

Über den Einfluss unterschiedlicher Reflexionseigenschaften auf den Präzedenzeffekt

Masterarbeit von
Korbinian Georg Maria Wegler, BSc
Graz 2020

Institut für elektronische Musik und Akustik
Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Technische Universität Graz

Betreuer: DI Florian Wendt
Beurteiler: O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn.
Robert Höldrich

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

Ort, Datum

Unterschrift

Danksagung

Ich möchte mich bei allen herzlich bedanken, ohne deren Beitrag mir die Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen wäre! Vielen Dank allen Teilnehmenden der Hörversuche, auf deren Grundlage diese Arbeit entstand. Mein besonderer Dank geht an Florian Wendt für die motivierende und kompetente Betreuung, sowie an Professor Höldrich für die fachlich anregenden Gespräche! Außerdem möchte ich mich bei allen Damen und Herren des IEM für den freundlichen Austausch und das fachliche Interesse bedanken.

Schließlich danke ich meinen Freunden für die wundervolle Zeit in Graz und meiner Familie und Freundin für die großartige Unterstützung. Ganz besonderer Dank gebührt meinen Eltern, die mir dieses Studium ermöglicht haben!

Danke!

Abstract

The precedence effect refers to a group of phenomena where the direct sound dominates the perception. Studies concerning the precedence effect mainly use specular reflections to investigate the influence of reflection characteristics like absorption, time delays or directions of arrival. The sound field reflected on a real-life wall is partly scattered into angles, other than the specular reflection angle, yielding a spatial and temporal widening of the reflection. In this context the scattering coefficient describes the portion of energy reflected to other directions than the specular direction. Within two separate Experiments this thesis shall study the influence of angle and diffusion of reflections on the precedence effect. The strength of the precedence effect shall be investigated by testing the echo and masking threshold of diffuse and specular reflections. Listening tests will be performed and the obtained data will be used to enhance models for the echo suppression.

Kurzfassung

Der Präzedenzeffekt beschreibt eine Gruppe von Phänomenen, bei denen der Direktschall die Wahrnehmung dominiert. Studien zum Präzedenzeffekt verwenden üblicherweise das Paradigma der Spiegelschallquelle um den Einfluss von Reflexionseigenschaften wie Pegel, Verzögerungszeit oder Richtung auf die Wahrnehmung zu untersuchen. Bei Schallreflexionen an realen Wänden kommt es, aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit, zu einer teilweisen räumlichen und zeitlichen Aufweitung des reflektierten Schalls. Dabei beschreibt der Streukoeffizient den Anteil der Energie, welcher nicht in Richtung der Spiegelreflexion reflektiert wird. Diese Arbeit soll, gegliedert in zwei verschiedene Hörversuche, den Einfluss von Pegel, Verzögerungszeit und Richtung sowie Diffusion auf den Präzedeneffekt untersuchen. Ausgehend von einem Modell der diffusen Reflexion wird die Ausbildung des Präzedenzeffektes in Form der Echo- und Maskierschwelle in Hörversuchen untersucht. Die gewonnenen Versuchsdaten sollen zusammen mit bereits bestehenden Daten dazu verwendet werden, ein Wahrnehmungsmodell der Echounterdrückung zu erweitern.

Inhaltsverzeichnis

Einleitung	1
1 Präzedenzeffekt	3
1.1 Maße des Präzedenzeffektes	3
1.1.1 Fusion und Ecounterdrückung	4
1.1.2 Lokalisationsdominanz	4
1.1.3 Diskriminationsunterdrückung	4
1.2 Zeitliche Aspekte des Präzedenzeffektes	4
1.2.1 <i>Buildup</i>	4
1.2.2 <i>Onset</i> und Amplitudenmodulation	5
1.3 Auswirkungen der Reflexionseigenschaften auf den Präzedenzeffekt . . .	5
1.3.1 Reflexionsparameter	5
1.3.2 Wiedergabesituation	6
1.3.3 Ähnlichkeit zwischen Direktschall und Reflexion	7
1.4 Wahrnehmungsschwellen im Zusammenhang mit dem Präzedenzeffekt .	8
1.4.1 Echoschwelle	8
1.4.2 Maskierschwelle	9
2 Einfluss von Pegel, Verzögerungszeit und Einfallswinkel auf die Echoschwellen	11
2.1 Experiment 1 - Grenzbereiche der Echowahrnehmung	12
2.1.1 Durchführung	12
2.1.2 Ergebnisse	13
2.2 Experiment 2 - Bilaterale Beziehungen zwischen Pegel ΔL und Verzögerungszeit ΔT	16
2.2.1 Durchführung	16
2.2.2 Ergebnisse	16
2.3 Diskussion und Zusammenfassung	20

3	Diffusion und kriteriumsfreie Wahrnehmungsschwellen	21
3.1	Modell	21
3.1.1	Diffusion	22
3.1.2	Encodierung in binaurale Kopfhörersignale	25
3.1.3	Pegeldefinitionen	26
3.1.4	Oberflächenstruktur der Wand	27
3.1.5	Parameteroptimierung	29
3.2	Testverfahren	31
3.3	Versuchsaufbau und Durchführung	34
3.3.1	Versuchspersonen	35
3.3.2	Konditionen	35
3.4	Ergebnisse und Auswertung	36
3.4.1	Vergleich der Echschwelle diskreter und diffuser Reflexionen	36
3.4.2	Verschiedene Schwellen und Testverfahren	41
3.4.3	Vergleich von Maskierschwellen verschiedener Verfahren	46
3.5	Diskussion und Zusammenfassung	46
4	Conclusio	49
	Referenzen	53

Einleitung

Beschreibung und Untersuchung des Präzedenzeffektes haben eine lange Geschichte in der Akustik. Bereits 1949 behandelte Cremer (vgl. [Cre48]) das Gesetz der ersten Wellenfront, das später als Präzedenzeffekt (engl. *precedence effect*) bekannt wurde. Es beschreibt verschiedene Aspekte des Phänomens, dass eine verzögerte Kopie eines Schallereignisses sogar bei relativ höherem Pegel den Richtungseindruck des Primäreignisses nicht beeinträchtigt. Laut [Cre61] gelang Helmut Haas in [Haa] die erste quantitative Untersuchung des daraufhin auch Haas-Effekt genannten Phänomens. In dieser Anfangszeit der Erforschung des Präzedenzeffekts wurde vor allem die Wirkung eines verzögerten Sprachsignals auf die Verortbarkeit seines Primärsignales untersucht. Durch Seraphim [Ser61] konnte 1961 bereits ein Einfluss der Richtung der Reflexion selbst auf deren Hörbarkeit gezeigt werden.

Die Einfallsrichtung von Schallwellen und Reflexionen und deren Wahrnehmung sind bis heute aktuelles Forschungsthema (vgl. in [GvdPT17]) und sollen im Verlauf dieser Arbeit weitere Beachtung finden. Einen möglichen Ansatz der Vorhersage einer wahrgenommenen Schalleinfallsrichtung stellt das Energievektormodell von Gerzon aus dem Jahr 1992 (vgl. [Ger92]) dar. Dieses Modell wurde 2013 von Frank in [Fra13] im Zusammenhang mit Mehrlautsprecheranordnungen verwendet und ermöglichte die Vorhersage der Lokalisation von Phantomschallquellen dieser Anordnungen. Das Energievektormodell errechnet eine Schalleinfallsrichtung aus dem Quadrat der Amplitudengewichte. Diese quadrierten Schallpegelanteile repräsentieren die Energie jeder einzelnen Quelle im Raum und ermöglichen eine vektorielle Addition, wobei die resultierende Richtung die Lokalisation prognostiziert. Abseits der zentralen Hörpositionen solcher Mehrlautsprecheranordnungen führt der nicht koinzidente Einfall der Schallwellen zur Ausbildung des Präzedenzeffektes. Dieser äußert sich bei geringen Abweichungen als eine Verzerrung der Lokalisation. Größere Abweichungen führen hingegen dazu, dass der Hörer nur mehr eine einzige Richtung wahrnimmt, nämlich die des ihm am nächsten liegenden Lautsprechers. Zur Modellierung der Lokalisation abseits der idealen Hörposition hat Stitt 2016 den Energievektor um zusätzliche Gewichte erweitert (vgl. [SBVW16]). Diese berücksichtigen Laufzeit- und Richtungsunterschiede

einzelner Lautsprecher und beruhen auf unterschiedlichen Arbeiten zum Präzedenzeffekt. Kurz stellte durch Hörversuche, im Rahmen seiner Masterarbeit am IEM, jedoch fest, dass die Modellierung des Präzedenzeffektes die Vorhersage nicht verbessert und der Einfluss der Richtung vernachlässigbar ist (vgl. [KF17] und [Kur18]). Dieser Zusammenhang bedarf der näheren Erklärung und motiviert die genaue Erforschung des Einflusses von Pegel, Verzögerungszeit und Richtung auf den Präzedenzeffekt.

In dieser Arbeit soll durch einen Hörversuch der Einfluss der Schalleinfallrichtung auf die Wahrnehmbarkeit von verzögert eintreffenden Schallsignalen untersucht werden.

Eng verknüpft mit der Schalleinfallrichtung ist auch die räumliche Verteilung der Schallenergie einer Reflexion. Spricht man von einer einzelnen Einfallrichtung gilt diese nur unter der Prämisse einer Spiegelreflexion. Reale Reflexionen unterliegen jedoch meist der Streuung, da die reflektierenden Oberflächen nicht vollständig plan sind und erzeugen daher ein diffuses Schallfeld. 2018 wurde von Wendt [WH18] ein Modell für eine diffuse Reflexion, basierend auf dem Lambert-Cosinus entwickelt. Anhand dieses Modells ist es möglich, diffuse Reflexionen in einer virtuellen akustischen Umgebung nachzubilden. Die Diffusität und deren Einfluss auf den Präzedenzeffekt soll diese Arbeit mittels eines weiteren Hörversuches experimentell erfassen.

Kapitel 1

Präzedenzeffekt

Der Präzedenzeffekt beinhaltet mehrere Wahrnehmungsphänomene, bei denen hauptsächlich der Direktschall das wahrgenommene Hörereignis bestimmt. Im Wesentlichen unterdrückt die neuronale Verarbeitung später eintreffende Schallanteile, um die Informationen des Direktschalls besser beurteilen zu können. Übliche Versuche zum Präzedenzeffekt beinhalten einen Primärschall und eine im Vergleich dazu verzögerte Reflexion und untersuchen die Ausprägung dieses Phänomens anhand von Zeitdifferenz und Pegel der einzelnen Schallanteile. So werden beispielsweise Reflexionen, die nur wenige Millisekunden nach dem Direktschall eintreffen, vollständig unterdrückt. Spätere oder lautere Reflexionen sind dann zumindest als Klangveränderung erkennbar. Eine weitere Erhöhung des Reflexionspegels oder der Verzögerung ergibt dann eine distinkt wahrnehmbare Reflexion – ein Echo. Die Richtung dieses wahrgenommenen Echos muss aber nicht in der tatsächlichen Einfallsrichtung der Reflexion liegen. Alle diese Phänomene unterliegen den Auswirkungen des Präzedenzeffektes. Dabei ist die Ausbildung des Effektes durchaus vom Signal abhängig und obliegt zusätzlich einer zeitlichen Entwicklung. Eine transiente Reflexion tritt viel eher in Erscheinung als ein Dauerton. Ein Signal, an das sich das Gehör über einen längeren Zeitraum gewöhnen konnte, wird durch den Präzedenzeffekt viel eher maskiert als ein abrupt einsetzendes Signal ohne Einblende. Der Präzedenzeffekt wurde schon in vielen seiner Teilaspekte erforscht – die für diese Arbeit relevanten sollen in diesem Kapitel erläutert werden.

1.1 Maße des Präzedenzeffektes

Im Folgenden werden die laut Litovsky (vgl. [LSC01]) je nach Verzögerungszeit der Reflexion und verwendeter Testaufgaben unterscheidbaren Maße des Effektes beschrieben.

1.1.1 Fusion und Echowunderdrückung

Die Fusion oder Echowunderdrückung beschreibt die gemeinsame Wahrnehmung des Direktschalles und der Reflexion. Unterscheiden sich deren Eintreffzeiten nur um wenige Millisekunden, wird die Reflexion vollständig unterdrückt und gemeinsam mit dem Direktschall als ein Hörereignis wahrgenommen. Die Eintreffrichtung des Direktschalls bestimmt dabei die Lokalisationsrichtung des fusionierten Schallereignisses. Das Auftreten von Fusion ist aber nicht mit der Maskierung zu verwechseln. Eine Versuchsperson kann durchaus die Präsenz einer Reflexion wahrnehmen, ohne diese als separates Schallereignis zu empfinden (vgl. [LSC01]). Ein Hörversuch zur Fusion kann beispielsweise die Fragestellung „Hören Sie ein Schallereignis oder zwei?“ beinhalten.

1.1.2 Lokalisationsdominanz

Als Lokalisationsdominanz beschreibt man die vorwiegende Lokalisation beider Schallereignisse am Ort des Direktschalls. Innerhalb begrenzter Verzögerungszeiten und Pegel der Reflexion bezüglich des Direktschalls, wird die Richtung des fusionierten Schallereignisses am Ort des Direktschalls wahrgenommen. Das Auftreten dieser Eigenschaft bedingt aber nicht zwingend die Fusion der Schallereignisse (vgl. [YG97]), da auch die Richtung einer bereits erkannten Reflexion unterdrückt werden kann.

1.1.3 Diskriminationsunterdrückung

Verglichen mit dem zuerst einfallenden Schall werden Eigenschaften der nachfolgenden Reflexion häufig abgeschwächt wahrgenommen oder vollständig unterdrückt. Diese Begebenheit wird von Litovsky als Diskriminationsunterdrückung (engl. *discrimination suppression*) eingeführt. So ist beispielsweise die Empfindlichkeit für Richtungsänderungen des Rückwurfes geringer als für den Direktschall. Das bedeutet aber nicht, dass diese Reflexionseigenschaften überhaupt nicht wahrnehmbar sind.

1.2 Zeitliche Aspekte des Präzedenzeffektes

1.2.1 *Buildup*

Erhebt man die Messgrößen des Präzedenzeffektes mittels einer kontinuierlichen Sequenz von Stimuli, stellt man eine zeitliche Veränderung der gemessenen Wahrnehmungsschwellen fest. Diese Eigenschaft des sich aufbauenden Präzedenzeffektes heißt *Buildup* (vgl. [HOB06]). Yang ([YG97]) setzt den *Buildup*-Prozess einem Erlernen der akustischen Umgebung gleich, sieht aber zwei verschiedene Prozesse im *Buildup* der Echowunderdrückung und der Diskriminationsunterdrückung. Der *Buildup*-Effekt wirkt

auch laut Litovsky [LSC01] nicht in gleichem Maße im Bereich der Fusion und Diskriminationsunterdrückung. Bei einer Unterbrechung der Sequenz kommt es analog zum Aufbau zu einem Abbau des Präzedenzeffektes.

1.2.2 *Onset* und Amplitudenmodulation

Die Stärke des Präzedenzeffektes hängt laut Rakerd (vgl. [RH86]) zudem stark vom Einschwingvorgang des Quellsignals ab. Die *Onset*-Rate eines Signales, also der Schallpegelanstieg pro Zeiteinheit, beeinflusst maßgeblich dessen Priorität in der neuronalen Verarbeitung. Und auch der *Offset*, das Ausklingen eines Quellsignals, kann, wie in [CSB12] bestätigt wurde, zu einer veränderten Wahrnehmung interauraler Pegeldifferenzen und damit des Präzedenzeffektes führen. Grosse findet in [GvdPT17] zusätzlich eine Abhängigkeit von den verwendeten Signalen selbst; Sprache ist dabei leichter lokalisierbar als ein Signal aus Rauschen. Grosse führt das auf die stärkere Amplitudenmodulation der Sprache in Kombination mit deren Phasenverschiebung zurück. Wie in anderen Studien zum Präzedenzeffekt üblich, werden auch in dieser Arbeit vorwiegend impulshafte Stimuli verwendet, da transiente Einschwingvorgänge die Hörbarkeit von Reflexionen erleichtern.

