dargebotenen Geräuschen abhängig und nicht jedes Geräusch klingt bei einem niedrigen Absorptionsgrad flatternd. Es zeigte sich außerdem, dass für die dargebotenen Geräusche die Subjektivbewertung in 3 Faktoren aufgeteilt werden kann: Lästigkeit, Flattern und Halligkeit.

Die Betrachtung vorhandener Hörsamkeitsparameter zur Auswertung von Impulsantworten, wie beispielsweise das Echokriterium (Dietsch und Kraak 1986) und das Deutlichkeitsmaß C_{50} hat gezeigt, dass vorhandene gebräuchliche Raumakustik-Kriterien Flatterechos in kleinen Räumen nicht detektieren. Besonders in der Energie-Zeit-Darstellung der Impulsantwort sowie im zeitabhängigen Echokriterium werden die periodischen Amplitudenschwankungen deutlich sichtbar.

Ein vorhandener Rauigkeitsalgorithmus (Oetjen et al. 2012) liefert erste Ergebnisse in der Detektion periodischer Reflexionen aus der Impulsantwort, indem für die Impulsantworten mit periodischen Amplitudenschwankungen eine hohe Rauigkeit berechnet wird.

Auf Basis der Energie-Zeit-Darstellung und in Anlehnung an das Echokriterium (Dietsch und Kraak 1986) der Impulsantwort wurde die periodische Amplitudenschwankung anhand einer Pegeldifferenz zwischen Flatterecho- und restlichen Reflexionen quantifiziert. Hohe Werte dieser Pegeldifferenz bedeuten eine starke Amplitudenschwankung des Nachhalls (unabhängig von der Nachhallzeit) und bieten eine Detektionsmöglichkeit für Flatterechos. Der Vergleich der berechneten Pegeldifferenz zeigt eine hohe Übereinstimmung mit der Subjektivbeurteilung des *Flatterns*.

7 Fazit

Dieser Arbeit könnten sich weitere Untersuchungen bezüglich Flatterechos in kleinen Räumen anschließen. Es steht zur Frage, wie sich der Klangeindruck, z.B. Lästigkeit, Rauigkeit und Flattern, bei anderen Wandabständen verhält. Für weitere Versuche ließen sich außerdem ergänzende Adjektive wie schnarrend oder schwankend bewerten, um eine umfassendere Einordnung in psychoakustische Wahrnehmungsgrößen vornehmen zu können. Ein Maß der Amplitudenschwankung des Nachhalls kann auf Basis der Energie-Zeit-Darstellung oder in Anlehnung an das Echokriterium (Dietsch und Kraak 1986) weiterentwickelt und anhand von weiteren Hörversuchen verifiziert werden. Des Weiteren wäre dem Kriterium für periodische Amplitudenschwankungen eine Erprobung anhand von realen und nicht simulierten Impulsantworten anzuschließen. Für eine Kriteriumsentwicklung wäre ein durch Hörversuche erlangter Grenzwert anzustreben, ab dem sich (beispielsweise) 50 % der Menschen durch ein Flatterecho gestört fühlen.

A Anhang

A.1 Kopfhörerentzerrung

Die Kopfhörer, die für den Hörversuch dienen, sind geschlossene, diffusfeldentzerrte Studiokopfhörer. Um einen möglichst glatten Frequenzgang der Kopfhörer für den Hörversuch zu erhalten, wurde zunächst der Frequenzgang gemessen, um diesen dann mittels eines Equalizers auszugleichen. Die Messgeräte sind in Tabelle A.1 gelistet.

A.1.1 Messung

Die Übertragungsfunktion der Kopfhörer wurde mithilfe eines künstlichen Ohres gemessen. Der Kopfhörer war über einen Kopfhörerverstärker am Interface angeschlossen, das mit dem Notebook verbunden war. Im künstlichen Ohr befand sich das Mikrophon. Auf das künstliche Ohr wurde der Kopfhörer aufgebracht. Es wurde ein exponentieller Sinus-Sweep abgespielt und wieder aufgenommen.

A.1.2 Ergebnis

Um die Übertragungsfunktion des Systems, hier der Kopfhörer, zu erhalten, wurde der exponentielle Sweep und der aufgenommene exponentielle Sweep fouriertransformiert. Das Eingangssignal $X(s)$ des Systems ist der exponentielle Sweep, das Ausgangssignal $Y(s)$ der vom Kopfhörer abgespielte exponentielle Sweep im Frequenzbereich. Durch $H(s) = Y(s)/X(s)$ ergibt sich die Übertragungsfunktion des Systems, dessen Betrag der Amplituden-Frequenzgang ist. Der Amplitudenfrequenzgang ist in Abbildung A.1 dargestellt. Um den Amplitudengang des Kopfhörers auszugleichen, wurde er mittels Equalizer linearisiert. Der Equalizer wurde auf die Stimuli des Hörversuchs angewandt.

A Anhang

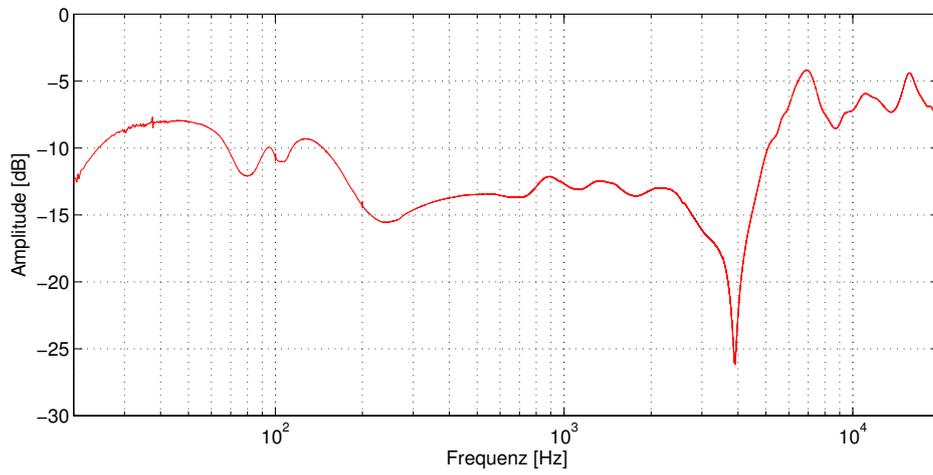


Abbildung A.1: Gemessener Amplituden-Frequenzgang der Kopfhörer Beyerdynamic DT770 PRO

A.2 Messgeräte und Programme

Tabelle A.1 und A.2 enthalten die verwendeten Messgeräte und Programme.

Tabelle A.1: Verwendete Geräte

Gerät	Typ	Hersteller	Serienr.	Anwendung
Hand-held Analyzer	2270	Brüel & Kjær	2746599	Hörversuch
Mikrofon	4189	Brüel & Kjær	2748583	Hörversuch
Kalibrator	4231	Brüel & Kjær	2734137	Hörversuch
Audio Interface	Babyface	RME	23649427	Hörversuch
Kopfhörer	DT-770 PRO	Beyerdynamic		Hörversuch
Kopfhörerverstärker	G92	Lake People	292017	Hörversuch
Messverstärker	2610	Brüel & Kjær		Kopfhörerent- zerrung
Künstliches Ohr	4153	Brüel & Kjær	1294889	Kopfhörerent- zerrung
Mikrofon	4134	Brüel & Kjær		Kopfhörerent- zerrung
Notebook	UL80VT	ASUS		Hörversuch, Kopfhörerent- zerrung

Tabelle A.2: Verwendete Programme und Tools

Tool	Version	Hersteller	Anwendung
Matlab	R2009B	The MathWorks Inc.	Auswertung Hörversuch und Impulsantworten
LoudnessToolbox		genesis	Auswertung Impulsantworten
MirToolbox	1.6.1	Lartillot, O., Toiviai- nen, P., Eerola, T.	Auswertung Impulsantworten
Foobar2000	1.3.8	Pawlowski, P.	Hörversuch
Audacity	2.0.5	Audacity Team	Geräuschaufnahme, Bearbei- tung Audiodateien
EASE	4.3	AFMG	Simulation
EASERA	1.1.3	SDA	Auswertung Impulsantworten

A.3 Hörversuch

A.3.1 Adjektive

Mittels eines Vorversuchs wurden Attribute gesammelt, mit denen der Höreindruck von periodischen Reflexionen in kleinen Räumen beschrieben werden kann. Tabelle A.3 zeigt die von 6 Versuchspersonen genannten Adjektive.

Tabelle A.3: Im Vorversuch von 6 Versuchspersonen genannte Adjektive zur Beschreibung des Höreindrucks der Stimuli

anstrengend	lästig	scheppernd
auffällig	nachhallend	schnarrend
flatternd	nachklingend	unangenehm
hallig	nervig	unklar
klappernd	rasselnd	unruhig
lärmig	rau	

A.3.2 Fragebogen

Die zwei folgenden Seiten sind Ausschnitte des Hörversuch-Fragebogens. Aufgeführt ist die erste Seite, die zur Selbstauskunft der Versuchsteilnehmer dient sowie die Seite, die zur Beurteilung jeweils eines Stimulus auszufüllen war.

Hörversuch

Im Folgenden sollen verschiedene Hörbeispiele beurteilt werden. Dabei handelt es sich um alltägliche Geräusche in unterschiedlichen Räumen und es geht darum, welchen Einfluss bestimmte Räume auf das Gehörte haben. Der Test gliedert sich in vier Abschnitte. Zu Beginn jedes Abschnitts hören Sie als Beispiel mehrere Geräusche. Danach beginnt die eigentliche Bewertung, bei der jedes Geräusch einzeln wiederholt wird und Sie es gemäß den vorgegebenen Skalen beurteilen.

Der Test wird circa 30 Minuten dauern.

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit!

Allgemeine Fragen:

1. Geschlecht:

- weiblich
- männlich

2. Altersgruppe:

- unter 18 Jahre
- 18 bis 35 Jahre
- 36 bis 54 Jahre
- über 54 Jahre

3. Ist Ihnen eine Einschränkung Ihres Hörvermögens bekannt?

- ja
- nein

4. Haben Sie beruflich oder studiumsbedingt Erfahrungen im Audibereich?

- ja
- nein

Wie beurteilen Sie das gehörte Geräusch?**flatternd**

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

klar

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

anstrengend

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

hallig

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

angenehm

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

lästig

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

laut

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

rau

gar nicht kaum mittelmäßig ziemlich außerordentlich

A.3.3 Beurteilung der Stimuli

Die Abbildungen A.2 bis A.5 zeigen die arithmetischen Mittelwerte der Bewertung aller Versuchspersonen für jeweils ein Geräusch bezüglich unterschiedlicher Absorptionsgrade und Adjektive. Der arithmetische Mittelwert gilt als der beste Schätzwert für den wahren Messwert bei intervallskalierten Messwerten (Ellermeier et al. 2008) und liefert hier einen Überblick über die erhobenen Daten. Tabellen mit allen Mittelwerten, Standardabweichungen und Standardfehlern sind den nachfolgenden Tabellen zu entnehmen.

A Anhang

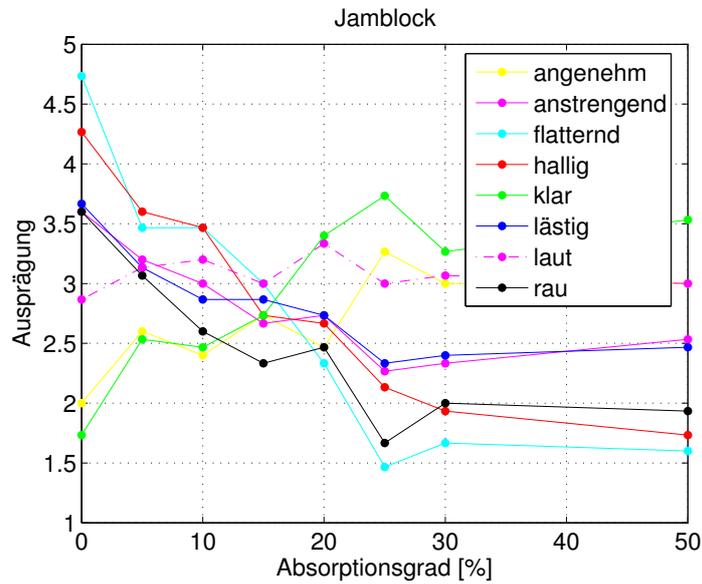


Abbildung A.2: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Geräuschs *Jamblock* für unterschiedliche Adjektive und Absorptionsgrade

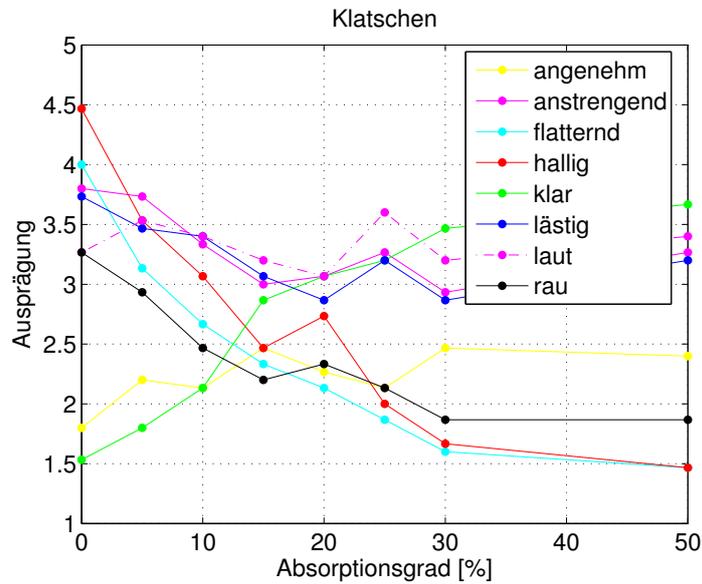


Abbildung A.3: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Geräuschs *Klatschen* für unterschiedliche Adjektive und Absorptionsgrade

A Anhang

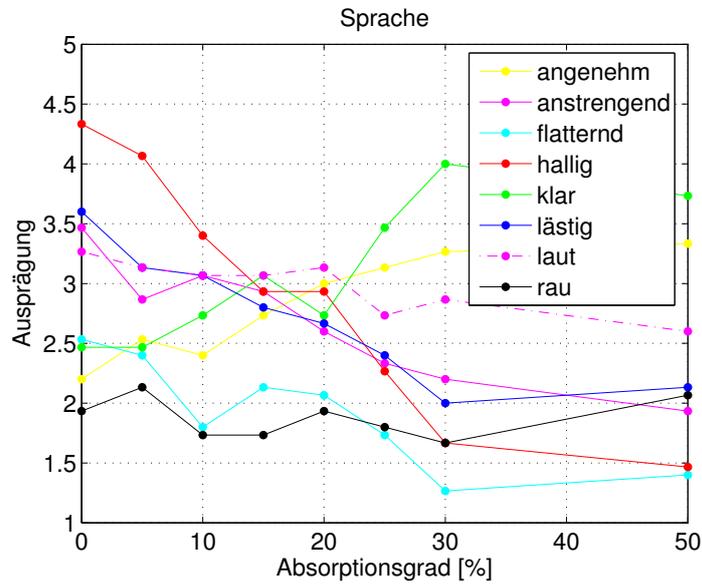


Abbildung A.4: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Geräuschs *Sprache* für unterschiedliche Adjektive und Absorptionsgrade

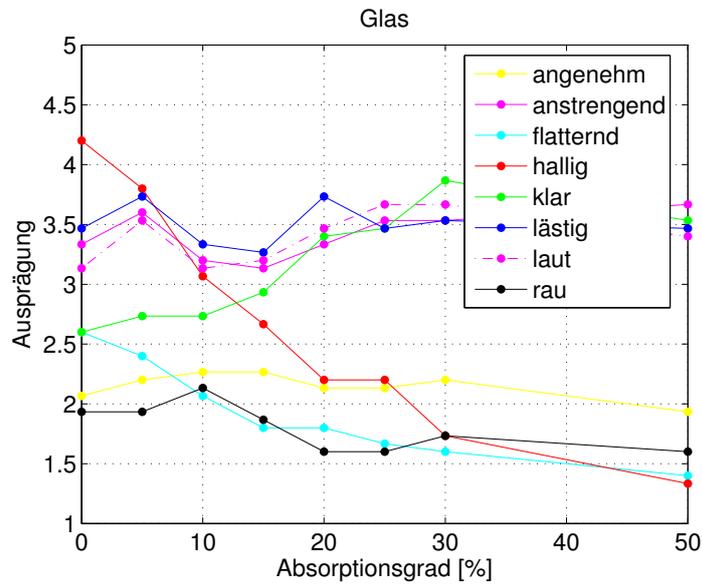


Abbildung A.5: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung des Geräuschs *Glas* für unterschiedliche Adjektive und Absorptionsgrade

A Anhang

Die folgenden Tabellen enthalten die arithmetischen Mittelwerte je Geräusch und Absorptionsgrad. Dargestellt ist außerdem die Standardabweichung sowie der Standardfehler.