1.3 Auswirkungen der Reflexionseigenschaften auf den Präzedenzeffekt

In der Literatur existieren bereits Untersuchungen über eine Vielzahl von Einflussfaktoren auf den Präzedenzeffekt. Im Folgenden sollen im Speziellen die relevanten Reflexionsparameter definiert werden.

1.3.1 Reflexionsparameter

Als Reflexion wird allgemein ein wiederholtes Auftreten eines Schallereignisses bezeichnet. Im einfachsten Fall tritt eine Reflexion als Rückwurf durch eine schallharte Fläche auf. Diese Spiegelreflexion verhält sich analog zur Reflexion in der Optik. Der Einfallswinkel entspricht dem Ausfallswinkel und die Wegstrecke ergibt sich aus einfacher Trigonometrie. Abbildung 1.1 zeigt den skizzierten Ausbreitungsweg von Direktschall und Spiegelreflexion.

Geometrie Die Strahlenakustik liefert die Verknüpfung zwischen einfacher Geometrie und der Schallausbreitung. Aus dieser ist die Energie, die aus einer bestimmten

Richtung zu einer bestimmten Zeit an einer Empfängerposition eintrifft, leicht zu berechnen. Die Impulsantwort eines Systems aus Sender, Spiegelreflexion an einem Punkt der Wand und Empfänger kann als *Dirac*-Impuls $\delta(t)$ angenommen werden. Die Zeit, zu der dieser Impuls nach dem Direktschall eintrifft, berechnet sich dabei mittels der Schallgeschwindigkeit nach Gleichung 1.1. Dies gilt jedoch nur für eine unendlich große ebene Wand. Ist die reflektierende Wand nicht unendlich groß, und hat sie zudem eine strukturierte Oberfläche, entstehen räumlich und zeitlich aufgeweitete Reflexionen. Diese weisen ein diffuses Reflexionsschallfeld auf und werden diffuse Reflexionen genannt.

Verzögerungszeit ΔT Als Verzögerungszeit ΔT wird diejenige Zeit angenommen, um die eine Reflexion gegenüber dem auslösenden Direktschall auf der Zeitachse verschoben ist. Die Zeit ergibt sich im Allgemeinen aus folgendem Zusammenhang:

$$\Delta T = \frac{\Delta s}{c}, \quad (1.1)$$

$$\text{wobei } \Delta s = s_1 + s_2 - d. \quad (1.2)$$

Δs entspricht dem Unterschied der Wegstrecken von Direktschall (d) und Reflexion ($s_1 + s_2$), vgl. Abbildung 1.1.

Pegel ΔL Als Relativpegel der Reflexion ΔL und der daraus bestimmten Schwellen wird der Reflexionspegel bezogen auf den Direktschall angegeben:

$$\Delta L = 20 \log_{10} \left(\frac{p_{\text{Reflexion}}}{p_{\text{Direkt}}} \right) \quad (1.3)$$

.

Einfallsrichtung $\Delta\varphi$ Im Rahmen dieser Arbeit werden ausschließlich horizontale Richtungsunterschiede untersucht. Der Direktschall kommt dabei zum Zeitpunkt $t = 0$ immer aus der 0° -Richtung, frontal auf Ohrhöhe. Winkel werden im mathematisch positiven Umlaufsinn aus der Draufsicht angegeben. Positive Winkel befinden sich aus der Sicht des Hörers in der linken Halbebene, negative Winkel analog in der rechten Halbebene. Eine schematische Darstellung ist in Abbildung 1.1 zu sehen.

1.3.2 Wiedergabesituation

Zur Erzeugung der vorgenannten Richtungsunterschiede existieren verschiedene Ansätze, die sich auch auf die Ausprägung des Präzedenzeffektes auswirken. Waren früher zur Reflexionserzeugung noch Wandpaneele in einem reflexionsarmen Raum nötig, ist

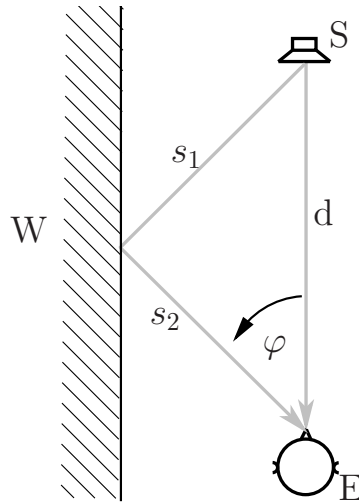


Abbildung 1.1: Skizze der Schallausbreitungswege von einem Sender (S) zum Empfänger (E) bei Spiegelreflexion an einer Wand (W).

inzwischen die Präsentation der Stimuli über mehrere Lautsprecher oder Kopfhörer üblich. Bei der Kopfhörerwiedergabe besteht die Möglichkeit, eine Lateralisation über interaurale Pegeldifferenzen (ILD), oder interaurale Zeitdifferenzen (ITD) zu erzeugen. Keines dieser Verfahren ist jedoch ideal, da in der Realität beide Differenzen gemeinsam auftreten. Einen natürlicheren Ansatz verspricht eine Faltung mit Außenohrübertragungsfunktionen (HRTF). Sie vereint ITD, ILD und spektrale Veränderungen und ermöglicht so eine Kodierung beliebiger Einfallsrichtungen in das Kopfhörersignal. Deshalb soll in dieser Arbeit die Faltung mit HRTFs verwendet werden.

1.3.3 Ähnlichkeit zwischen Direktschall und Reflexion

Aus Forschungsarbeiten von Blauert, Robinson und anderen (vgl. [Bla74], [BD88] und [RWFB13]) ist bereits bekannt, dass eine Reflexion mit dem Direktschall nicht identisch sein muss, um von diesem unterdrückt werden zu können. Die Sensibilität für interaurale Zeitdifferenzen (ITD) sinkt aber mit fallender Korrelation (vgl. [GvdPT17]). Zugleich werden völlig unkorrelierte Echos teilweise bereits ab zwei Millisekunden erkennbar und somit wenig vom Präzedenzeffekt beeinflusst (vgl. [RWFB13]). In [GvdPT17] wird der Zusammenhang zwischen der Korrelation und dem Präzedenzeffekt bestätigt und betont, wie wichtig die zeitliche Kompaktheit (geringe Streuung) und spektrale Gleichzeitigkeit (Konsistente Gruppenlaufzeit über das gesamte Spektrum) des Direktschalls für dessen Ortbarkeit sind. Auch deshalb wird bei den meisten Versuchen in der Literatur die Voraussetzung einer Spiegelreflexion verwendet. Grosse hingegen untersucht in [GvdPT17] die Lokalisierbarkeit einer Reflexion bei ausschließlich räumlicher Aufweitung in einer kreisförmigen Lautsprecheranordnung. Robinson stellt in [RWFB13]

bei unterschiedlicher zeitlicher Aufweitung von Reflexionen größtenteils keine signifikanten Unterschiede fest. In [WH18] findet sich jedoch eine signifikante Schwächung des Präzedenzeffektes durch die zeitliche und räumliche Diffusität einer Reflexion. Die Aufklärung dieser Kontroverse stellt einen wichtigen Ansatzpunkt für Kapitel 3 dieser Arbeit dar.

1.4 Wahrnehmungsschwellen im Zusammenhang mit dem Präzedenzeffekt

Als Maßeinheit für die Stärke des Präzedenzeffektes bieten sich im Wesentlichen zwei verschiedene Wahrnehmungsschwellen an.

1.4.1 Echschwelle

Die Echschwelle ist die am häufigsten verwendete Schwelle zur Beschreibung der Stärke des Präzedenzeffektes. Die in der Psychoakustik definierten Reizschwellen teilen sich in absolute und relative Schwellen auf. Eine Absolutschwelle ist für die Versuchsperson ohne einen Referenzstimulus erkennbar. Eine relative Schwelle hingegen, ist durch die Unterscheidung zu einer Referenz definiert. Das Erreichen beider Schwellenarten liegt laut [BCW17] dann vor, wenn die Hälfte der Versuche zur Erkennung eines Reizes führt. Daraus folgt auch, dass der Bestimmung einer Schwelle ein stochastischer Prozess zu Grunde liegt. Die üblichen Messgrößen für die Echschwelle sind die Pegeldifferenz ΔL oder die Zeitspanne ΔT zwischen Direktschall und nachfolgender Reflexion. Zur Bestimmung der Echschwelle wird üblicherweise ein Parameter, ΔL oder ΔT , variiert und der jeweils andere Parameter konstant gehalten. Die Echschwelle ist dann diejenige Absolutschwelle, ab der ein bestimmtes Kriterium für die Echoexistenz wahrgenommen wird. Dieses Kriterium ist keinesfalls universell festgelegt. In der Literatur finden sich daher verschiedene Definitionen der Echschwelle, die zugleich zu diversen Wertebereichen derselben führen (vgl. [Bla74]). So testeten beispielsweise Haas (1951), Meyer und Schodder (1951) das Kriterium „Primärhörereignis und Echo gleich laut“, wogegen Lochner und Burger (1958) und andere das Kriterium „Echo störend“ bevorzugten (vgl. [Bla74]). Die gemessenen Schwellen unterscheiden sich dabei um bis zu 20 dB. Übliche Wertebereiche der Echschwellen liegen zwischen 2 ms und circa 80 ms und zwischen $0 \text{ dB}_{\text{relativ}}$ und $-60 \text{ dB}_{\text{relativ}}$ (vgl. [BST14]).

Ob die Einfallsrichtung des Rückwurfes oder besser der Winkelunterschied zwischen Direktschall und Rückwurf $\Delta\varphi$ auch eine zur Einstellung der Echschwelle variierbare Messgröße darstellt, soll in dieser Arbeit eruiert werden.

1.4.2 Maskierschwelle

Die Maskierschwelle oder absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle (vgl. [Ser63]) ist eine Schwelle, die sich durch die Wahrnehmbarkeit eines Reizunterschiedes ergibt. Sie ist damit laut [BCW17] eine relative Reizschwelle. Die Referenz für diese stellt ein einzelnes Schallereignis ohne Reflexion dar. Dieses muss der Versuchsperson jedoch nicht zwangsläufig präsentiert werden, zumindest aber im Sinne einer Alltagserfahrung bekannt sein. Durch die mögliche Referenz wird eine überprüfbare Messung der Maskierschwelle erreicht. Die Wahl eines Kriteriums für den gehörten Reizunterschied, sei es eine Klangfärbung, ein Richtungseindruck oder eine zeitliche Veränderung, ist der Versuchsperson selbst überlassen und durchaus individuell verschieden. So findet bereits Seraphim in [Ser63], dass sich Versuchspersonen als Erkennungsmerkmal der Maskierschwelle das für sie einfachste und damit schärfste Kriterium aussuchen. Die wesentlichen Messgrößen, Verzögerungszeit ΔT und Pegel ΔL , entsprechen denen der Echoschwelle. Die Wertebereiche der Maskierschwelle liegen in einer ähnlichen Größenordnung zur Echoschwelle, aber definitionsgemäß niedriger. Die Maskierschwelle findet im Verlauf des zweiten Hörversuchs (Kapitel 3) zur Quantifizierung des Präzedenzeffektes ihre Anwendung.

Kapitel 2

Einfluss von Pegel, Verzögerungszeit und Einfallswinkel auf die Echoschwelle

Zur Quantifizierung des Präzedenzeffektes stellt die Echoschwelle ein etabliertes Kriterium dar und soll deshalb auch in diesem Versuch untersucht werden. Um absolute psychoakustische Schwellen zu bestimmen, gibt es drei verschiedene Methoden (vgl. [BCW17]): Bei der **Grenzmethode** werden der Versuchsperson der Reihe nach verschieden starke Reize dargeboten, um dann zu erfragen, ob diese wahrnehmbar waren, oder nicht. Die **Konstanzmethode** – bei dieser wird eine zufällige Reihenfolge der getesteten Reizstärken angeboten. Sie ist bereits weniger anfällig auf eine Hysterese des einzustellenden Parameters als die Grenzmethode. Bei beiden genannten Methoden ist aber ein fundiertes Wissen über die zu untersuchende Reizschwelle notwendig, um kein übermäßig langes Versuchsprozedere zu erzeugen. Im Gegensatz dazu wird bei der **Herstellungsmethode** ein kontinuierlicher Reiz präsentiert. Dieser kann in seiner Stärke langsam variiert werden. So kann die Versuchsperson selbst die entsprechende Schwelle einstellen. Es wird kein genaues Vorwissen über die Lage der Schwelle benötigt und durch die aktive Mitarbeit der Versuchsperson ist deren Aufmerksamkeit gesichert. Die Herstellungsmethode soll zur Bestimmung der Echoschwelle angewendet werden. Die Probandinnen und Probanden werden gebeten, die gefragte Variable so zu wählen, dass gerade zwei Schallereignisse zu hören sind. Neben dem Relativpegel ΔL und der Verzögerungszeit ΔT ist die Einfallsrichtung der Reflexion $\Delta\varphi$ eine mögliche Variable. Die räumliche Anordnung ist bekanntermaßen einer der Parameter, der die Wahrnehmbarkeit einer Reflexion maßgeblich beeinflusst (vgl. [SCZD93]). Trotzdem werden die Richtungen von Primärschall und Rückwurf in der Literatur meist konstant gehalten und nicht näher betrachtet. In diesem Hörversuch soll im Gegensatz

dazu der Einfluss verschiedener Einfallrichtungen von Reflexionen im Fokus stehen.¹

2.1 Experiment 1 - Grenzbereiche der Echowahrnehmung

Um sinnvolle Einstellbereiche der Parameter für die Durchführung dieses Hörversuchs zu erhalten, wird dieser in zwei Experimente aufgeteilt. Die Ergebnisse des ersten Experimentes definieren die Parameter des zweiten Experiments.

2.1.1 Durchführung

Das erste Experiment untersucht die signifikanten Bereiche der Parameter Verzögerungszeit ΔT und Einfallrichtung $\Delta\varphi$ der Reflexion für die Echschwelle. Gesucht wird dazu der Pegel ΔL_{ES} als eine Funktion der Verzögerungszeit und der Richtung bei dem die Versuchspersonen im Mittel gerade eine Reflexion als separates Hörereignis erkennen können.

Stimulus Der hier hauptsächlich verwendete Stimulus setzt sich aus einer Folge von Impulsen mit weißem Rauschen zusammen. Diese erhalten harte Übergänge und werden ohne Ein- und Ausblenden aneinander gereiht. Die Länge der Impulse beträgt 10 ms und ihre Wiederkehr 300 ms. Abbildung 2.1 zeigt einen beispielhaften Verlauf eines Stimulus mit drei Impulsen und die Einhüllende seines Absolutbetrages. Als alternativer Stimulus findet in diesem Versuch eine Sprachaufnahme der EBU (weiblich, englisch, Track 49 aus [EBU]) Verwendung.

Die Darbietung erfolgt durch Kopfhörerwiedergabe (Beyerdynamic DT770pro an einem Interface, Focusrite Scarlett 2i2) und Faltung mit Impulsantworten des Neumann KU100 Kunstkopfes (aus [Ber13]). Der Direktschall wird immer aus der Mitte ($\Delta\varphi = 0^\circ$) simuliert. Die Versuchspersonen erhalten die Kontrolle über den Pegel der Reflexion relativ zum Direktschall. Beginnend mit $\Delta L = -50 \text{ dB}_{\text{relativ}}$ sollen sie den Pegel einer Reflexion mit Einfallrichtung $\Delta\varphi$ daraufhin in 1 dB-Schritten erhöhen, bis gerade ein zweites unterscheidbares Schallereignis zu hören ist. Die Einfallrichtung der Reflexion wird in 15° -Schritten von $\Delta\varphi = 0^\circ \dots \pm 90^\circ$ (links/rechts) variiert. Der Schallpegel des Direktsignals wird auf $54 \text{ dB(A)}_{\text{eq}}$ festgelegt, um gute Hörbarkeit bei gleichzeitig geringer Ermüdung der Probandinnen und Probanden zu ermöglichen. Um den Aufbau des Präzedenzeffektes zu unterstützen, wird eine Einblendung von 2 s am

¹Im Rahmen der DAGA - 45. JAHRESTAGUNG FÜR AKUSTIK der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) entstand der Konferenzbeitrag „How level, delay and spatial separation influence the echo threshold“ [WWH19] der die Ergebnisse dieses Kapitels zusammenfasst.

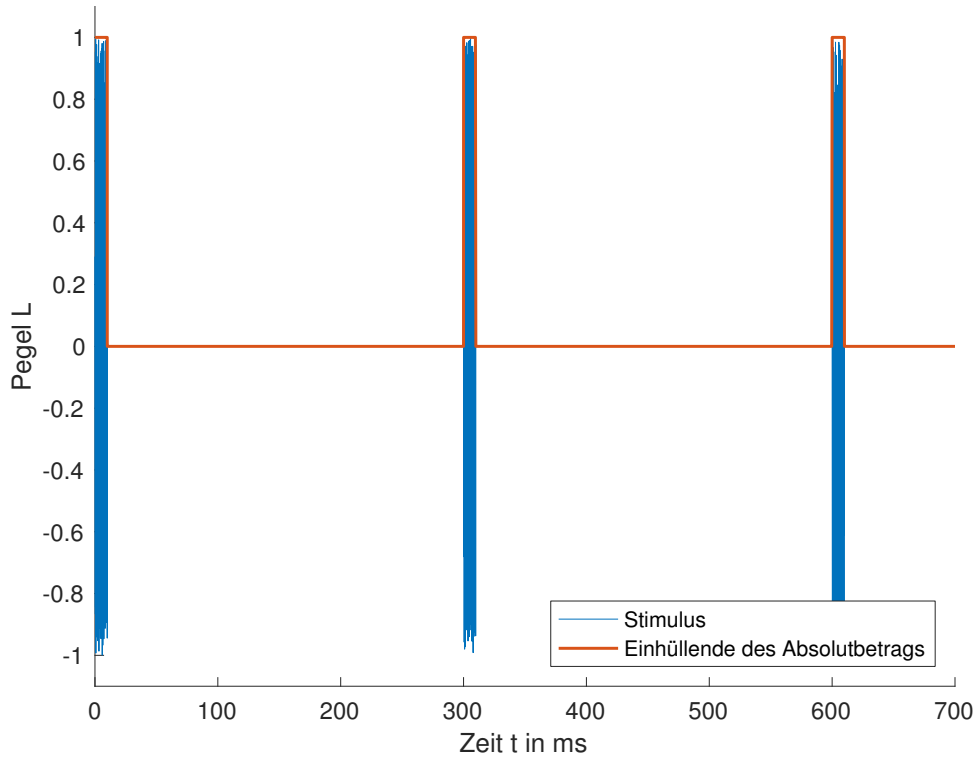


Abbildung 2.1: Stimulus und die Einhüllende des Betrags.

Anfang jeder Kondition vorgenommen. Es werden Verzögerungszeiten von $\Delta T = 20$ ms, 40 ms und 60 ms getestet, so dass sich insgesamt $3 \text{ Zeiten} \times 7 \text{ Richtungen} \times 2 \text{ Seiten} = 42$ Testkonditionen ergeben. Diese werden individuell zufällig permutiert dargeboten.

2.1.2 Ergebnisse

Bei einer ersten Inaugenscheinnahme der Rohdaten aus Experiment 1 zeigte sich eine starke individuelle Abhängigkeit. Die Echoschwellen der einzelnen Probandinnen und Probanden streuten innerhalb einer Kondition um bis zu 30 dB. Ein Vergleich mit [WH18], zeigt bei einer ähnlichen Teilnehmerzahl 95%-Konfidenzintervalle etwa 8dB. Um diese übermäßige Aufweitung einzudämmen, wurde für die Auswertung eine Normalisierung, ähnlich zu der in [RWFB13] verwendeten, eingeführt. Der Pegel $\Delta L_{ES,i}$ jeder einzelnen Kondition der jeweils i -ten Versuchsperson wurde dazu um den mittleren Pegel $\Delta \bar{L}_{ES,i}$ dieser Versuchsperson korrigiert und auf das Mittel aller Versuchspersonen $\Delta \bar{L}_{ES,all}$ gebracht:

$$\Delta L_{ES,i,norm} = \Delta L_{ES,i} - \Delta \bar{L}_{ES,i} + \Delta \bar{L}_{ES,all} \quad (2.1)$$

Eine statistische Analyse mittels eines t-Tests, zum Vergleich zweier Stichproben wurde durchgeführt. Diese zeigt, dass die Reflexionsseite (links/rechts) kein signifikanter Parameter ist ($p=0,43$). Der p-Wert beschreibt dabei die Wahrscheinlichkeit der Überlappung der Variablengruppen. Ein p-Wert von $p \leq 5\%$ wird als Grenze für bestehende Signifikanz festgelegt. Die fehlende Signifikanz ermöglicht ein Zusammenfassen der Daten für die linke und rechte Seite. Durch die vergrößerte Datenmenge pro Mittelwert verkleinern sich die entsprechenden Konfidenzintervalle.

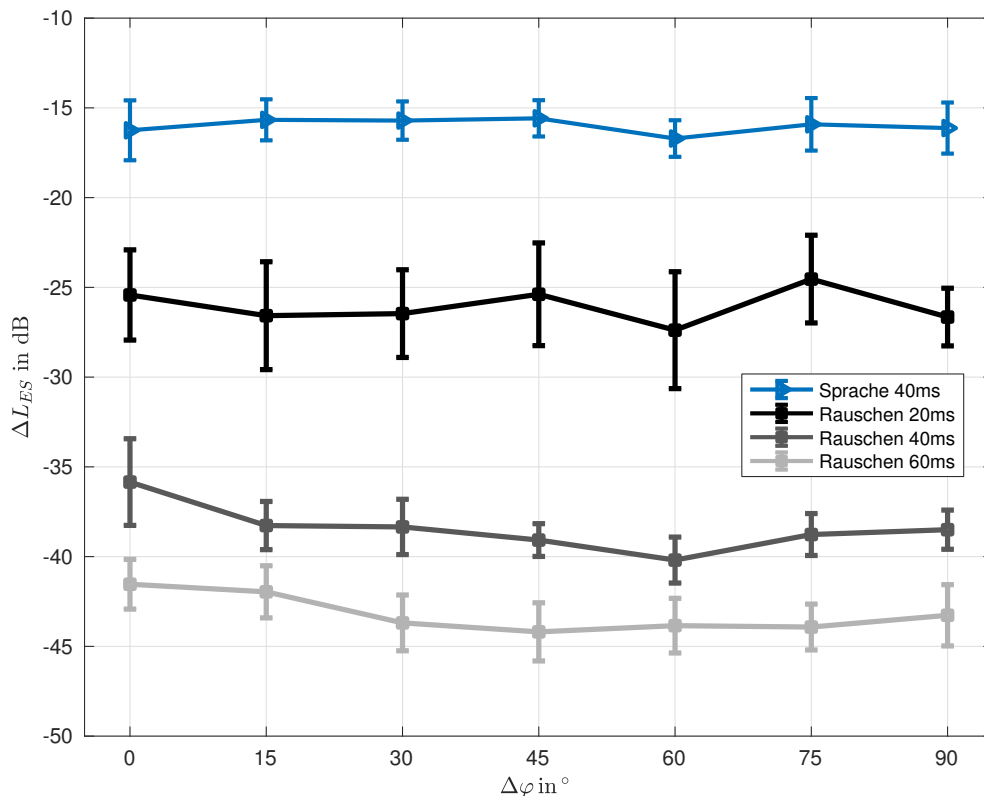


Abbildung 2.2: Mittelwerte und dazugehörige 95%-Konfidenzintervalle der Echoschwelle, bestimmt durch den Reflexionspegel ΔL für verschiedene Verzögerungen ΔT und Stimuli, abhängig vom Einfallswinkel $\Delta\varphi$

In Abbildung 2.2 sind die Ergebnisse als Mittelwerte mit 95%-Konfidenzintervallen dargestellt. Die Echoschwellen ΔL_{ES} sinken mit steigenden Verzögerungszeiten ΔT und sind vergleichbar denen ähnlicher Studien (vgl. [RHH00]).

ANOVA Eine Varianzanalyse (*ANOVA* – Analysis of Variance) bietet die Möglichkeit, Variablengruppen auf deren maßgebliche Parameter zu überprüfen, indem sie deren Mittelwerte auf Basis ihrer Varianz vergleicht. Die Definition des p-Wertes entspricht der des t-Tests. Die ANOVA dieser Daten zeigt, dass die Verzögerungszeit ΔT

für alle Reflexionsrichtungen $\Delta\varphi$ signifikant ist ($p \ll 0,01$). Die Signalart hat eine signifikante Auswirkung auf die absolute Lage der Echoschwelle ($p = 0$, Abb. 2.2, Sprache, $\Delta T = 40\text{ms}$ und Rauschen, $\Delta T = 40\text{ms}$). Die Echoschwelle ΔL_{ES} ist für Sprache parallel nach oben verschoben, gleicht aber in ihrem Verlauf der Schwelle für Rauschstimuli. Die Echoschwelle ΔL_{ES} zeigt, abhängig von der Reflexionsrichtung $\Delta\varphi$ eine nicht-monotone Entwicklung. Obwohl die Richtungen $\Delta\varphi$ für die Verzögerungszeiten $\Delta T = 40\text{ms}$ und $\Delta T = 60\text{ms}$ signifikante Unterschiede enthalten ($p < 0,01$), ergibt ein post-hoc Test (*Tukey HSD*) nur zwei signifikant unterscheidbare Gruppen: $\Delta\varphi = 0^\circ$ und $\Delta\varphi \geq 30^\circ$. Für $\Delta T = 20\text{ms}$ erreicht die pegelmäßig bestimmte Echoschwelle ΔL_{ES} durch den Winkel $\Delta\varphi$ keine signifikanten Unterschiede ($p = 0,62$).

Effektstärke Die Effektstärke ist ein übliches Maß für den Unterschied der Mittelwerte zweier Variablengruppen. Sie ist standardisiert und ermöglicht damit eine Vergleichbarkeit der Daten verschiedener Studien und Messverfahren (vgl. [Pau19]). Eine geeignete Messgröße für die Effektstärke ist Cohens d ; die Differenz der Mittelwerte (μ_{x1}, μ_{x2}) der Variablen bezogen auf deren Standardabweichung $s_{x1,x2}$,

$$d = \frac{\mu_{x1} - \mu_{x2}}{s_{x1,x2}}. \quad (2.2)$$

In dieser Arbeit wird der Sonderfall gepaarter Variablen verwendet. Die verglichenen Variablenpaare unterscheiden sich jeweils nur durch den zu untersuchenden Parameter (der Winkel in diesem Fall). Die Berechnung von Cohens d ändert sich dann zu:

$$d_{paired} = \frac{\mu_{x1} - \mu_{x2}}{s(x1 - x2)}. \quad (2.3)$$

Für die entsprechende Effektstärke gilt nach [Saw09] dann:

Cohens d :	0,01	0,2	0,5	0,8	1,2	2,0
Effektstärke:	sehr klein	klein	mittel	groß	sehr groß	riesig

Die Effektstärken (Cohens d) der Einfallrichtung sollen für die signifikanten Verzögerungszeiten ($\Delta T = 40\text{ms}$ und $\Delta T = 60\text{ms}$) bestimmt werden. Cohens d für $\Delta T = 40\text{ms}$ und die signifikanten Winkel $\Delta\varphi \geq 30^\circ$ beträgt $d \geq 0,49$ und entspricht einer mittleren bis großen Effektstärke. Für $\Delta T = 60\text{ms}$ beträgt es $d \geq 0,46$ und entspricht einer mittleren bis großen Effektstärke.

2.2 Experiment 2 - Bilaterale Beziehungen zwischen Pegel ΔL und Verzögerungszeit ΔT

Aus den Ergebnissen von Experiment 1 (vgl. Abschnitt 2.1) kann gefolgert werden, dass ein Einstellen der Echschwelle durch Veränderung der Reflexionsrichtung $\Delta\varphi$ nicht möglich sein wird. Durch einen informellen Hörversuch konnte diese Hypothese bestätigt werden, da eine Variation der Reflexionsrichtung keinen konsistenten Schwellenwert ergibt. Je nachdem, ob sich der Startpunkt oberhalb oder unterhalb der gesuchten Schwelle befindet, war eine Reflexion entweder immer, oder nie hörbar. Für den nachfolgend beschriebenen Hörversuch verbleiben somit zwei Möglichkeiten, die Echschwelle zu bestimmen, ΔL_{ES} und ΔT_{ES} . Dabei wird einerseits die Variation des Pegels ΔL und andererseits die Variation der Verzögerungszeit ΔT untersucht.

2.2.1 Durchführung

Ähnlich zum ersten Experiment, soll zunächst der Pegel ΔL_{ES} der Reflexion für vier verschiedene Verzögerungszeiten (20 ms, 40 ms, 60 ms, 80 ms) und drei Einfallswinkel (0° , 30° , 60°) eingestellt werden. Dann kann in einem zweiten Teil, mittels der von jeder Versuchsperson individuell eingestellten Reflexionspegel ΔL , die Echschwelle ΔT_{ES} durch Einstellen der Verzögerungszeit ΔT bestimmt werden. Die PegelEinstellung erfolgt analog zu Experiment 1. Der zweite Teil des zweiten Experiments, die Zeiteinstellung, wird mit einem Initialwert von 5 ms begonnen und kann dann in 10%-Schritten erhöht oder erniedrigt werden. Das Experiment wurde von 15 Versuchspersonen durchgeführt und es wurden jeweils 4 Zeiten \times 3 Richtungen \times 2 Seiten (links/rechts) \times 2 Teile = 48 Konditionen evaluiert.

2.2.2 Ergebnisse

Im Rahmen der Auswertung wurden die Reflexionspegel ΔL_{ES} gemäß Gleichung 2.1 normalisiert. In Abbildung 2.3 sind die Ergebnisse des ersten und zweiten Experimentes im Vergleich zu sehen. Dargestellt sind die Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle. Erwartungsgemäß bestätigen die Ergebnisse von Experiment 2 das erste Experiment. Nicht nur die Echschwelle sind ähnlich, auch die Verzögerungszeit ΔT ist signifikant ($p \ll 0,01$) für alle Winkel $\Delta\varphi$. Die Richtung selbst ist nur für $\Delta T \geq 40$ ms signifikant ($p \ll 0,01$); wobei es wiederum zwei Gruppen $\Delta\varphi = 0^\circ$ und $\Delta\varphi \geq 30^\circ$ gibt.