Tabelle A.4: Hörversuch Daten für das Geräusch *Klatschen*

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
angenehm	0	1,80	0,86	0,22
angenehm	5	2,20	0,68	0,17
angenehm	10	2,13	0,64	0,17
angenehm	15	2,47	0,99	0,26
angenehm	20	2,27	0,59	0,15
angenehm	25	2,13	0,74	0,19
angenehm	30	2,47	0,74	0,19
angenehm	50	2,40	0,83	0,21
anstrengend	0	3,80	0,94	0,24
anstrengend	5	3,73	0,80	0,21
anstrengend	10	3,33	0,82	0,21
anstrengend	15	3,00	0,93	0,24
anstrengend	20	3,07	0,59	0,15
anstrengend	25	3,27	0,96	0,25
anstrengend	30	2,93	0,96	0,25
anstrengend	50	3,27	0,88	0,23
flatternd	0	4,00	0,85	0,22
flatternd	5	3,13	1,06	0,27
flatternd	10	2,67	0,82	0,21
flatternd	15	2,33	0,90	0,23
flatternd	20	2,13	0,83	0,22
flatternd	25	1,87	1,36	0,35
flatternd	30	1,60	0,91	0,24
flatternd	50	1,47	0,83	0,22
hallig	0	4,47	0,52	0,13
hallig	5	3,53	0,83	0,22
hallig	10	3,07	0,96	0,25
hallig	15	2,47	0,83	0,22
hallig	20	2,73	0,88	0,23
hallig	25	2,00	0,93	0,24
hallig	30	1,67	1,18	0,30
hallig	50	1,47	1,13	0,29
klar	0	1,53	0,64	0,17
klar	5	1,80	0,56	0,14
klar	10	2,13	0,92	0,24
klar	15	2,87	0,83	0,22
klar	20	3,07	0,70	0,18
klar	25	3,20	1,15	0,30

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
klar	30	3,47	0,92	0,24
klar	50	3,67	1,23	0,32
lästig	0	3,73	1,03	0,27
lästig	5	3,47	0,99	0,26
lästig	10	3,40	0,83	0,21
lästig	15	3,07	0,80	0,21
lästig	20	2,87	0,83	0,22
lästig	25	3,20	1,01	0,26
lästig	30	2,87	1,19	0,31
lästig	50	3,20	1,21	0,31
laut	0	3,27	0,70	0,18
laut	5	3,53	0,74	0,19
laut	10	3,40	0,74	0,19
laut	15	3,20	0,86	0,22
laut	20	3,07	0,59	0,15
laut	25	3,60	0,51	0,13
laut	30	3,20	0,77	0,20
laut	50	3,40	0,51	0,13
rau	0	3,27	0,96	0,25
rau	5	2,93	1,03	0,27
rau	10	2,47	1,13	0,29
rau	15	2,20	0,86	0,22
rau	20	2,33	0,90	0,23
rau	25	2,13	1,25	0,32
rau	30	1,87	0,83	0,22
rau	50	1,87	1,13	0,29

Tabelle A.5: Hörversuch Daten für das Geräusch *Jamblock*

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
angenehm	0	2,00	1,07	0,28
angenehm	5	2,60	0,99	0,25
angenehm	10	2,40	0,91	0,24
angenehm	15	2,73	0,70	0,18
angenehm	20	2,47	0,64	0,17
angenehm	25	3,27	0,80	0,21
angenehm	30	3,00	0,65	0,17
angenehm	50	3,00	0,93	0,24
anstrengend	0	3,60	0,91	0,24
anstrengend	5	3,20	0,68	0,17
anstrengend	10	3,00	1,00	0,26
anstrengend	15	2,67	0,62	0,16

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
anstrengend	20	2,73	0,80	0,21
anstrengend	25	2,27	0,70	0,18
anstrengend	30	2,33	0,72	0,19
anstrengend	50	2,53	0,92	0,24
flatternd	0	4,73	0,46	0,12
flatternd	5	3,47	0,74	0,19
flatternd	10	3,47	0,99	0,26
flatternd	15	3,00	1,00	0,26
flatternd	20	2,33	0,90	0,23
flatternd	25	1,47	0,64	0,17
flatternd	30	1,67	0,62	0,16
flatternd	50	1,60	0,63	0,16
hallig	0	4,27	0,96	0,25
hallig	5	3,60	0,83	0,21
hallig	10	3,47	0,99	0,26
hallig	15	2,73	0,59	0,15
hallig	20	2,67	0,90	0,23
hallig	25	2,13	0,92	0,24
hallig	30	1,93	0,80	0,21
hallig	50	1,73	0,70	0,18
klar	0	1,73	0,80	0,21
klar	5	2,53	0,74	0,19
klar	10	2,47	0,83	0,22
klar	15	2,73	1,03	0,27
klar	20	3,40	1,12	0,29
klar	25	3,73	0,80	0,21
klar	30	3,27	1,03	0,27
klar	50	3,53	1,19	0,31
lästig	0	3,67	1,05	0,27
lästig	5	3,13	0,74	0,19
lästig	10	2,87	0,83	0,22
lästig	15	2,87	0,64	0,17
lästig	20	2,73	0,88	0,23
lästig	25	2,33	0,72	0,19
lästig	30	2,40	0,74	0,19
lästig	50	2,47	0,99	0,26
laut	0	2,87	0,83	0,22
laut	5	3,13	0,35	0,09
laut	10	3,20	0,56	0,14
laut	15	3,00	0,53	0,14
laut	20	3,33	0,72	0,19
laut	25	3,00	0,65	0,17
laut	30	3,07	0,59	0,15

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
laut	50	3,00	0,65	0,17
rau	0	3,60	1,35	0,35
rau	5	3,07	0,88	0,23
rau	10	2,60	0,99	0,25
rau	15	2,33	0,82	0,21
rau	20	2,47	0,99	0,26
rau	25	1,67	0,62	0,16
rau	30	2,00	1,07	0,28
rau	50	1,93	1,03	0,27

Tabelle A.6: Hörversuch Daten für das Geräusch *Glas*

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
angenehm	0	2,07	0,96	0,25
angenehm	5	2,20	1,01	0,26
angenehm	10	2,27	0,59	0,15
angenehm	15	2,27	0,96	0,25
angenehm	20	2,13	0,64	0,17
angenehm	25	2,13	0,99	0,26
angenehm	30	2,20	0,86	0,22
angenehm	50	1,93	0,70	0,18
anstrengend	0	3,33	1,18	0,30
anstrengend	5	3,60	0,83	0,21
anstrengend	10	3,20	0,86	0,22
anstrengend	15	3,13	0,83	0,22
anstrengend	20	3,33	0,90	0,23
anstrengend	25	3,53	0,83	0,22
anstrengend	30	3,53	0,83	0,22
anstrengend	50	3,67	0,98	0,25
flatternd	0	2,60	1,12	0,29
flatternd	5	2,40	1,06	0,27
flatternd	10	2,07	0,80	0,21
flatternd	15	1,80	0,77	0,20
flatternd	20	1,80	0,77	0,20
flatternd	25	1,67	0,62	0,16
flatternd	30	1,60	0,63	0,16
flatternd	50	1,40	0,91	0,24
hallig	0	4,20	0,86	0,22
hallig	5	3,80	0,86	0,22
hallig	10	3,07	0,70	0,18
hallig	15	2,67	0,82	0,21
hallig	20	2,20	0,94	0,24

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
hallig	25	2,20	0,94	0,24
hallig	30	1,73	0,80	0,21
hallig	50	1,33	0,90	0,23
klar	0	2,60	1,30	0,34
klar	5	2,73	1,28	0,33
klar	10	2,73	0,70	0,18
klar	15	2,93	0,70	0,18
klar	20	3,40	0,63	0,16
klar	25	3,47	0,92	0,24
klar	30	3,87	0,74	0,19
klar	50	3,53	1,06	0,27
lästig	0	3,47	1,25	0,32
lästig	5	3,73	0,70	0,18
lästig	10	3,33	0,62	0,16
lästig	15	3,27	0,80	0,21
lästig	20	3,73	0,96	0,25
lästig	25	3,47	0,92	0,24
lästig	30	3,53	0,83	0,22
lästig	50	3,47	0,92	0,24
laut	0	3,13	0,64	0,17
laut	5	3,53	0,74	0,19
laut	10	3,13	0,52	0,13
laut	15	3,20	0,68	0,17
laut	20	3,47	0,64	0,17
laut	25	3,67	0,82	0,21
laut	30	3,67	0,82	0,21
laut	50	3,40	0,63	0,16
rau	0	1,93	0,96	0,25
rau	5	1,93	0,88	0,23
rau	10	2,13	0,99	0,26
rau	15	1,87	0,74	0,19
rau	20	1,60	0,83	0,21
rau	25	1,60	0,91	0,24
rau	30	1,73	0,80	0,21
rau	50	1,60	0,74	0,19

Tabelle A.7: Hörversuch Daten für das Geräusch *Sprache*

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
angenehm	0	2,20	0,68	0,17
angenehm	5	2,53	0,74	0,19
angenehm	10	2,40	0,74	0,19

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
angenehm	15	2,73	0,70	0,18
angenehm	20	3,00	0,76	0,20
angenehm	25	3,13	0,83	0,22
angenehm	30	3,27	0,80	0,21
angenehm	50	3,33	0,90	0,23
anstrengend	0	3,47	0,92	0,24
anstrengend	5	2,87	0,92	0,24
anstrengend	10	3,07	0,88	0,23
anstrengend	15	2,93	0,80	0,21
anstrengend	20	2,60	0,99	0,25
anstrengend	25	2,33	0,90	0,23
anstrengend	30	2,20	1,15	0,30
anstrengend	50	1,93	0,88	0,23
flatternd	0	2,53	1,25	0,32
flatternd	5	2,40	0,99	0,25
flatternd	10	1,80	0,86	0,22
flatternd	15	2,13	0,83	0,22
flatternd	20	2,07	1,22	0,32
flatternd	25	1,73	1,03	0,27
flatternd	30	1,27	0,46	0,12
flatternd	50	1,40	0,51	0,13
hallig	0	4,33	0,62	0,16
hallig	5	4,07	0,70	0,18
hallig	10	3,40	0,99	0,25
hallig	15	2,93	0,80	0,21
hallig	20	2,93	0,88	0,23
hallig	25	2,27	0,88	0,23
hallig	30	1,67	0,90	0,23
hallig	50	1,47	0,64	0,17
klar	0	2,47	1,06	0,27
klar	5	2,47	0,83	0,22
klar	10	2,73	0,70	0,18
klar	15	3,07	0,70	0,18
klar	20	2,73	0,80	0,21
klar	25	3,47	0,92	0,24
klar	30	4,00	1,00	0,26
klar	50	3,73	1,03	0,27
lästig	0	3,60	0,83	0,21
lästig	5	3,13	0,83	0,22
lästig	10	3,07	0,96	0,25
lästig	15	2,80	0,94	0,24
lästig	20	2,67	1,05	0,27
lästig	25	2,40	0,91	0,24

weiter auf der nächsten Seite

A Anhang

Adjektiv	α [%]	Mittelwert	Standardabweichung	Standardfehler
lästig	30	2,00	0,93	0,24
lästig	50	2,13	1,19	0,31
laut	0	3,27	0,80	0,21
laut	5	3,13	0,64	0,17
laut	10	3,07	0,46	0,12
laut	15	3,07	0,59	0,15
laut	20	3,13	0,35	0,09
laut	25	2,73	0,70	0,18
laut	30	2,87	0,74	0,19
laut	50	2,60	0,63	0,16
rau	0	1,93	0,88	0,23
rau	5	2,13	1,19	0,31
rau	10	1,73	0,80	0,21
rau	15	1,73	0,88	0,23
rau	20	1,93	0,80	0,21
rau	25	1,80	0,94	0,24
rau	30	1,67	0,62	0,16
rau	50	2,07	1,16	0,30

A.3.4 Faktorenanalyse

Die folgenden Abbildungen zeigen die Adjektive des Hörversuchs auf den 3 Hauptfaktoren. Außerdem zeigt Abbildung A.9 das Eigenwertdiagramm der Korrelationsmatrix für den Scree-Test. Nach dem Scree-Test wird nur eine Faktorenanzahl betrachtet, welche sich vor dem Knick im Diagramm befindet, in diesem Fall 3 (Bortz und Schuster 2010: 416).

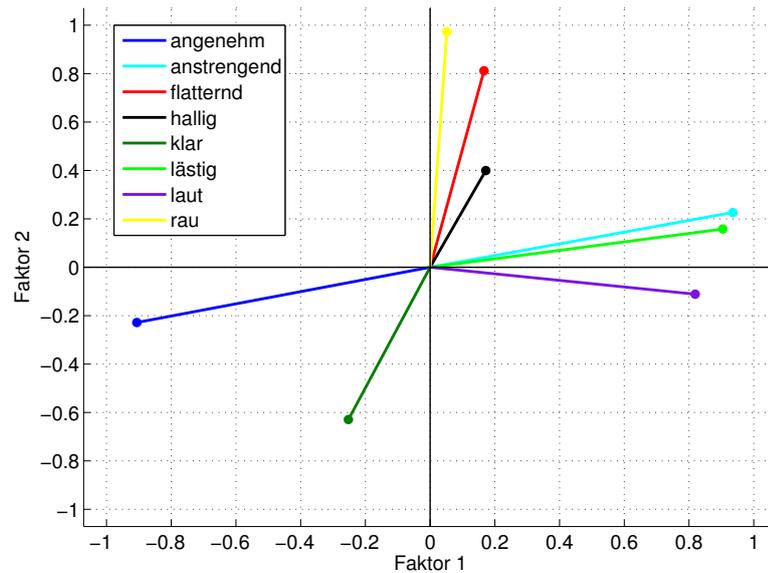


Abbildung A.6: Grafische Darstellung der Variablen auf den Faktoren 1 (Lästigkeit) und 2 (Flattern)

A Anhang

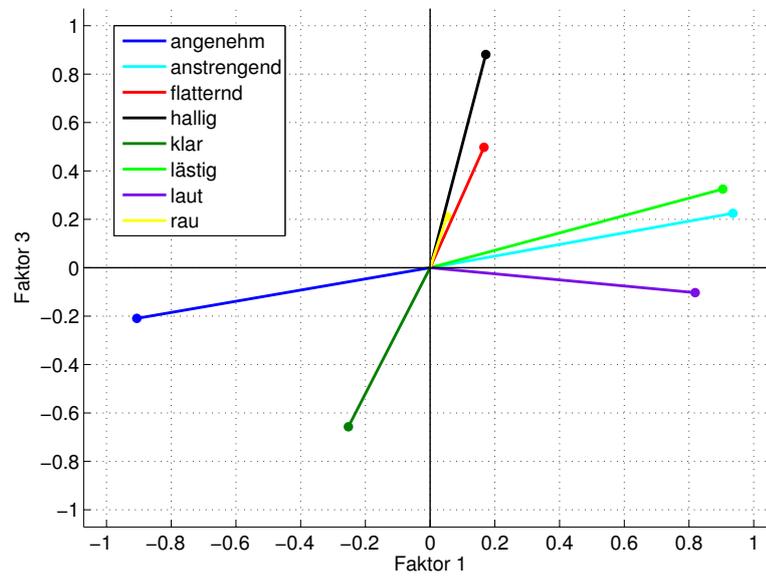


Abbildung A.7: Grafische Darstellung der Variablen auf den Faktoren 1 (Lästigkeit) und 3 (Halligkeit)