Die Ergebnisse für beide Teilversuche sind in Abbildung 2.4 jeweils für $\Delta\varphi = (0^\circ, 30^\circ, 60^\circ)$ getrennt dargestellt. Die erreichten Pegel ΔL des ersten Teils sind als Mittelwerte und dazugehörige 95%-Konfidenzintervalle für die konstanten Verzögerungszeiten 20 ms, 40 ms, 60 ms und 80 ms zu sehen. Die Verzögerungszeiten ΔT_{ES}

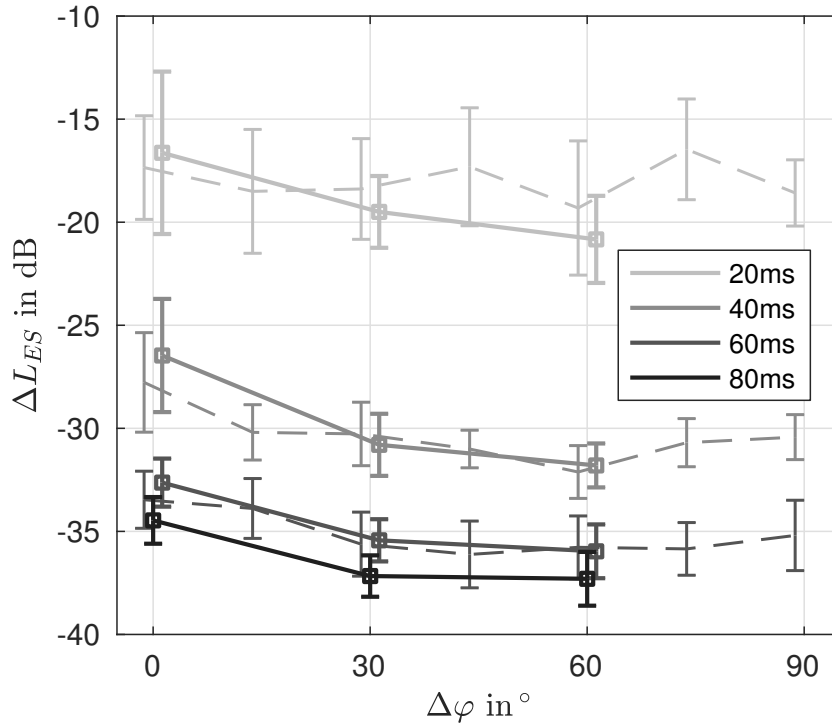


Abbildung 2.3: Mittelwerte und dazugehörige 95%-Konfidenzintervalle der Echschwelle, bestimmt durch den Reflexionspegel ΔL für verschiedene Verzögerungen ΔT und Einfallswinkel $\Delta\varphi$, ermittelt durch Experiment 1 (gestrichelt) und Experiment 2 (durchgezogen).

des zweiten Teils wurden jedoch mit den individuellen Pegeln bestimmt. Für eine möglichst kompakte Darstellung werden zweidimensionale Mittelwerte und ellipsenförmige 95%-Konfidenzbereiche verwendet, vergleichbar mit [WF18]. Die Halbachsen der Ellipsen sind weitestgehend parallel zu den Koordinatenachsen, was auf Unabhängigkeit der beiden Parameter Verzögerungszeit und Reflexionspegel schließen lässt. In Übereinstimmung mit den Berichten einzelner Versuchspersonen deutet die große Streuung in Abbildung 2.4(a) darauf hin, dass es anspruchsvoller ist, eine Reflexion als separates Schallereignis zu erkennen, wenn die Einfallrichtungen von Primärschall und Rückwurf identisch sind. Im Idealfall wären die erhaltenen Kurven für ΔL_{ES} und ΔT_{ES} identisch. Es ergibt sich jedoch eine Verschiebung in Richtung kürzerer Verzögerungszeiten beim zweiten Teil. Außerdem zeigen die zugehörigen Ellipsen eine größere Streuung entlang der ΔT -Achse, was darauf schließen lässt, dass die Zeit für kleiner werdende Pegel schwer einzustellen ist.

In Abbildung 2.5 ist eine alternative Darstellung dieses Zusammenhangs zwischen der vorgegebenen Verzögerungszeit ΔT_{in} aus dem ersten Teil und der eingestellten Zeit $\Delta T_{ES} = \Delta T_{out}$ aus dem zweiten Teil abgebildet. Diese Darstellung zeigt, dass zu-

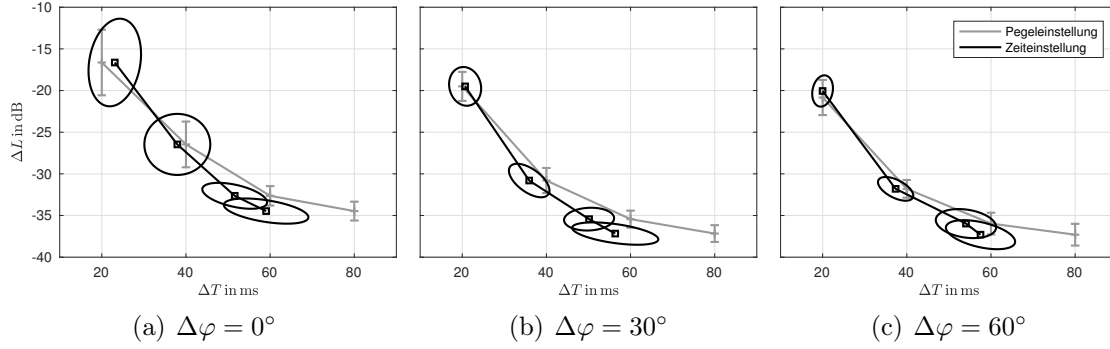


Abbildung 2.4: Ergebnisse des zweiten Experiments für die Richtungen $\Delta\varphi$. Mittelwerte und entsprechende 95%-Konfidenzintervalle der eingestellten Pegel ΔL (Erster Teil) hier in grau; Mittelwerte und 95%-Konfidenzellipsen der eingestellten Verzögerungszeiten ΔT (Zweiter Teil) hier in schwarz.

mindest die Abweichungen für alle Reflexionswinkel gleich sind und eine gemeinsame Modellierung der Daten des zweiten Experiments möglich und sinnvoll ist. Berücksichtigt man den monotonen Einfluss des Reflexionswinkels $\Delta\varphi$ durch eine Sinusfunktion, ergibt sich folgende Erweiterung der Gleichung 2.1:

$$\Delta L_{i,norm} = \Delta L_i - \Delta \bar{L}_i + \Delta \bar{L}_{all} + \alpha \cdot \sin(\Delta\varphi) \quad (2.4)$$

Eine Optimierung des Parameters α durch einen *Least-Squares*-Ansatz ergibt $\alpha = 3,6$ dB. Das ermöglicht auch eine kombinierte Darstellung der Daten wie sie in Abbildung 2.6 erfolgt ist. Durch die Zusammenfassung der Daten verkleinern sich die entsprechenden Konfidenzbereiche. Die Verzögerungszeiten am Ausgang des Versuches ΔT_{out} sind signifikant kleiner als die zugehörigen Eingangszeiten ΔT_{in} ($p \leq 0,02$) für alle $\Delta T_{in} \geq 40$ ms.

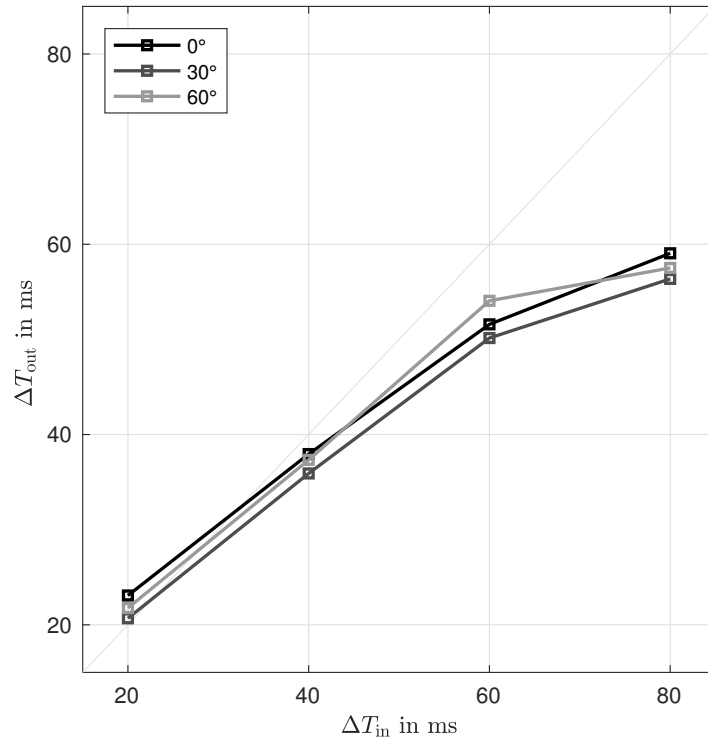


Abbildung 2.5: Mittelwerte der Verzögerungszeiten ΔT_{out} aus Teil 2 über den fixierten Eingangswerten ΔT_{in} aus Teil 1.

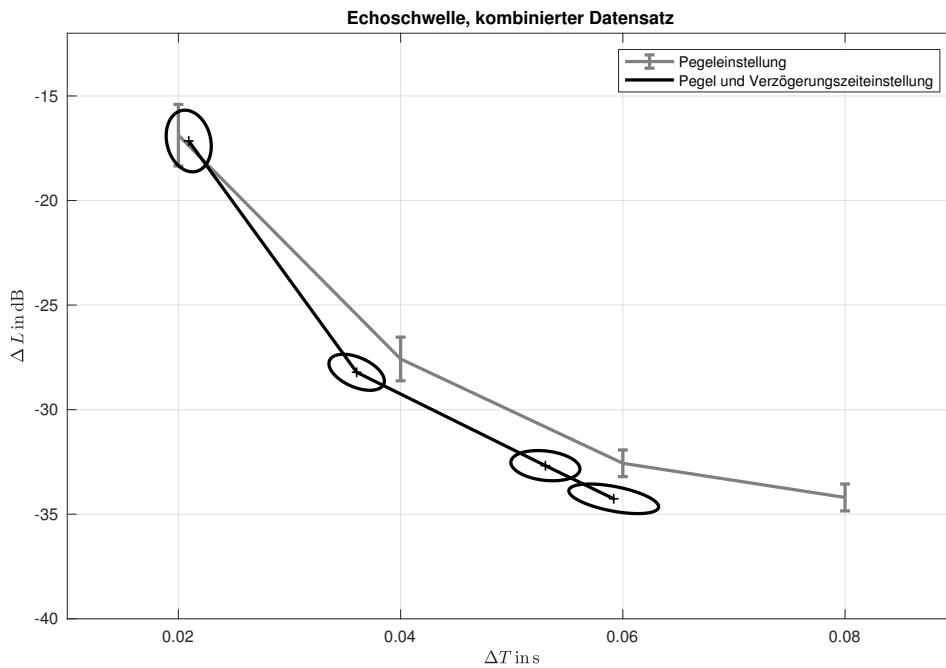


Abbildung 2.6: Zusammengefasste Darstellung der Echoschwellen aus Experiment 2 als Mittelwerte und 95%-Konfidenzintervalle (1. Teil, grau), bzw 95%-Konfidenzellipsen (2. Teil, schwarz). Der Einfluss der Richtung ist mit $-3,6 \text{ dB} \cdot \sin(\Delta\varphi)$ berücksichtigt.

2.3 Diskussion und Zusammenfassung

Dieser erste Hörversuch behandelte den Einfluss von Pegel ΔL , Verzögerungszeit ΔT und Reflexionswinkel $\Delta\varphi$ auf die Echschwelle. Das erste der beiden durchgeführten Experimente konnte beweisen, dass alle diese Parameter einen signifikanten Einfluss haben. Die räumliche Komponente zeigte dabei über den betrachteten Bereich keinen monotonen Verlauf und Signifikanz konnte nur zwischen den Gruppen $\varphi = 0^\circ$ und $\varphi \geq 30^\circ$ für $\Delta T \geq 40\text{ms}$ erreicht werden. Folglich war es auch nicht möglich, die Echschwelle direkt über den Einfallswinkel zu messen, während Pegel und Verzögerungszeit konstant gehalten wurden. Dieses Ergebnis bestätigt die von Kurz (in [Kur18]) erarbeitete Erkenntnis, dass die Einfallrichtung $\Delta\varphi$ ein Parameter von untergeordneter Relevanz ist. Verglichen mit dem Einfluss von Pegel ΔL und Verzögerungszeit ΔT hat die Reflexionsrichtung einen erheblich geringeren Einfluss und kann daher in der Modellierung des erweiterten Energievektors vernachlässigt werden.

Das zweite Experiment untersuchte den Einfluss von Reflexionspegel ΔL und Verzögerungszeit ΔT in einem mehrteiligen Verfahren. Im ersten Teil wurden die Versuchspersonen gebeten, den Pegel ΔL für konstante Verzögerungen ΔT einzustellen. Die Ergebnisse dieses Teils fungierten als Eingangsparameter für den zweiten Teil, in dem dann die entsprechenden Zeitwerte eingestellt werden sollten. Idealerweise wären diese Zeiten identisch gewesen. Tatsächlich sind die Verzögerungszeiten des zweiten Teils, obwohl Pegel und Zeit unabhängige Parameter sind, signifikant niedriger als die des ersten Teils für alle Zeiten $\Delta T \geq 40\text{ms}$. Das legt den Schluss nahe, dass sich das Kriterium für die Echschwelle bei allen Versuchspersonen verändert hat und im zweiten Teil optimistischer war. Verglichen mit dem ersten Teil war erheblich weniger Verzögerung nötig, um die Reflexion als separates Schallereignis wahrzunehmen. Eine andere mögliche Erklärung dafür könnte eine gewachsene Sensibilität der Versuchspersonen für die Echowahrnehmung sein. Eine einfache Methode die Echschwelle absolut zu bestimmen und dabei eine kriteriumsfreie Messung – direkt oder indirekt – zu erzielen, existiert nicht.

Kapitel 3

Diffusion und kriteriumsfreie Wahrnehmungsschwellen

Für den zweiten Versuch ergeben sich zwei relevante Fragestellungen. Einerseits gilt es, den Einfluss der Diffusität auf den Präzedenzeffekt und die damit verbundenen Schwellen zu bestimmen. Andererseits sind die Schwellen selbst und inwiefern ein individuelles Kriterium innerhalb dieser vermieden werden kann, wichtige Aspekte.

Zuerst soll also der Einfluss der Diffusität auf eine Reflexion und die daraus folgende Veränderung der Wahrnehmungsschwellen untersucht werden. Das physikalisch einfache Modell der Streuung mittels Lambert-Cosinus in Abschnitt 3.1, das bereits aus [WH18] bekannt ist, soll dazu verwendet werden.

Im Weiteren sind dann die verschiedenen Arten von Wahrnehmungsschwellen und deren Lage zu überprüfen. Die Maskierschwelle als eine Relativschwelle und eine Aufgabe zur Richtungsunterscheidungsschwelle als eine Frage der Diskriminationsunterdrückung bieten ein mögliches Vorgehen zur kriteriumsfreien Schwellenüberprüfung. Zuletzt kann dann der Einfluss des Testverfahrens auf die Lage und Genauigkeit einer Schwelle herausgearbeitet werden.

3.1 Modell

Im Folgenden wird das Modell zum Entwurf der Impulsantwort einer diffusen Reflexion näher beschrieben.

Das Grundmodell einer tangential zu einer Ellipse verlaufenden Wand erweist sich als vorteilhaft für die Konzeption. Durch die Positionierung von Sender und Empfänger in den Brennpunkten der Ellipse (blau), ist, unabhängig von der Richtung, aus der die Reflexion eintreffen soll, deren Wegdifferenz Δs und damit die Verzögerungszeit ΔT immer konstant.

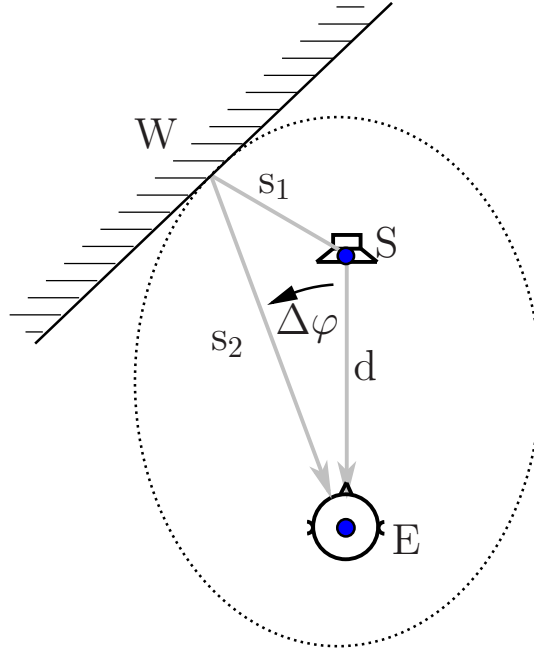


Abbildung 3.1: Reflexionsweg der diskreten Reflexion einer Wand, tangential an einer Ellipse.

3.1.1 Diffusion

Eine Erweiterung des diskreten Ansatzes aus Abschnitt 1.3.1 um das Konzept der Streuung ermöglicht die Modellierung der Diffusion eines Rückwurfes. Die Streuung ist dabei diejenige Materialeigenschaft, die einen abgeschwächten, diffusen Schallrückwurf hervorruft. Das Lambertsche Kosinusgesetz beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Winkel relativ zur Wandnormale und der Intensität einer Reflexion. Eine schematische Darstellung der entstehenden Streuung im Vergleich zur diskreten Reflexion befindet sich in Abbildung 3.2.