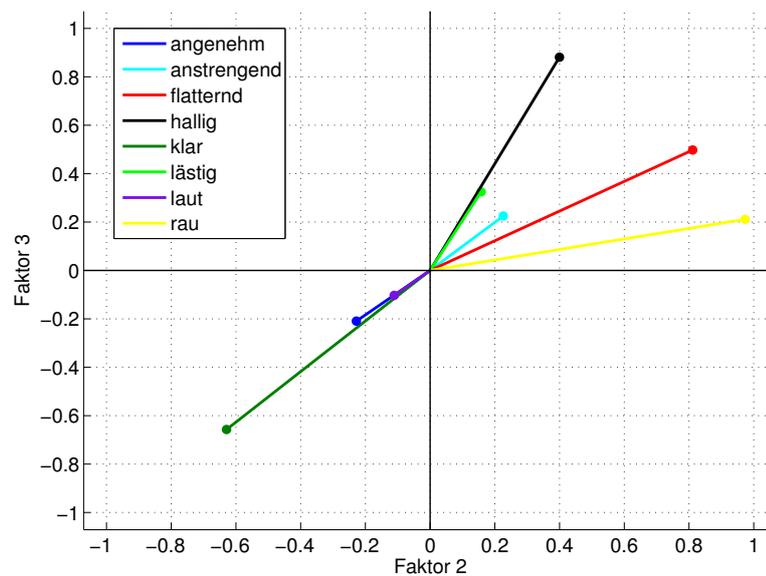


Abbildung A.8: Grafische Darstellung der Variablen auf den Faktoren 2 (Flattern) und 3 (Halligkeit)

A Anhang

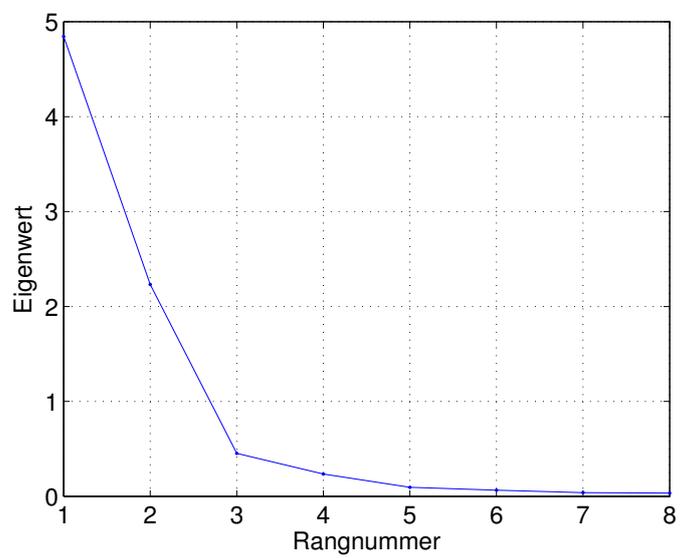


Abbildung A.9: Eigenwerte der Korrelationsmatrix

A.3.5 Lautheit der Stimuli

Die Lautheiten der Stimuli für den Hörversuch wurden aneinander angepasst. Zur Überprüfung, ob die Stimuli bei verschiedenen α -Werten immer gleich laut bewertet wurden, dient die Varianzanalyse. Untersucht wurde der Einfluss der unabhängigen Variable α auf die abhängige Variable *bewertete Lautheit*. Dargestellt ist das Ergebnis in Tabelle A.8. Die Lautheiten aller Geräusche, Jamblock, Klatschen, Sprache und Glas, unterscheiden sich bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 1 % nicht signifikant voneinander, die Mittelwertsunterschiede können als zufällig betrachtet werden. Damit kann die Lautheit der Stimuli über die variablen Absorptionsgrade als gleich bewertet angenommen werden.

Tabelle A.8: Ergebnistabelle der einfaktoriellen Varianzanalyse für das Adjektiv *laut*. Dargestellt ist die Quelle der Variation (Q.d.V.), die Quadratsumme (QS), die Freiheitsgrade (df), die Varianz (σ^2) und der F-Wert (F)

Q.d.V.	QS	df	σ^2	F
Lautheit Klatschen	3.47	7	0.50	1.04
Fehler	53.20	112	0.48	
Total	56.67	119	0.48	
Lautheit Jamblock	2.19	7	0.31	0.79
Fehler	44.13	112	0.39	
Total	46.33	119	0.39	
Lautheit Glas	5.20	7	0.74	1.55
Fehler	53.60	112	0.48	
Total	58.80	119	0.49	
Lautheit Sprache	5.43	7	0.78	1.95
Fehler	44.53	112	0.40	
Total	49.97	119	0.42	

A.4 Vergleich Impulsantwortanalyse und Hörversuchsergebnisse

In diesem Abschnitt sind Ergänzungen zum Vergleich der Impulsantwortanalyse und den Hörversuchsergebnissen aufgeführt.

Abbildung A.10 bildet die subjektiv empfundene Lästigkeit auf der aus der Impulsantwort berechneten Rauigkeit ab. Für die Geräusche *Jamblock* und *Sprache* steigt die berechnete Rauigkeit mit steigender Evaluierung der Lästigkeit. Das *Glas* wird stets mit einer hohen Lästigkeit bewertet, die Übereinstimmung mit der berechneten Rauigkeit ist gering.

A Anhang

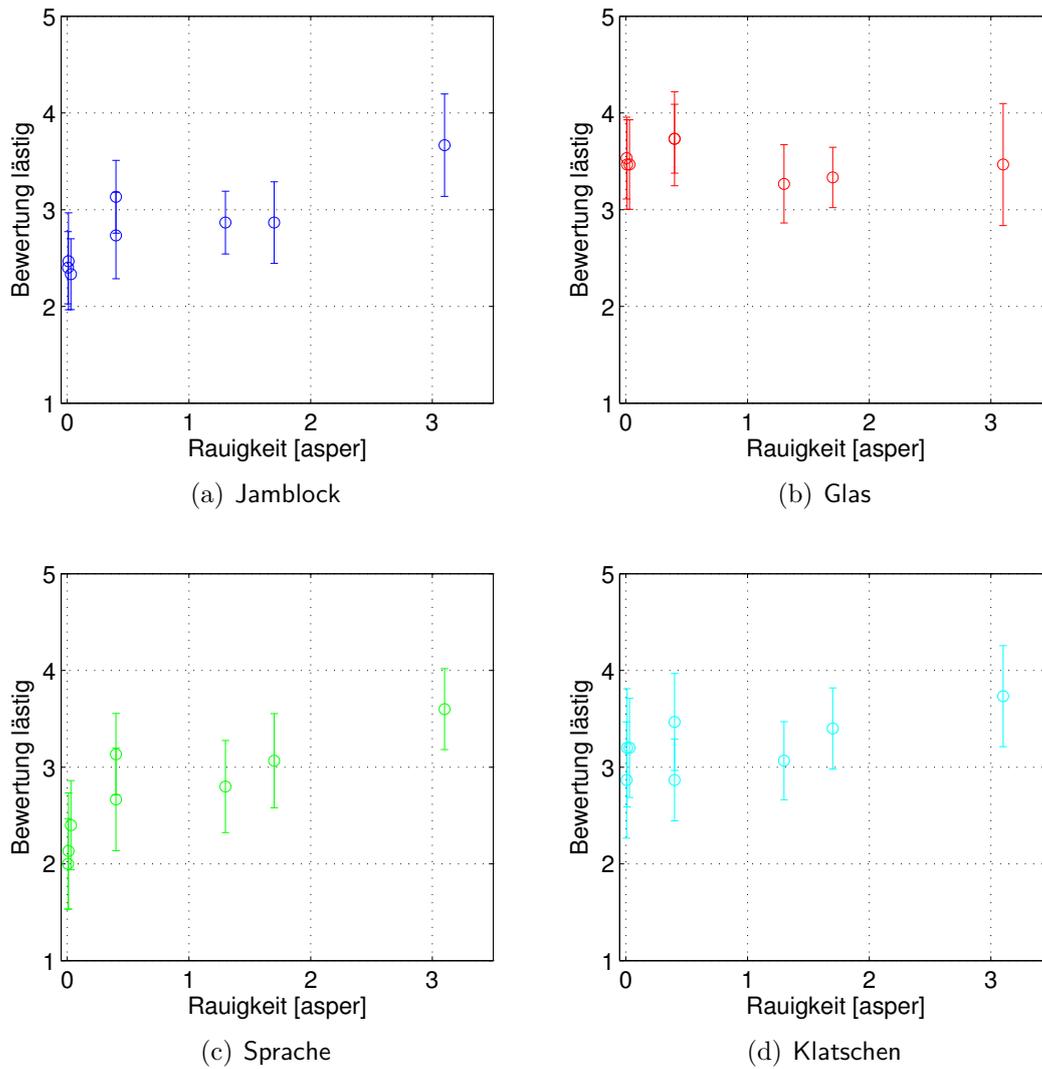


Abbildung A.10: Arithmetische Mittelwerte der Bewertung der Lästigkeit für verschiedene Geräusche über die berechnete Rauigkeit in asper. Die vertikalen Linien stellen die 95 % Konfidenzintervalle dar

A.5 Matlab Codes

Matlab Programmcode zur Faltung der Geräusche mit den Impulsantworten für den Hörversuch:

Matlab Programmcode:

```

1 clear all;
2 %liest Impulsantwort und Signal ein, normalisiert und faltet
   diese und exportiert das Ergebnis
3 ordner='...'; % hier Pfad von Impulsantwort einfügen
4 datei='...'; % Dateiname einfügen
5 endung='.wav';
6 pfad=[ordner datei endung];
7 [ir,fs1,nbits1] = wavread (pfad);
8 kanaele=size(ir);
9 kanaele=kanaele(1,2);
10 irL = ir(:,1);
11 irL = irL/max(abs(irL)); %normalisieren
12 ordner2='...'; % Pfad von Geräusch einfügen
13 datei2='...'; % Dateiname einfügen
14 pfad2=[ordner2 datei2 endung];
15 [signal,fs2,nbits2] = wavread (pfad2);
16 signalL = signal(:,1);
17 signalL = signalL/max(abs(signalL)); % normalisieren
18 if fs1~=fs2
19     'Achtung, unterschiedliche Abtastraten!'
20 end
21
22 convSignalL = conv(signalL, irL); % Faltung links
23 if kanaele==2
24     irR = ir(:,2);
25     convSignalR = conv(signalL, irR); % Faltung rechts
26     convSignal=[convSignalL, convSignalR];
27 else
28     convSignal=convSignalL;
29 end
30
31 convSignalNorm = convSignal/max(abs(convSignal)); %
   normalisieren
32 ausgabe=[ordner datei '_' datei2 endung];
33 wavwrite(convSignalNorm, fs1, 32, ausgabe);

```

A Anhang

Matlab Programmcode zur Berechnung der Pegeldifferenz ΔL aus dem Energie-Zeit-Diagramm der Impulsantwort:

Matlab Programmcode:

```
1 %liest als wav.-Datei vorliegende Impulsantwort ein und
   berechnet die Pegeldifferenz periodischer Reflexionen zu
   restlichen Reflexionen
2 %Voraussetzung: mir-toolbox, Matlab Statistics-Toolbox
3 clear all
4
5 %% Datei laden
6 ordner = '...'; % Pfad einfügen
7 datei = '...'; % Dateiname einfügen
8 endung = '.wav';
9 pfad = [ordner datei endung];
10 [ir, fs1, nbits1] = wavread (pfad);
11 kanaele = size(ir);
12 kanaele = kanaele(1,2);
13 ir = ir(:,1); %nur linken Kanal verwenden
14 ir = ir/max(abs((ir))); %Amplitude normalisieren
15 t1 = linspace(0,length(ir)/fs1,length(ir)); % Zeitvektor
16 energie = ir.^2;
17 energiedB = 10*log10(energie); %Schallenergiepegel
18
19 %% Direktschall suchen
20 x1 = 1; y1 = 0; idx = 1;
21 while y1 == 0
22     if ir(idx)>0.5 && ir(idx+1)<ir(idx) %0.5 wird
           überschritten und nachfolgender Wert ist kleiner
23         y1 = ir(idx);
24         x1 = idx;
25     else
26         y1 = 0;
27         idx = idx+1;
28     end
29 end
30 x1t = t1(x1); % x-Position Direktschall
31 x1e = x1-1;
32
33 %% AKF mir toolbox
34 a=miraucor(miraudio(ir),'Max',0.5);
35 mirakf=get(a,'Coeff');
36 mirakf=mirakf{1,1}{1,1};
37 lag=get(a,'Lag');
38 lag=lag{1,1}{1,1};
39
40 %% Maximum der MIRAUF ab delta2 Zeitverzögerung
```

A Anhang

```
41 delta2 = 400; % zeitverzögerung, ab der maxima gesucht werden
    soll
42 idx = delta2:length(mirakf);
43 [yfmirakf, xfmirakf] = max(mirakf(idx));
44 xfmirakf = xfmirakf+delta2-1;
45 xftmirakf = lag(xfmirakf);
46 disp('');
47 disp(['IR: ' datei]);
48 disp(['yfmirakf = ' num2str(yfmirakf) ' bei x = ' num2str(1000*
    xftmirakf) ' ms']);
49 xfakf = xfmirakf % Periodendauer des Flatterechos
50
51 %% Mit findpeaks die Schallenergie sinnvoller darstellen
52 % Maxima mit Minima vergleichen, dafür mit AKF ungefähren
    Bereich für erwartete Maxima suchen. Im jeweiligen Bereich
    davor Minima suchen
53
54 [pks, locs] = findpeaks(energie dB, 'MINPEAKDISTANCE', 10);
55 maxima_x = []; maxima_y = [];
56 minima_x = []; minima_y = [];
57
58 % überträgt index t1 zu index locs, da locs weniger Werte als
    t1 hat, da nur Maxima enthalten. I = Abweichung, Pos = Index
59 delta = xfakf/25; % Suchbereich vor und nach Wiederholung des
    Direktschalls
60 delta3 = xfakf/2;
61
62 for idx = 1:5 % Peaks der Schallenergie im Bereich
    Flatterenergie
63     [I Pos1]=min(abs(locs-(x1e+idx*xfakf-delta))); %
        Suchindex von Samples Schallenergie in Samples pks
        übertragen
64     [I Pos2]=min(abs(locs-(x1e+idx*xfakf+delta3)));
65     [sortvalues, sortindex] = sort(pks(Pos1:Pos2), 'descend
        '); %Maxima suchen und absteigend sortieren
66     maxima_x(idx) = locs(Pos1 + sortindex(1)-1);
67     maxima_y(idx) = sortvalues(1);
68 end
69
70 for idx = 1:5 % Peaks der Schallenergie im Restenergie Bereich
71     [I Pos1]=min(abs(locs-(x1e+(idx+1)*xfakf-4*delta3)));
72     [I Pos2]=min(abs(locs-(x1e+(idx+1)*xfakf-delta)));
73     [sortvalues, sortindex] = sort(pks(Pos1:Pos2), 'ascend'
        ); %Maxima suchen und ansteigend sortieren
74     minima_x(idx) = locs(Pos1 + sortindex(1) -1);
75     minima_y(idx) = sortvalues(1);
76 end
77
```

A Anhang

```
78 [fitdata_max,gofmax] = fit(t1(maxima_x)',maxima_y','poly1')
79 fitmax = coeffvalues(fitdata_max); % Gerade durch Maxima
80 [fitdata_min,gofmin] = fit(t1(minima_x)',minima_y','poly1','
    Lower',[fitmax(1)],'Upper',[fitmax(1)])
81 fitmin = coeffvalues(fitdata_min); % Gerade durch Minima
82
83 disp(['delta L =          ' num2str(fitmax-fitmin)]); %
    Pegeldifferenz
84
85 %% Diagramme zeichnen
86 figure
87 plot(t1,energiedB,'b');
88 hold on
89 plot(t1(locs),pks,'c','LineWidth',1.2);
90 plot(t1(maxima_x),maxima_y,'ob','LineWidth',2.5);
91 plot(t1(minima_x),minima_y,'or','LineWidth',2.5);
92 plot(fitdata_max,'b-');
93 plot(fitdata_min,'r-');
94 xlim([0 0.5]);
95 ylim([-90 0]);
96 xlabel('Zeit [s]');
97 ylabel('Schallenergie [dB]');
```

A Anhang

Matlab Programmcode zur Berechnung der Pegeldifferenz ΔL in Anlehnung an das Echokriterium nach Dietsch und Kraak (1986):