Die einfallende Schallenergie teilt sich, wie im diskreten Fall auch, in den absorbierten (E_{Abs}) und den reflektierten Anteil (E_{Refl}) auf, $E_{ges} = E_{Abs} + E_{Refl}$. Für eine Untersuchung der Reflexionseigenschaften ist der absorbierte Anteil nicht weiter von Belang und wird durch den Lautstärkepegel der Reflexion immanent berücksichtigt. Der Streufaktor ($0 \leq S \leq 1$) bezeichnet dann den Anteil der verbleibenden reflektierten Energie (E_{Refl}), der diffus reflektiert wird.

$$E_{Refl} = \underbrace{S \cdot E_{Refl}}_{E_{diffus}} + \underbrace{(1 - S) \cdot E_{Refl}}_{E_{diskret}} \quad (3.1)$$

Ein Streufaktor von $S = 1$ oder $S = 100\%$ entspricht einer völlig diffusen Reflexion. $S = 0 \hat{=} 0\%$ entspricht analog dazu einer diskreten oder Spiegel-Reflexion. Deren Aus-

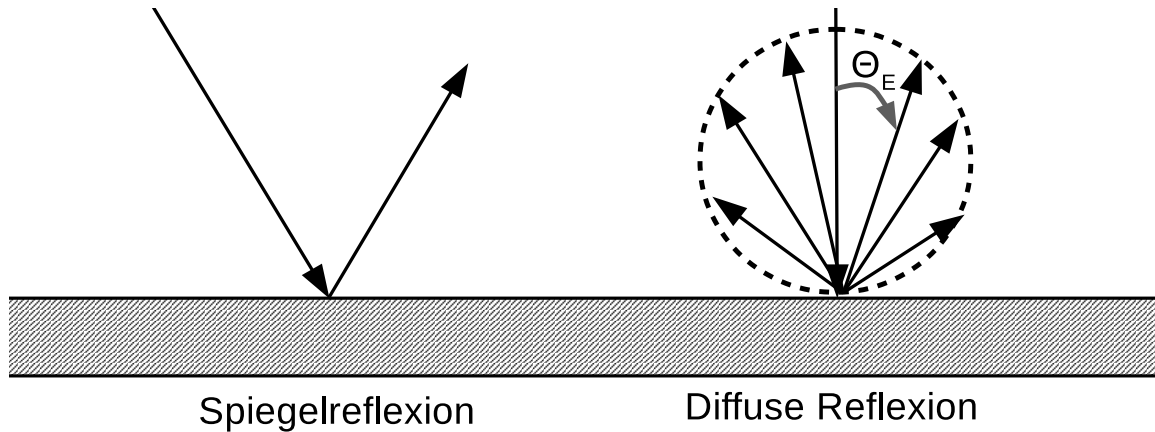


Abbildung 3.2: Schematische Darstellung des gestreuten Intensität einer diskreten und einer diffusen Reflexion.

breitungsweg ist in Abbildung 3.1 als grauer Pfeil ($s_1 + s_2$) dargestellt. Alle anderen Punkte der abgebildeten Wand (W) tragen durch Streuung zu einer diffusen Reflexion bei. Im Rahmen dieses Versuches wird eine diskrete Reflexion ($S = 0\%$), eine diffuse Reflexion ($S = 100\%$) und eine teildiffuse Reflexion ($S = 50\%$) als Überlagerung der zuvor genannten modelliert. Durch energetische Normierung (vgl. Abschnitt 3.1.3) der Impulsantworten wird erreicht, dass diese die gleichen äquivalenten Schallpegel aufweisen.

Die Schallintensität dI_w mit der eine einzelne Wandfläche zur Gesamtintensität beiträgt, hängt vom Lambert-Kosinus des Ausfallswinkels (Θ_E) der Schallwelle an der Wand ab. Der Kosinus des Wandwinkels Θ_S eines Flächenelements dW skaliert deren wirksame Fläche (vgl. Abbildung 3.2). Zusätzlich gehen noch die Abstände (s_1, s_2) von Sender und Empfänger zum Flächenteil (dW) in die Berechnung mit ein (siehe Abbildung 3.3). Es gilt der Zusammenhang in Gleichung 3.3 (vgl. [WH18]). Q ist dabei die Schalleistung der Quelle S . Es entsteht eine räumlich und zeitlich aufgeweitete Reflexion. Abbildung 3.4 zeigt beispielhaft eine entstehende Intensitätsverteilung.

Eine ideal modellierte diffuse Reflexion enthält die Superposition unendlich vieler Punkte auf der reflektierenden Wand. Für die Modellierung soll eine Approximation mittels endlich vieler Punkte ausreichen. Die tatsächlich benötigte und mögliche Anzahl wird separat ermittelt (vgl. Abschnitt 3.1.5). Eine Aufteilung der fiktiven Wand in ein Rechteckraster ergibt Teilflächen, für die Intensitäten und dazugehörige Zeiten und Richtungen berechnet werden können. Die Richtungsvektoren $s_{2;i,j}$ ergeben sich aus der Differenz der Aufpunkte jedes Wandteils $\vec{w}_{i,j}$ und der Empfängerposition \vec{E} (vgl. Abbildung 3.3):

$$\vec{s}_{2;i,j} = \vec{E} - \vec{w}_{i,j} \quad (3.2)$$

Die Zeiten berechnen sich analog zum diskreten Fall in Gleichung 1.1.

$$dI_w = \frac{Q \cos \Theta_S \cos \Theta_E}{4 \pi s_{1S}^2 s_{2E}^2} dw. \quad (3.3)$$

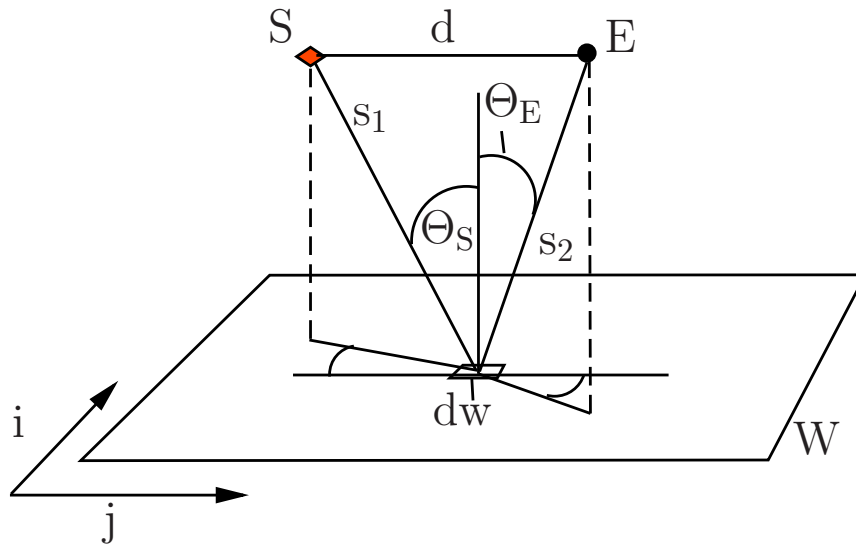


Abbildung 3.3: Geometrische Anordnung zur Intensitätsberechnung mittels Lambert-Cosinus. Sender, S. Empfänger, E.

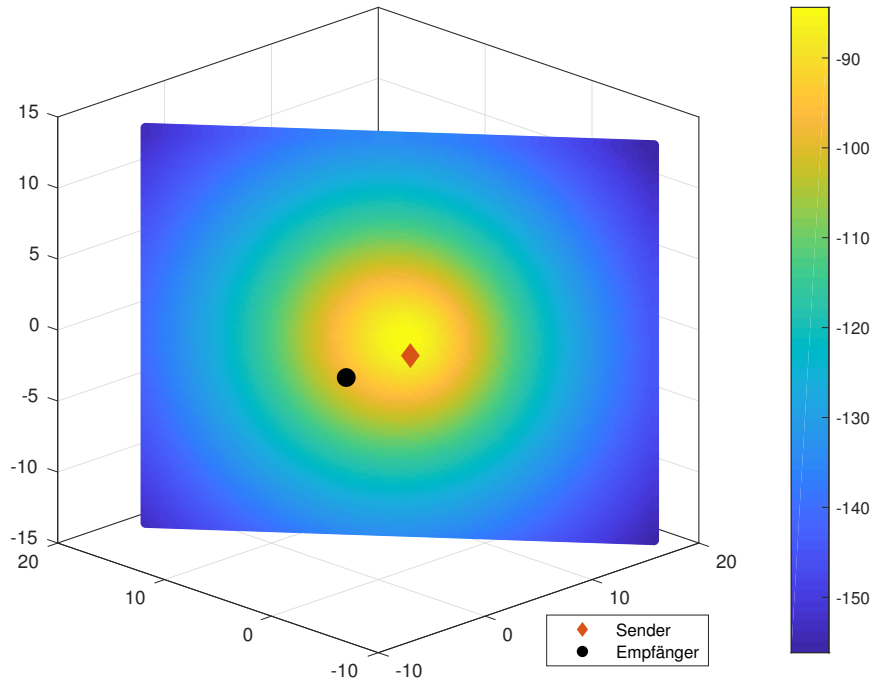


Abbildung 3.4: Modellierter Energieverteilung auf einer Wand in $\text{dB}_{\text{absolut}}$.

3.1.2 Encodierung in binaurale Kopfhörersignale

Ein mit der berechneten Intensität skaliertes und um die entsprechende Verzögerungszeit verschobener Impuls ergibt den Energiebeitrag jedes einzelnen Flächenstücks der Wand. Die Wurzel aus jedem Energieanteil wird mit einem zufälligen Vorzeichen versehen und entspricht dem Beitrag eines Flächenstücks zur Impulsantwort. Durch ambisonische Richtungsinterpolation und Faltung der erhaltenen Impulse mit jeweils derjenigen Außenohrübertragungsfunktion (aus [Ber13]), die der zugehörigen virtuellen Lautsprecherposition am nächsten kommt, entstehen richtungskodierte, binaurale Impulsantworten jedes Flächenstücks. Zeitrichtiges Aufsummieren dieser Teilstücke erzeugt dann die binaurale Impulsantwort der vollständig diffusen Reflexion.

Die ambisonische Richtungsinterpolation erfolgt über eine Encodierung in harmonische Kugelflächenfunktionen bis zur 17. Ordnung.¹ Die anschließende Dekodierung der virtuellen Lautsprecherhimmrichtungen aus einem t-Design (35. Ordnung) erzeugt ein energieerhaltender MAX-rE Dekoder. Dazu erfolgt eine Normierung von $(4 \cdot \pi)/L$, mit $L = 632$, der Anzahl der virtuellen Lautsprecher. Die Normierung wird in gleiche Faktoren von $\sqrt{(4 \cdot \pi)/L}$ auf die Encodierung und Dekodierung aufgeteilt. Auf welche Außenohrübertragungsfunktion die jeweilige virtuelle Lautsprecherposition des t-Designs übertragen wird, entscheidet sich über die betragsmäßig kleinstmögliche Dif-

¹Higher Order Ambisonics Library von [Pol15].

ferenz der zugehörigen Richtungsvektoren. Die gute Übereinstimmung der Richtungen zeigt Abbildung 3.5.

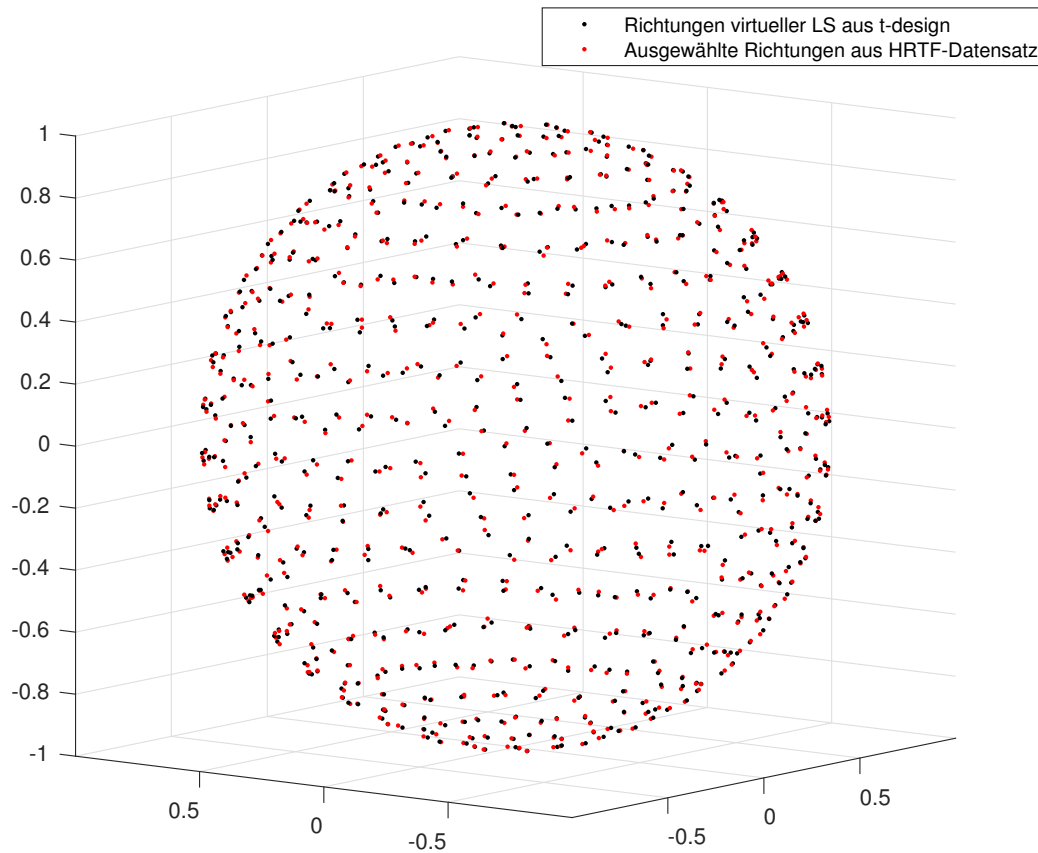


Abbildung 3.5: Übereinstimmung der Richtungen des t-Designs und der Außenohrübertragungsfunktionen.

3.1.3 Pegeldefinitionen

Im Rahmen dieser Arbeit finden verschiedene Pegeldefinitionen ihre Verwendung:

Relativpegel Als Pegel einer Reflexion und damit auch der daraus bestimmten Schwellen, wird der Relativpegel ΔL , bezogen auf den Pegel des Direktschalls, wie in Abschnitt 1.3.1 definiert, verwendet.

Normalisierung der Stimuli Die Pegel aller Stimuli relativ zueinander müssen vollkommen gleich sein. Das wird durch folgendes Vorgehen erreicht: Durch Normalisierung der Impulsantworten auf gleiche RMS-Werte und die anschließende energieerhaltende Kodierung wird sichergestellt, dass alle Stimuli die gleiche Energie aufweisen und die erhaltenen Schwellen konsistente Werte ergeben. Die energieerhaltenden Eigenschaften

der Kodierung sind wichtig, da der Direktschall und die diskrete Reflexion nicht der Kodierung unterzogen werden, sondern durch direkte Faltung mit den entsprechenden Impulsantworten binauralisiert werden. Um eine Beeinflussung der Normalisierungspegel durch die Summierung der Teilimpulsantworten auszuschließen, erfolgt die Normalisierung der diffusen Reflexionen auf Basis eines fiktiven Messsignals. Dieses besteht aus der Summe aller zeitrichtig angeordneten Teilimpulse (ohne deren Richtungskodierung) und entspricht dem Schalldruck an der Position des Empfängers (ohne Außenohrübertragungsfunktionen). Der RMS-Pegel dieses Signals ergibt den Nenner der Normierung der diffusen Reflexion. Die anschließende energieerhaltende Kodierung aller Teilimpulse verändert den Gesamtpegel der Impulsantwort nicht. Die Impulsantworten des Direktschalls und der diskreten Reflexion (*dirac*-Signal der gleichen Länge der diffusen Impulsantwort) werden auf den gleichen RMS-Pegel normalisiert. Bei der anschließenden Faltung mit den Testsignalen entstehen so Stimuli gleicher Energie für alle Testkonditionen.