Matlab Programmcode:

```
1 %%liest als wav.-Datei vorliegende Impulsantwort ein und
   berechnet die Pegeldifferenz periodischer Reflexionen zu
   restlichen Reflexionen in Anlehnung das das Echokriterium
   nach Dietsch&Kraak
2 %Voraussetzung: mir-toolbox , Matlab Statistics-Toolbox
3
4 %% Datei laden
5 ordner = '...'; % Dateipfad einfügen
6 datei = '...'; % Dateiname einfügen
7 endung = '.wav';
8 pfad = [ordner datei endung];
9 [ir,fs1,nbits1] = wavread (pfad);
10 kanaele = size(ir);
11 kanaele = kanaele(1,2);
12 ir = ir(:,1); %nur linken Kanal verwenden
13 ir = ir/max(ir); %Amplitude normalisieren
14 t1 = linspace(0,length(ir)/fs1,length(ir));
15 energie = ir.^2;
16 %Direktschall suchen
17 x1 = 1; y1 = 0; idx = 1;
18 while y1 == 0
19     if ir(idx)>0.5 && ir(idx+1)<ir(idx) %0.5 wird
           überschritten und nachfolgender Wert ist kleiner
20         y1 = ir(idx);
21         x1 = idx;
22     else
23         y1 = 0;
24         idx = idx+1;
25     end
26 end
27 x1t = t1(x1); % x-Position Direktschall
28 x1e = x1-1;
29
30 %% Echokriterium nach Dietsch und Kraak
31 % deltau: 14ms Musik, 9ms Sprache
32 deltau = 0.005;
33 irabs = abs(ir);
34 irabsn = irabs.^(2/3); % n = 2/3 -> Sprache, 1 -> Musik
35 zaehler = irabsn.'; %|p(t)|^2/3
36 nenner = irabsn.'; %|p(t)|^2/3
37 for m = 1:length(irabsn)
38     zaehler(1,m) = zaehler(1,m).*(m/fs1); %|p(t)|^2/3 * t
39 end
40 zaehler(1,1) = 0; % erster Wert 0
```

A Anhang

```

41
42 % Elementweise summieren
43 sumzaehler = zeros(1,length(irabsn));
44 sumnenner = zeros(1,length(irabsn));
45 ek = zeros(1,length(irabsn));
46 sumzaehler(1,1) = zaehler(1,1); % jeweils ersten Wert
    definieren
47 sumnenner(1,1) = nenner(1,1);
48 for j = 2:length(irabsn) % Aufbaufunktion von Zaehler und
    Nenner bilden
49     sumzaehler(1,j) = sumzaehler(1,j-1) + zaehler(1,j);
50     sumnenner(1,j) = sumnenner(1,j-1) + nenner(1,j);
51 end
52 deltatau_s = round(deltatau*fs1); % ms in Samples
53 tstau=sumzaehler./sumnenner; % Aufbaufunktion Schwerpunktzeit
    t_s
54 delta_tstau = zeros(1,length(irabsn));
55 for k = 1:length(irabsn)-deltatau_s
56     delta_tstau(1,k) = tstau(1,deltatau_s+k)-tstau(1,1+k);
        % Zähler von EK(Tau)
57 end
58
59 tstau_beg = tstau(1,[1:deltatau_s])./deltatau;
60 delta_tstau = delta_tstau./deltatau; % Differenzenquotient
61 EKtotal = zeros(1,length(tstau_beg)+length(delta_tstau));
62 EKtotal(1,[1:length(tstau_beg)]) = tstau_beg;
63 EKtotal(1,[length(tstau_beg)+1:length(EKtotal)]) = delta_tstau;
64 t2 = linspace(0,length(EKtotal)/fs1,length(EKtotal));
65 EKtotal = EKtotal(1:length(ir)); % Echokriterium
66 EKtotaldB = 10*log10(EKtotal); % Echokriterium logarithmisch
67
68 %% AKF
69 a=miraucor(miraudio(ir),'Max',0.5);
70 mirakf=get(a,'Coeff');
71 mirakf=mirakf{1,1}{1,1};
72 lag=get(a,'Lag');
73 lag=lag{1,1}{1,1};
74 %% Maximum der AKF ab delta2 Zeitverzögerung
75 delta2 = 400; % Zeitverzögerung, für Maxima Suche
76 idx = delta2:length(mirakf);
77 [yfmirakf,xfmirakf] = max(mirakf(idx));
78 xfmirakf = xfmirakf+delta2-1;
79 xftmirakf = lag(xfmirakf);
80 disp(['yfmirakf = ' num2str(yfmirakf) ' bei x = ' num2str(1000*
    xftmirakf) ' ms']);
81 xfakf = xfmirakf % Periodendauer Flatterecho
82

```

A Anhang

```
83 %% Minima und Maxima der Amplitudenschwankung finden und
    vergleichen
84 maxima_x = [];
85 maxima_y = [];
86 minima_x = [];
87 minima_y = [];
88 delta = xfakf/25; % Suchbereich vor und nach Wiederholung des
    Direktschalls
89 delta3 = xfakf/2;
90 for idx = 1:5 % Peaks der Schallenergie im Bereich
    Flatterenergie
91     [sortvalues, sortindex] = sort(EKtotaldB(x1e+idx*xfakf-
        delta:x1e+idx*xfakf+delta3), 'descend');
92     maxima_x(idx) = t1(x1e+idx*xfakf-delta + sortindex(1)
        -1);
93     maxima_y(idx) = sortvalues(1);
94 end
95 for idx = 1:5 % Peaks der Schallenergie im Restenergie Bereich
96     [sortvalues, sortindex] = sort(EKtotaldB(x1e+(idx+1)*
        xfakf-4*delta3:x1e+(idx+1)*xfakf-delta), 'ascend');
97     minima_x(idx) = t1(x1e+(idx+1)*xfakf-4*delta3 +
        sortindex(1) -1);
98     minima_y(idx) = sortvalues(1);
99 end
100
101 [fitdata_max, gofmax] = fit(maxima_x', maxima_y', 'poly1')
102 fitmax = coeffvalues(fitdata_max); % Gerade durch Maxima
103 [fitdata_min, gofmin] = fit(minima_x', minima_y', 'poly1', 'Lower'
    , [fitmax(1)], 'Upper', [fitmax(1)])
104 fitmin = coeffvalues(fitdata_min); % Gerade durch Minima
105 disp(['delta L =          ' num2str(fitmax-fitmin)]); %
    Pegeldifferenz
106
107 %% Diagramme zeichnen
108 figure
109 plot(t1, EKtotaldB, 'b', 'LineWidth', 1.2);
110 hold on
111 plot(maxima_x, maxima_y, 'ob', 'LineWidth', 2.5);
112 plot(minima_x, minima_y, 'or', 'LineWidth', 2.5);
113 plot(fitdata_max, 'b-');
114 plot(fitdata_min, 'r-');
115 xlim([0 0.5]);
116 ylim([-18 0]);
117 xlabel('Zeit [s]');
118 ylabel('EK [dB]');
```

B CD

Die anhängende CD enthält die Daten, welche für diese Arbeit relevant sind. Folgende Daten befinden sich auf der CD:

Ordner Simulation

Innerhalb dieses Ordners finden sich die Dateien der simulierten Räume mit dem Programm EASE sowie die Impulsantworten.

Ordner Matlab

Der Ordner „Matlab“ enthält die erstellten Matlab M.-Files.

Ordner Hörversuch

Dieser Ordner enthält alle Dateien, die für den Hörversuch relevant sind. Im Unterverordner „Audio“ sind die verwendeten Audiodateien im Format .WAV gespeichert. Außerdem sind die Fragebögen im PDF-Format angehängt.