Kalibration Durch Kalibration wird der Zusammenhang zwischen dem relativen Digitalpegel und dem tatsächlichen Schalldruckpegel bestimmt. Die Pegelkalibration der verwendeten Wiedergabekette erfolgte mittels eines *Brüel und Kjaer* Pegelkalibrators und eines Neumann KU100 Kunstkopfes. Dazu wurde zuerst das Signal des Pegelkalibrators (TYP 4231 SCHALLKALIBRATOR: Sinussignal mit 94 dB) mit den aus der KU100-Anordnung entnommenen Mikrofonen aufgezeichnet. Nach erfolgtem Einbau in den Kunstkopf konnte dann der Teststimulus mit aufgesetztem Kopfhörer aufgenommen werden. Eine Auswertung der äquivalenten Dauerschallpegel² ergibt einen Pegelunterschied von $-39,9$ dB. Das entspricht einem äquivalenten Dauerschallpegel des Impulszuges von $L = 54,1$ dB(A)_{eq}.

3.1.4 Oberflächenstruktur der Wand

Regelmäßige Abstände der Wandelemente und daraus folgende Periodizität in der entstehenden Impulsantwort erzeugen Kammfilter und tonale Färbungen (vgl. [SLTS12]). Da eine tonale Unterscheidbarkeit der diffusen Reflexion von einer diskreten Reflexion zu unterschiedlichen Echoschwellen führt, soll ein möglichst weißes Spektrum der Impulsantwort (vergleichbar zu [WH18]) angestrebt werden. Zu diesem Zweck wird eine Rauigkeit in Richtung der Wandnormale eingeführt. Diese additive Komponente fügt dem Modell eine Oberflächenstruktur auf Basis einer Zufallsgröße hinzu. Eine einfache normalverteilte Zufallsgröße erweist sich dabei als ungeeignet, da die begrenzte

²mittels `Leq_all_calc` aus [Zec].

Strukturtiefe zu einem Tiefpassverhalten der Wand führen würde. Die Lösung dieses Problems stellt das folgende räumliche Filter dar:

$$\begin{aligned}
 ij &= \sqrt{(ii^2 + jj^2)}, \\
 w_{spec}(ii + 1, jj + 1) &= \frac{1}{1 + (ij/fw)^{3/2}}, \\
 w_{rau} &= \sqrt{b \cdot 4 \cdot \Re(\mathcal{F}^{-1}(\Re(\mathcal{F}^{-1}(w_{spec}, 4 \cdot h)), 4 \cdot b)')}.
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Für jedes Wandelement wird der Norm (ij) seiner Indizes entsprechend ein Filterfaktor w_{spec} definiert. Dieser beinhaltet den einheitenlosen Designparameter fw und bildet die Grundlage für die Strukturfunktion w_{rau} . Dieses w_{rau} , dargestellt in Abbildung 3.6, ergibt sich aus der Wurzel der inversen räumlichen Fouriertransformationen von w_{spec} . Das Ergebnis ist eine Wandgeometrie mit einer mittleren Tiefe von 0,4 m, die eine ausreichend weiße Übertragungsfunktion aufweist (siehe Abbildung 3.7).

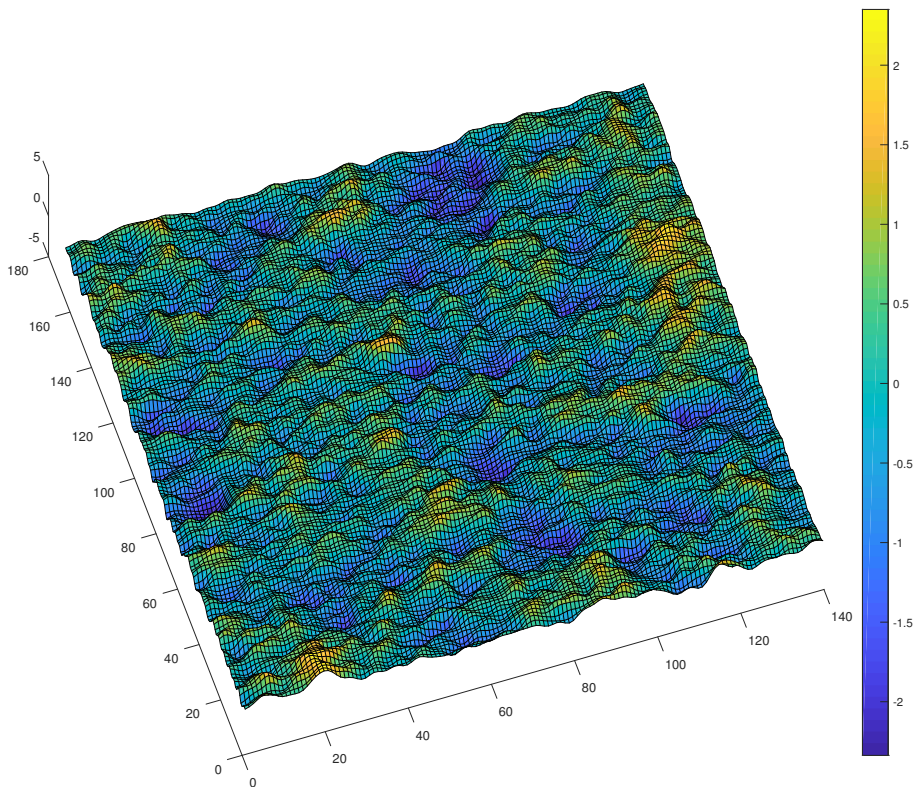


Abbildung 3.6: Rauigkeit der Wand in m.

3.1.5 Parameteroptimierung

Die Wandgeometrie aus Abschnitt 1.3.1 und das Rauigkeitsmodell aus 3.1.4 ergeben eine Reihe von möglichen Entwurfparametern mit direkter Auswirkung auf die verwendeten Stimuli. Aus Abbildung 3.4 ist bereits ersichtlich, dass die Wand eine gewisse Mindestgröße besitzen muss. Andernfalls wird der Energieverlauf der Reflexion nicht ausreichend abgebildet und es entstehen durch Randeffekte hörbare Übergänge im Reflexionsstimulus. Diese zeigen sich in der Einhüllenden der Impulsantwort als Knick, der so spät wie möglich erfolgen soll. Als Grenzwert für diesen Zusammenhang sollte in der entstehenden Impulsantwort ein Erreichen von circa 90 % der Energie, die eine unendlich große Wand reflektieren würde, angenommen werden. Ein Vergleich mit einer sehr großen Wand (300 m × 200 m) ergab für das Modell mit 60 ms Verzögerung eine Mindestwandgröße von 102 m × 84 m. Durch informelle Hörtests gestützt, konnte die minimale Wandgröße verifiziert werden, so dass sich keine hörbaren Einbußen ergaben. Eine Verkleinerung der Wandfläche beschleunigt die Berechnung jeder einzelnen Impulsantwort erheblich, da die Richtungsenkodierung jedes Wandelementes sehr rechenintensiv ist.

Eine Skalierung der Wand mit der Verzögerungszeit ist ebenso möglich und sinnvoll, so dass sich die in Tabelle 3.1 befindlichen Wanddimensionen ergeben:

Verzögerungszeit	20 ms	40 ms	60 ms
Wandbreite	34 m	68 m	102 m
Wandhöhe	28 m	56 m	84 m

Tabelle 3.1: Wanddimensionen nach Verzögerungszeit.

Ein weiterer Parameter, der grundlegend mit der Wandgröße und Geometrie zusammenhängt ist die Kantenlänge jedes Wandelementes. Eine Verkleinerung der Wandelemente verbessert die räumliche und zeitliche Auflösung – es stehen mehr Einzelimpulse zur Verfügung (vgl. [SLTS12]). Andererseits steigt zugleich aber der Rechenaufwand stark an, da die Anzahl an Einkodierungsoperationen mit abnehmender Kantenlänge quadratisch steigt. Die Optimierung der Kantenlänge zusammen mit dem Designparameter fw aus Abschnitt 3.1.4 wurde mit Hilfe von Leistungsdichtespektren aus Welch-Periodogrammen durchgeführt und es ergaben sich $l_{Kante} = 0,2$ m und $fw = 20$. Ein Beispiel für die erzielten Verbesserungen der Leistungsdichtespektren ist in Abbildung 3.7 zu sehen. Anschließend wurde für jeden Stimulus aus zehn Impulsantworten die jeweils bestklingende mit möglichst glattem Terzbandspektrum ausgewählt. Ein Vergleich der ausgewählten Impulsantworten für die Verzögerungszeit von 20 ms und einen Einfallswinkel von 70°, mit und ohne Oberflächenstruktur, ist in Abbildung 3.8 zu sehen.

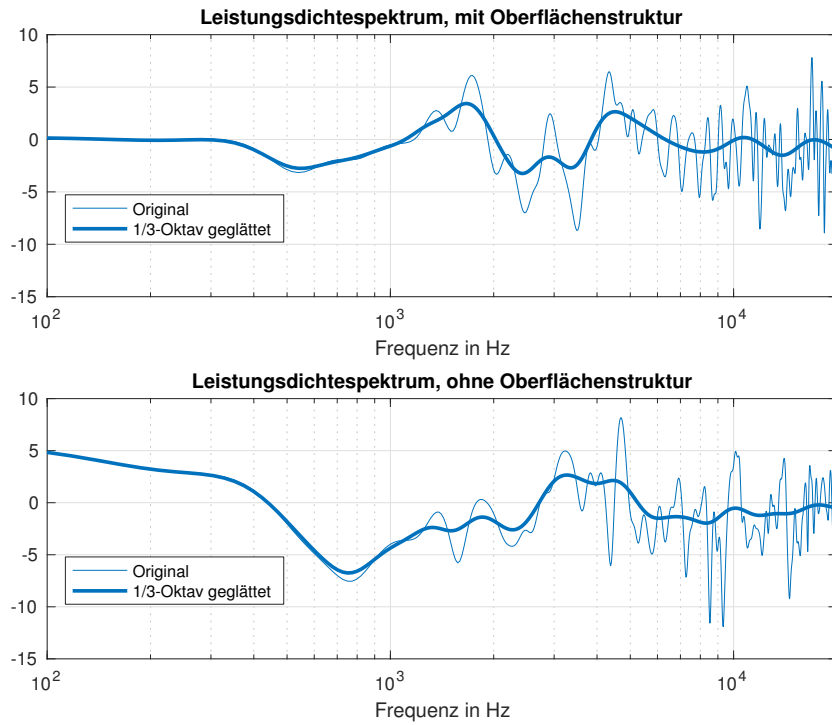


Abbildung 3.7: Leistungsdichtespektrum mit und ohne Oberflächenstruktur, jeweils original und Dritteloktav-geglättet.

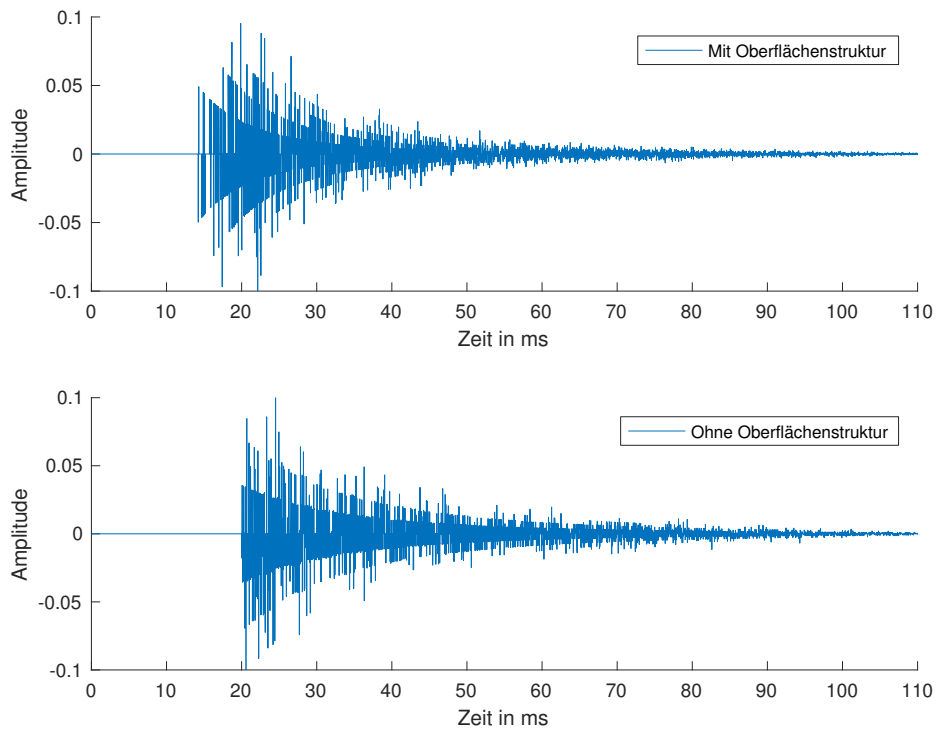


Abbildung 3.8: Ausgewählte Impulsantwort mit und ohne Oberflächenstruktur, für $\Delta T = 20$ ms und $\Delta\varphi = 70^\circ$.

3.2 Testverfahren

Wie bereits in Kapitel 2 resümiert, hängt das Ergebnis eines Versuches zu Hörschwellen auch von der Wahl des Testverfahrens ab. Weiterhin bleibt es erstrebenswert, ein Verfahren zu finden, das weniger stark oder am besten gar nicht von individuellen Kriterien abhängig ist. Für eine garantierte Vergleichbarkeit mit dem ersten Experiment ist es sinnvoll, dessen Versuchsverfahren beizubehalten. Daraus folgt die Verwendung der beiden folgenden Verfahren in diesem Hörversuch:

Herstellungsmethode Die Herstellungsmethode oder das direkte Einstellen des Schwellenwertes wird analog zu Abschnitt 2.1 durchgeführt.

Grenzmethode Die Grenzmethode in Form eines Adaptive-Forced-Choice-Verfahrens (AFC) soll als weitere Versuchsmethode implementiert werden. AFC-Verfahren basieren auf einem sich stufenweise adaptierenden Frage-Antwort-Prozess. Im Gegensatz zu einer simplen Ja/Nein-Abfrage ist durch den sogenannten Forced-Choice-Ansatz eine gewisse Kontrolle über die Richtigkeit der Angaben einer Versuchsperson gegeben. Beurteilt diese die gestellten Trials (Fragestellung zum präsentierten Stimulus) richtig, werden die Aufgaben anspruchsvoller, bei falscher Antwort einfacher. So wird prinzipiell fortgefahren, bis ein bestimmter Punkt der psychometrischen Funktion erreicht ist. Die psychometrische Funktion beschreibt den stochastischen Zusammenhang zwischen der Reizstärke und der Wahrscheinlichkeit diesen zu erkennen. Die Lage des Zielpunktes auf dieser Funktion ergibt sich je nach gewählter Adaptionsregel (vgl. [KBBW12]). Im Rahmen dieser Arbeit wird ein sogenanntes Transformed-Up-Down-Verfahren („2 down - 1 up“) verwendet. Dabei werden grundsätzlich zwei richtige Antworten oder eine falsche Antwort für eine Umkehr der Adaptionsrichtung benötigt. Um die Versuchsdauer zu verringern und schnellere und dadurch genauere Ergebnisse zu erzielen, wird diese Umkehrregel um folgenden Zusatz ergänzt: Hat die Versuchsperson noch keine Frage falsch beantwortet und ist die aktuell eingestellte Schwelle noch höher als $-30 \text{ dB}_{\text{relativ}}$ wird ein „1 down - 1 up“-Verfahren verwendet. Durch diese Veränderung konvergiert die Versuchsmethode schneller in Richtung des gesuchten Schwellenpegels. Idealerweise gilt: Angefangen bei einem Relativpegel von $0 \text{ dB}_{\text{relativ}}$ ergibt sich eine absteigende Reihe der abgefragten Pegelwerte, die zu der gesuchten Schwelle hin konvergiert. Die Treffergenauigkeit einer Versuchsperson sinkt zum Ende eines Tracks (Adaptionszyklus für eine Testkondition), wodurch zwangsläufig mehrere Umkehrpunkte entstehen. Die Anzahl dieser kann schließlich als Abbruchkriterium verwendet werden. Nach maximal elf Umkehrungen kann davon ausgegangen werden, dass die gewünschte Schwelle erreicht ist (vgl. [Kle01]). Die erreichte Trefferwahrscheinlichkeit Ψ_{konv} der psychometrischen Funktion konvergiert für ein „2 down - 1 up“-Verfahren idealerweise zu $\Psi = 71\%$ (vgl.

[KBBW12]). Ein Forced-Choice-Paradigma mit m Alternativen erreicht nach Kuehner dann eine ratekorrigierte Wahrscheinlichkeit Ψ_{konv}^* von:

$$\Psi_{konv}^*(m) = \frac{\Psi_{konv} - 1/m}{1 - 1/m}. \quad (3.5)$$

Für $m = 2$ ergibt sich demnach eine ratekorrigierte Wahrscheinlichkeit Ψ_{konv}^* von 0,42. Die meist angestrebte ratekorrigierte Zielwahrscheinlichkeit von 0,5 wird nicht exakt erreicht. Damit ist das Verfahren zwar nach Kuehner [KBBW12] stochastisch nicht ideal, soll aufgrund seiner zeitlichen Kompaktheit hier dennoch angewendet werden. Zur Kontrolle werden die Adaptionsschritte der Versuchspersonen überprüft und einzelne Tracks bei Bedarf wiederholt. Eine Mittelung über die Pegel aller Trials während der letzten $n \geq 6$ Umkehrungen ergibt laut [Kle01] eine zuverlässige Schwelle. In diesem Versuch soll deshalb das Mittel über die Pegelwerte während der letzten sechs Umkehrungen als Schwellenwert verwendet werden.

Die erzielten Schwellen unterscheiden sich abhängig vom gewählten Paradigma (Testaufgabe). Ein Forced-Choice-Ansatz ist nur dann möglich, wenn die gestellte Versuchsfrage falsifiziert werden kann. Andernfalls kann keine Kondition für eine Umkehr des Adaptionprozesses definiert werden. Die Echoschwelle als eine Schwelle, der kein absoluter Reiz zu Grunde liegt, ist für ein AFC-Verfahren ungeeignet, da keine passende Vergleichskondition gefunden werden kann. Im Umkehrschluss folgt jedoch, dass sich die Maskierschwelle oder absolute Wahrnehmbarkeitsschwelle, deren Auftreten durch einen Stimulus ohne Reflexion direkt falsifizierbar ist, für diesen Versuch eignet. Deshalb soll die Maskierschwelle innerhalb dieses Versuches bestimmt werden.

Insgesamt werden für dieses Experiment die vier folgenden Paradigmen angewendet:

MS_{2I} - Maskierschwelle mit zwei Intervallen und zwei Alternativen Im einfachsten Fall werden der Versuchsperson zwei Intervalle präsentiert. Eines enthält eine Reflexion und eines enthält keine. Die Entscheidungsfrage ist, in welchem Stimulus die Reflexion vorhanden war. Die möglichen Antworten sind:

- Die Reflexion war im ersten Stimulus.
- Die Reflexion war im zweiten Stimulus.

Kann die Versuchsperson das Vorhandensein einer Reflexion zuverlässig (zwei mal in Folge) unterscheiden, wird der Reflexionspegel verringert. Täuscht sich die Versuchsperson ein mal, wird der Pegel erhöht. Die erreichte Schwelle zeigt dann ein Erkennen einer Reflexion gegen eine reflexionsfreie Referenz an. Diese in die Aufgabenstellung inkludierte Referenz ist nicht obligatorisch, gibt aber potentiell die Möglichkeit, eine

etwas niedrigere und genauere Maskierschwelle zu erreichen. Dieser Sachverhalt soll im Verlauf der Auswertung genauer untersucht werden.

MS_{1I}- Maskierschwelle mit einem Intervall, zwei Alternativen In diesem Testparadigma wird der Versuchsperson nur ein Intervall ohne einen zweiten Stimulus als Referenz vorgestellt. Dabei ist nach einem zufälligen Muster eine Reflexion mit dem gerade erreichten Pegelwert enthalten oder nicht. Die zwei möglichen Antwortalternativen sind dann:

- Es war eine Reflexion zu hören.
- Es war keine Reflexion zu hören.

Die gefundene Schwelle zeigt also ein zuverlässiges Erkennen einer Reflexion ohne weitere Vergleichsmöglichkeit an. Durch den hohen Initialpegel $\Delta L = 0\text{dB}$ der Reflexion und die Alltagserfahrung, wie eine Reflexion klingt, kann die Referenz als bekannt vorausgesetzt werden. Die erreichte Schwelle ist ebenso als Maskierschwelle anzusehen.

RS_{1I} - Richtungsunterscheidungsschwelle mit einem Intervall, zwei Alternativen Verändert man das Testparadigma zu einer Richtungsunterscheidung des Reflexionsstimulus, erhält man eine anders geartete Schwelle. Die Antwortmöglichkeiten verändern sich bei dieser Versuchsfrage zu:

- Die Reflexion war links vom Direktschall.
- Die Reflexion war rechts vom Direktschall.

Nach der Unterscheidung in Kapitel 1 ist diese Schwelle einem Aufbrechen der Lokalisationsdominanz gleichzusetzen (vgl. Abschnitt 1.1.2). Eine bestehende Lokalisationsdominanz würde eine vollständige Unterdrückung der Reflexionsrichtung bedeuten. Da zugleich keine vollständige Lateralisation in Richtung des einfallenden Echos geschehen muss, um eine Richtungstendenz in dieser Versuchsfrage korrekt zu erkennen, befindet sich die dann gemessene Reizschwelle noch im Bereich der Diskriminationsunterdrückung (vgl. Abschnitt 1.1.3). Ihr Wertebereich ist damit zwischen der Maskierschwelle und der Echschwelle zu erwarten.

RS_{1I,einbl} - Richtungsunterscheidungsschwelle mit einem Intervall, zwei Alternativen, Frage nach der Richtung, Einblenden der Stimuli Diese Fragestellung gleicht bis auf ein Detail der Richtungsunterscheidung aus Abschnitt 3.2. Die wichtige Veränderung im Vergleich zur vorangegangenen beinhaltet ein lineares Einblenden der Lautstärke innerhalb von 2 Sekunden zu Beginn jedes Trials. Die zeitliche

Entwicklung dieses Stimulus ist in Abbildung 3.9 schematisch dargestellt. Die Einblendung entzieht dem Gehör die Information der plötzlichen Lautstärkeveränderung und ermöglicht dadurch die Beobachtung des *Buildup*-Effektes.

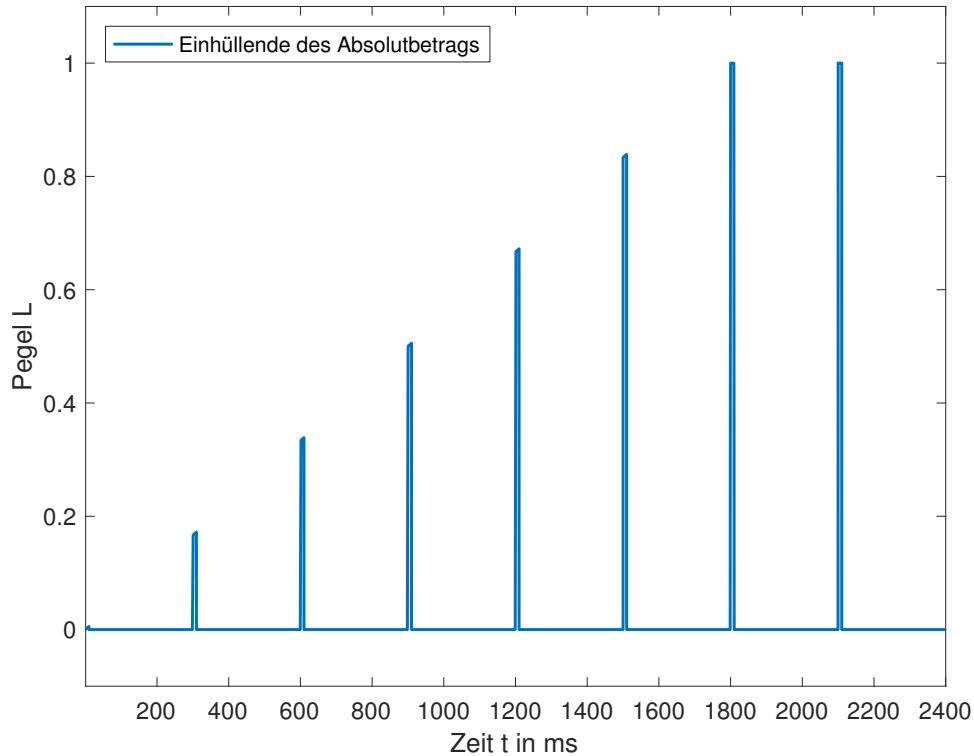


Abbildung 3.9: Betragseinhüllende des eingeblendeten Stimulus.

3.3 Versuchsaufbau und Durchführung

Aufbau und Durchführung des zweiten Hörversuches fanden analog zum ersten Hörversuch statt (vgl. Kapitel 2). In einem abgeschlossenen, akustisch behandelten Raum wurde den Versuchspersonen mittels eines Kopfhörers (Beyerdynamic DT770 pro) an einem Audiointerface (Focusrite Scarlett 2i2) individuell der Hörversuch präsentiert. Die Versuchsreihenfolge, zuerst direktes Einstellen oder zuerst das Transformed-Up-Down-Verfahren, wurde zufällig entschieden. Ebenso zufällig war die Abfolge der Testkonditionen für jede Versuchsperson. Als Teststimulus kommt das Rauschsignal aus Abschnitt 2.1.1 zur Anwendung.

3.3.1 Versuchspersonen

Der Hörversuch wurde mit zwölf Personen, vier weiblich und acht männlich, zwischen 25 und 56 Jahren durchgeführt. Alle bestätigten normale Hörfähigkeit und verfügen über musikalische Bildung.

3.3.2 Konditionen

Die Zusammenstellung der Konditionen eines Versuches bestimmt maßgeblich dessen Länge und spätere Aussagekraft. Für den AFC-Versuchsteil konnte nicht die volle Permutation an Testkonditionen verwendet werden, da das adaptive Verfahren vergleichsweise zeitaufwendig ist und die Versuchsdauer auf maximal eine Stunde pro Person begrenzt werden sollte. Insgesamt musste daher die Menge an Testkonditionen begrenzt werden und es ergab sich folgender Versuchsinhalt.

Herstellungsmethode (Direkt-Einstell-Versuch) Für diesen Teil des Versuches wurden wie im ersten Hörversuch zwei Wiederholungen, zufällig auf beide Wiedergabeseiten (links/rechts) verteilt, durchgeführt. Zusammen mit zwei Winkeln (nahezu frontal bei $\Delta\varphi = 20^\circ$ und lateral bei $\Delta\varphi = 70^\circ$), drei Verzögerungszeiten ($\Delta T = 20$ ms, 40 ms und 60 ms) und drei verschiedenen Streukoeffizienten ($S = 0; 0,5$ und 1) ergaben sich daraus 2 Wiederholungen $\times 2$ Richtungen $\times 3$ Zeiten $\times 3$ Streukoeffizienten = 36 Testkonditionen.

Grenzmethode Im adaptiven Teil des Versuches unterscheiden sich die verwendeten Konditionen der durchgeführten Tracks je nach Testparadigma. Auch die Anzahl der verwendeten Stimulusimpulse (vgl. Abschnitt 2.1.1) wurde angepasst. Als Reflexionsrichtung wurde ausschließlich die laterale Kondition ($\Delta\varphi = 70^\circ$) verwendet.

- **MS_{2I}**: Eine Verzögerungszeit ($\Delta T = 20$ ms), zwei Streufaktoren ($S = 0$ und $S = 1$).

Die Stimuli sind jeweils drei Rauschpulse pro Intervall.

- **MS_{1I}**: Drei Verzögerungszeiten ($\Delta T = 20$ ms, 40 ms und 60 ms), zwei Streufaktoren ($S = 0$ und 1).

Als Stimulus dienen sechs Rauschpulse.

- **RS_{1I}**: Eine Verzögerungszeit ($\Delta T = 20$ ms), zwei Streufaktoren ($S = 0$ und $S = 1$).

Als Stimulus fungieren sechs Rauschpulse.

- $RS_{II, einbl}$: Eine Verzögerungszeit ($\Delta T = 20$ ms), zwei Streufaktoren ($S = 0$ und $S = 1$).

Der Stimulus wird verlängert zu acht Rauschpulsen mit einer Einblendung über zwei Sekunden (schematisch gezeigt in Abbildung 3.9), so dass die letzten beiden Pulse bei voller Lautstärke wiedergegeben werden.

Insgesamt ergeben sich dadurch $(2 \times 3) MS_{II} + 2 MS_{2I} + 2 RS_{II} + 2 RS_{II, einbl} = 12$ Testkonditionen/Tracks.

3.4 Ergebnisse und Auswertung

Im Rahmen der Auswertung der erhaltenen Daten erfolgt zuerst eine Mittelung und Visualisierung der erhaltenen Schwellen. Zur Kontrolle, ob zusätzlich zu einer Mittelung über Probandinnen und Probanden sowie Wiederholungen auch eine Normalisierung (pro Person) zielführend ist, wird diese im Folgenden zusätzlich evaluiert. Die im Verlauf dieses Hörversuches erlangten Erkenntnisse können in die folgenden Teilbereiche gegliedert werden.

3.4.1 Vergleich der Echoschwelle diskreter und diffuser Reflexionen

Abhängig von Testaufbau und gewählten Paradigmen zeigen sich in der Literatur diverse Erkenntnisse, ob und inwiefern sich die Ausbildung des Präzedenzeffektes zwischen diffuser und diskreter Reflexion unterscheidet (vgl. Abschnitt 1.3). In diesem Abschnitt werden die innerhalb dieses Versuches gefundenen Unterschiede dargelegt.

Normalisierung Eine Normalisierung analog zu Kapitel 2 nach Gleichung 2.1 wird vorgenommen. Die Normalisierung der Daten verkleinert die Konfidenzintervalle geringfügig und soll, um mit den vorangegangenen Versuchen konsistente Ergebnisse zu erreichen, beibehalten werden.

Schwellenverlauf, frontal zu lateral Es besteht, äquivalent zum Kapitel 2, ein indirekt proportionaler Zusammenhang zwischen der Verzögerungszeit und der Echoschwelle (vgl. Abbildung 3.10). Die Unterschiede zwischen den längeren Verzögerungszeiten 40 ms und 60 ms fallen ebenso gering aus. Die Steigung der Schwellen flacht zu höheren Verzögerungszeiten hin immer stärker ab. Ein möglicher Grund dafür kann der insgesamt niedrige Wiedergabepegel aller Stimuli sein. Bei einem Reflexionspegel von -37 dB_{relativ} und einem Äquivalentpegel des Direktschalls von 54 dB(A)_{eq} ergibt sich ein Dauerschallpegel von nur 17 dB(A)_{eq} für den Reflexionsstimulus. Zieht man jedoch

den Pegel des durchgängigen weißen Rauschsignals mit $68 \text{ dB(A)}_{\text{eq}}$ in Betracht, wird klar, dass der Absolut-Pegel der Rauschimpulse, ohne zeitliche Bewertung, im Mittel bis zu 14 dB lauter als $17 \text{ dB(A)}_{\text{eq}}$ ist und dadurch isoliert zumindest deutlich hörbar ist. Die Echschwelle scheint aber bei einer gewissen Verzögerungszeit $\Delta T \leq 60 \text{ ms}$ in Sättigung zu gehen. Diese Beobachtung deckt sich mit den Erkenntnissen anderer Forschungsarbeiten (vgl. beispielsweise [Bla74]).