Ordner Dokument

Hier befindet sich die digitale Version dieser Bachelorarbeit im PDF-Format.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Schema Flatterecho	5
2.2	Schematisches Reflektogramm	8
3.1	Schema Spiegelschallquellen	14
3.2	EASE Screenshot 3D-Ansicht	16
3.3	EASE Screenshot Reflektogramm	19
3.4	EASE Screenshot Strahlenverfolgung	20
3.5	EASE Screenshot Strahlenverfolgung	21
3.6	EASE Screenshot Strahlenverfolgung	21
3.7	EASE Screenshot Strahlenverfolgung	22
3.8	EASE Screenshot Strahlenverfolgung	22
4.1	Impulsantwort und Energie-Zeit-Diagramm	24
4.2	Tannenbaum-Darstellung der Impulsantworten	25
4.3	Echokriterium Sprache	26
4.4	Echokriterium Musik	26
4.5	Schroeder Kurve	28
4.6	Autokorrelationsfunktion der Impulsantwort	30
4.7	Maxima des Schallenergiepegels	32
4.8	Flussdiagramm Pegeldifferenz ΔL	33
4.9	ETC-Diagramm zur Bestimmung von ΔL	34
4.10	Pegeldifferenz aus dem Echokriterium	36
4.11	Flussdiagramm Pegeldifferenz ΔL aus dem Echokriterium	37
4.12	Zeitabhängige Rauigkeit der Impulsantworten	39
5.1	Faktorenanalyse	50
5.2	Arithmetische Mittelwerte Hallig	53
5.3	Arithmetische Mittelwerte Klar	53
5.4	Arithmetische Mittelwerte Lästig	54
5.5	Arithmetische Mittelwerte Flatternd	55
6.1	Arithmetische Mittelwerte der Halligkeit über die Nachhallzeit	58
6.2	Arithmetische Mittelwerte des Flatterns über die Rauigkeit	60
6.3	Arithmetische Mittelwerte des Flatterns über die Pegeldifferenz ΔL	61
6.4	Arithmetische Mittelwerte der Lästigkeit über die Pegeldifferenz ΔL	63
A.1	Gemessener Amplituden-Frequenzgang der Kopfhörer	68
A.2	Arithmetische Mittelwerte Jamblock	74
A.3	Arithmetische Mittelwerte Klatschen	74

Abbildungsverzeichnis

A.4	Arithmetische Mittelwerte Sprache	75
A.5	Arithmetische Mittelwerte Glas	75
A.6	Faktorenanalyse Faktoren 1 und 2	83
A.7	Faktorenanalyse Faktoren 1 und 3	84
A.8	Faktorenanalyse Faktoren 2 und 3	84
A.9	Eigenwertdiagramm	85
A.10	Arithmetische Mittelwerte der Lästigkeit über die Rauigkeit	88

Tabellenverzeichnis

2.1	Subjektive Wirkung von Reflexionen	9
3.1	Übersicht Raumkonfigurationen	17
3.2	Eingestellte Parameter für die EASE Simulation	18
4.1	Nachhallzeiten des simulierten Raums	27
4.2	Raumakustische Kenngrößen des simulierten Raums	29
4.3	Pegeldifferenz ΔL der Impulsantworten	33
4.4	Pegeldifferenz ΔL in Anlehnung an das Echokriterium	37
4.5	Berechnete Rauigkeit der Impulsantworten	40
5.1	Übersicht Impulsantworten	43
5.2	Geräusche Hörversuch	44
5.3	Hörversuchsablaufplan Stimuli	45
5.4	Hörversuchsablaufplan Adjektive	46
5.5	Korrelationsmatrix der Adjektive über alle Geräusche	48
5.6	Faktorenanalyse	49
5.7	Zweifaktorielle Varianzanalyse	52
A.1	Verwendete Geräte	69
A.2	Verwendete Programme	69
A.3	Vorversuch Adjektive	70
A.4	Hörversuch Daten Klatschen	76
A.5	Hörversuch Daten Jamblock	77
A.6	Hörversuch Daten Glas	79
A.7	Hörversuch Daten Sprache	80
A.8	Einfaktorielle Varianzanalyse Lautheit	86

Literaturverzeichnis

- Bilsen, F. (1967). Thresholds of Perception of Repetition Pitch. Conclusions Concerning Coloration in Room Acoustics and Correlation in the Hearing Organ, *Acustica* **19**: 27–32.
- Bortz, J. und Döring, N. (2006). *Forschungsmethoden und Evaluation für Human- und Sozialwissenschaftler*, 4. Aufl., Springer Medizin Verlag, Heidelberg.
- Bortz, J. und Schuster, C. (2010). *Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler*, 7. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg.
- Cremer, L. und Müller, H. A. (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik Band 1*, 2. Aufl., S. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- Dietsch, L. und Kraak, W. (1986). Ein objektives Kriterium zur Erfassung von Ehostörungen bei Musik- und Sprachdarbietungen, *Acustica* **60**: 205–216.
- DIN 1320 (2009). *Akustik - Begriffe*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 18041 (2004). *Hörsamkeit in kleinen bis mittelgroßen Räumen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN 45631 (1991). *Berechnung des Lautstärkepegels und der Lautheit aus dem Geräuschspektrum – Verfahren nach E. Zwicker*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- DIN EN 12354-6 (2004). *Bauakustik – Berechnung der akustischen Eigenschaften von Gebäuden aus den Bauteileigenschaften – Teil 6: Schallabsorption in Räumen*, Deutsches Institut für Normung e.V., Beuth Verlag, Berlin.
- Ellermeier, W., Hellbrück, J., Kohlrausch, A. und Zeitler, A. (2008). *Kompendium zur Durchführung von Hörversuchen in Wissenschaft und industrieller Praxis*.
- Fasold, W. und Veres, E. (2003). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*, 2. Aufl., Huss-Medien GmbH, Berlin.
- Fastl, H. und Zwicker, E. (2007). *Psychoacoustics: Facts and Models*, 3. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg.
- Frey, S., Fastl, H., Schmoch, H. und Mommertz, E. (2014). Psychoakustische und messtechnische Detektion von Echos in Räumen, *DAGA Oldenburg*.

Literaturverzeichnis

- GENESIS S.A. (2009). *History and description of loudness models – Loudness Toolbox for Matlab*.
- Görne, T. (2011). *Tontechnik*, 3. Aufl., Hanser, München.
- Kuttruff, H. (1965/66). Über Autokorrelationsmessungen in der Raumakustik, *Acustica* **16**: 166–174.
- Mommertz, E. und Müller-BBM (2008). *Akustik und Schallschutz – Grundlagen Planung Beispiele*, 1. Aufl., DETAIL Praxis, München.
- Möser, M. (Hrsg.) (2004). *Taschenbuch der technischen Akustik*, 3. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg.
- Möser, M. (Hrsg.) (2010). *Messtechnik der Akustik*, 1. Aufl., Springer, Berlin Heidelberg.
- Nocke, C. (2014). *Raumakustik im Alltag*, 1. Aufl., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- Oetjen, A., van de Par, S., Verhey, J., Weber, R. und Letens, U. (2014). Berechnung der zeitabhängigen Rauigkeit bei Motorengeräuschen, *DAGA Oldenburg*.
- Oetjen, A., Weber, R. und Verhey, J. (2012). Rauigkeitsberechnung unter Berücksichtigung der Einhüllendenform, *DAGA Darmstadt*.
- Renkus-Heinz Inc. (2009). *EASE Version 4.3, User's Guide & Tutorial*, Berlin.
- Rubak, P. (2004). Coloration in room impulse responses, *Baltic-Nordic Acoustics Meeting*.
- Shailer, M. J. und Moore, B. C. J. (1983). Gap detection as a function of frequency, bandwidth, and level, *Journal of the Acoustical Society of America* **74**: 467–473.
- Software Design Ahnert GmbH (2006). *EASERA Tutorial*, Berlin.
- Srodecki, K. (1994). Evaluation of the Reverberation Decay Quality in Rooms - Using the Autocorrelation Function and the Cepstrum Analysis, *Acustica* **80**: 216–225.
- Vorländer, M., Havelock, D. und Kuwano, S. (2008). *Handbook of Signal Processing in Acoustics*, Springer, Berlin Heidelberg.
- Weinzierl, S. H. (2008). *Handbuch der Audiotechnik*, Springer, Berlin Heidelberg.

Ich versichere, die vorliegende Arbeit selbstständig ohne fremde Hilfe verfasst und keine anderen Quellen und Hilfsmittel als die angegebenen benutzt zu haben. Die aus anderen Werken wörtlich entnommenen Stellen oder dem Sinn nach entlehnten Passagen sind durch Quellenangaben eindeutig kenntlich gemacht.

Hamburg, 02.07.15

Anouschka Esselun