Die Echschwelle lateraler Stimuli ist etwas niedriger als bei frontaler Einfallsrichtung. Eine Überprüfung mittels ANOVA mit Zusammenfassung der Wiederholungen ergibt jedoch keine Signifikanz für diesen Parameter ($p = 0,08$). Als weitere Auffälligkeit zeigt sich die große Unsicherheit in der Bewertung der kürzeren Verzögerungszeit 20 ms , bei frontal dargebotenen Stimuli. Die Konfidenzintervalle fallen mit $10 - 13 \text{ dB}$, bis zu fünf mal so groß aus, verglichen mit längeren Zeiten und sind zumindest doppelt so groß, wie die Intervalle lateraler Stimuli. Auch dieser Beobachtung deckt sich mit den Versuchen aus Abschnitt 2 und bestätigt das stark individuelle Echokriterium für kleine Verzögerungszeiten ΔT und geringe räumliche Trennung $\Delta\varphi$.

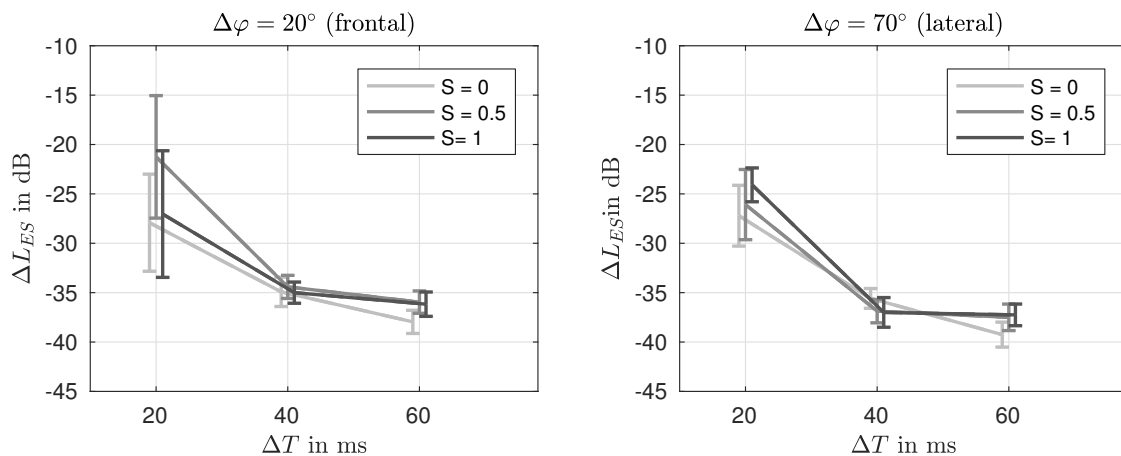


Abbildung 3.10: Direkt eingestellte, mittlere Echschwelle und zugehörige 95%-Konfidenzintervalle, relativ zur nominellen Verzögerungszeit ΔT_{nom} . Mittelung über alle Versuchspersonen und Wiederholungen.

Diskret zu diffus Der Vergleich der Echschwelle verschiedener Streufaktoren zeigt überlappende Konfidenzintervalle und auch eine durchgeführte ANOVA des Streufaktors (Wiederholungen zusammengefasst) lässt keine signifikanten Unterschiede erkennen ($p > 0,08$). Die diskrete Reflexion erzeugt tendenziell etwas geringere Echschwelle. Für die kurze Verzögerungszeit (20 ms) hingegen, unterscheidet sich die teildiffuse Reflexion stärker von den anderen beiden Fällen, wobei hier generell größere Konfidenzintervalle und damit auch Unsicherheiten sichtbar werden.

$\Delta T = 20 \text{ ms}$				$\Delta T = 40 \text{ ms}$				$\Delta T = 60 \text{ ms}$			
S	0	0,5	1	S	0	0,5	1	S	0	0,5	1
0	\	-0,29	-0,14	0	\	0,13	0,23	0	\	-0,77	-0,76
0,5	0,08	\	0,13	0,5	0,52	\	0,15	0,5	0,003	\	-0,01
1	0,35	0,43	\	1	0,24	0,58	\	1	0,001	0,97	\

Tabelle 3.2: p-Werte (untere Dreiecksmatrix) und *Cohens d* (obere Dreiecksmatrix) der Streuung S , je Verzögerungszeit ΔT .

Eine ANOVA des Streufaktors S für die nach Reflexionsrichtung getrennt zusammengefassten Daten ergibt für $\Delta\varphi = 20^\circ$ keine Signifikanz ($p = 0,08$) und auch für die Richtung $\Delta\varphi = 70^\circ$ ergibt sich kein signifikanter Unterschied ($p = 0,28$). Da je nach Verzögerungszeit sehr unterschiedliche Konfidenzintervalle vorliegen, soll eine ANOVA auch abhängig von der Zeit untersucht werden. In Tabelle 3.4.1 sind die entsprechenden p-Werte für den Vergleich der verschiedenen Streufaktoren, aufgeteilt nach der Verzögerungszeit ΔT abgebildet. Ausschließlich für die längste Verzögerungszeit $\Delta T = 60 \text{ ms}$ zeigt sich ein signifikanter Unterschied zwischen den Gruppen $S = 0$ und $S = 0,5$ bzw. $S = 1$. Für alle anderen Verzögerungszeiten ΔT ist der Streufaktor kein signifikanter Parameter.

Effektstärke Da sich für die Diffusion (Streu­faktor S) unterschiedliche Ergebnisse bezüglich der Signifikanz ergeben, soll deren Effektstärke im Folgenden untersucht werden. Die unterschiedlichen Konfidenzintervalle je nach Verzögerungszeit legen nahe, dass eine Analyse der Effektstärke abhängig von diesem Parameter sinnvoll ist. *Cohens d*, gegliedert nach Verzögerungszeit, ist in Tabelle 3.4.1 dargestellt. Die ermittelten Effektgrößen befinden sich in einem Bereich von sehr klein bis mittel. Die einzige Ausnahme stellt die direkt eingestellten Echoschwelle bei 60 ms dar. Hier existieren *Cohens d* $\geq 0,5$, die einer mittleren bis starken Effektstärke entsprechen. Man kann also folgern: Erst bei einer zeitlich isoliert stehenden Reflexion, macht die Aufweitung derselben einen bedeutsamen Unterschied aus.

Verzögerungszeit Sind Reflexion und Direktschall aufgrund von spektraler oder zeitlicher Veränderung nicht identisch, hervorgerufen beispielsweise durch Diffusion, möglich, ergeben sich verschiedene Möglichkeiten der Zeitmessung. Die *nominelle Verzögerungszeit* ΔT_{nom} , die beim Entwurf des Versuchsmodells verwendet wurde, ist die intuitive Wahl die Verzögerungszeit zu messen. In der Literatur finden aber auch die zwei folgenden Konzepte der Zeitmessung Verwendung: Die **Schwer­punktszeit** ΔT_{SP} , die bis zum Erreichen des Energieschwerpunktes der Reflexionsimpulsantwort gemessen wird (dargestellt in Tabelle 3.3) und die **Onset-Zeit** ΔT_{ON} . Die *Onset-Zeit* ΔT_{ON} (dargestellt in Tabelle 3.3) ist gemessen bis zum *Onset*, dem ersten Zeitpunkt der

		ΔT_{nom}	ΔT_{SP}	ΔT_{ON}
s = 0	$\Delta\varphi = 20^\circ$	[20; 40; 60] ms	[20; 40; 60] ms	[20; 40; 60] ms
	$\Delta\varphi = 70^\circ$	[20; 40; 60] ms	[20; 40; 60] ms	[20; 40; 60] ms
s = 0,5	$\Delta\varphi = 20^\circ$	[20; 40; 60] ms	[20; 50; 71] ms	[12; 39; 58] ms
	$\Delta\varphi = 70^\circ$	[20; 40; 60] ms	[22; 47; 73] ms	[15; 34; 57] ms
s = 1	$\Delta\varphi = 20^\circ$	[20; 40; 60] ms	[20; 45; 66] ms	[12; 39; 58] ms
	$\Delta\varphi = 70^\circ$	[20; 40; 60] ms	[21; 43; 66] ms	[15; 34; 57] ms

Tabelle 3.3: Verschiedene Bezugszeiten der Stimuli je Reflexionsrichtung und Streufaktor S.

Reflexionsimpulsantwort, der nicht null ist. Für diskrete Reflexionen, mit der Impulsantwort eines verschobenen Dirac-Impulses, entspricht die nominelle Verzögerung der Schwerpunktszeit. Die nominelle Verzögerungszeit ΔT_{nom} , die beim Entwurf des Modells verwendet wurde, ist bei der diffusen und diskreten Reflexion identisch. Welche der drei Zeitdifferenzen zwischen Direktschall und Reflexion ΔT_{nom} , ΔT_{ON} oder ΔT_{SP} (vgl. Abschnitt 1.3.1) im Weiteren Verwendung findet, wird in diesem Abschnitt untersucht.

Robinson verwendete in [RWFB13] den Energieschwerpunkt als Referenzzeitpunkt für diffuse Reflexionen. Wendt fand in [WH18] weitere Anhaltspunkte, die für dieses Vorgehen sprechen. Die untersuchten Echoschwellen in [WH18] lieferten für verschiedene Streufaktoren ΔS unterschiedliche Ergebnisse. Eine Verschiebung der Reflexionen relativ zu ihren Schwerpunktszeiten ΔT_{SP} erzeugte übereinstimmende Schwellen.

Die Abbildungen 3.10, 3.11 und 3.12 enthalten zum Vergleich die Echoschwellen verschiedener Streufaktoren S , abhängig von den Verzögerungszeiten ΔT . In Abbildung 3.11 wird die Schwerpunktszeit der Stimuli und in Abbildung 3.12 die *Onset*-Zeit verwendet. Für die Schwerpunktszeit zeigt sich ein paralleler Verlauf der Echoschwellen für verschiedene Streufaktoren (vgl. 3.11). Für die *Onset*-Zeit ergibt sich eine nicht erklär-bare Überkreuzung der Schwellenverläufe unterschiedlicher Streufaktoren (vgl. 3.12). Das indiziert die Eignung der Schwerpunktszeit als wirksame Zeitdifferenz zur Messung der Echoschwelle. Vergleicht man jedoch die beim Versuchsdesign verwendete nominelle Verzögerungszeit in Abbildung 3.10, zeigt sich kein Grund von dieser abzuweichen. Ein Vergleich mit [WH18] ergibt sogar eine gute Übereinstimmung der Echoschwellen bei 20 ms von im Mittel circa -26 dB. Für kleine Verzögerungen $\Delta T < 40$ ms ist die Schwerpunktszeit ΔT_{SP} zudem nahezu identisch mit der nominellen Verzögerungszeit ΔT_{nom} (vgl. auch 3.3). Für größere Verzögerungszeiten $\Delta T \geq 40$ ms, besteht zwar ein Unterschied zwischen den Zeitbezügen, aber insgesamt ist der Verlauf der Echoschwelle dort bereits so flach, dass sich keine großen Differenzen durch die Zeitmessung ergeben. Robinson untersuchte in [RWFB13], ob statt dem Energieschwerpunkt und dem tatsächlichen *Onset* eher ein hörbarer *Onset* relevant sei. Diesen Zeitpunkt definier-

te er dabei abhängig von der Energieverteilung und der zeitlichen Kompaktheit der Reflexionsimpulsantwort. Diese These lässt sich anhand der Datenlage nicht beweisen, widerspricht dem verwendeten Zeitbezug aber nicht. Der hörbare *Onset* wäre für kleine Verzögerungen ΔT in diesem Fall identisch mit der Schwerpunktszeit ΔT_{SP} und der nominellen Verzögerung ΔT_{nom} .

Die verwendete Modellierung einer diffusen Reflexion durch eine raue Oberfläche, mit den hier verwendeten Parametern, bringt den Vorteil der Übereinstimmung von ΔT_{nom} und ΔT_{SP} mit sich. Im Weiteren wird die nominelle Verzögerung ΔT_{nom} als Bezugszeit ΔT verwendet.

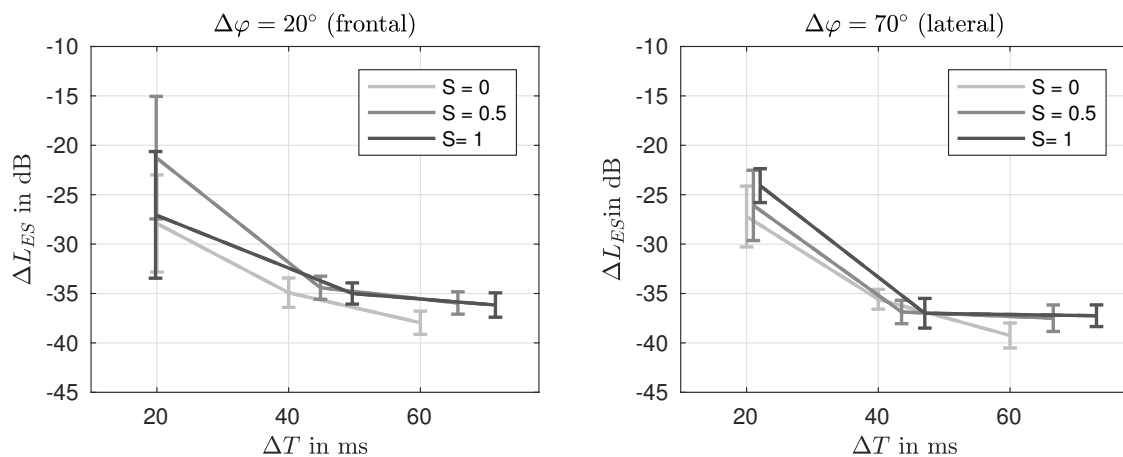


Abbildung 3.11: Direkt eingestellte, mittlere Echschwelle und 95%-Konfidenzintervalle, zeitlich verschoben bezüglich ΔT_{SP} . Mittelung über alle Versuchspersonen und Wiederholungen.

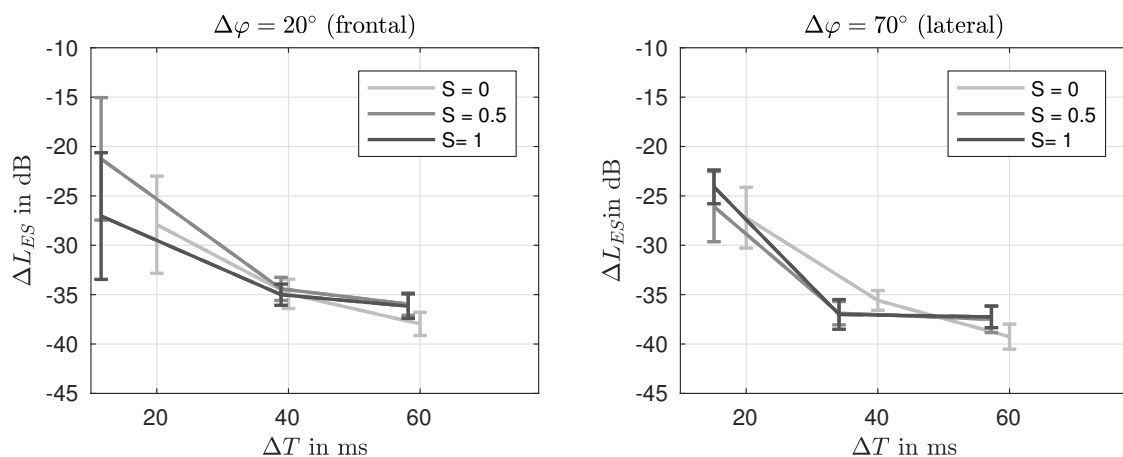


Abbildung 3.12: Direkt eingestellte, mittlere Echschwelle und 95%-Konfidenzintervalle, zeitlich verschoben bezüglich ΔT_{ON} . Mittelung über alle Versuchspersonen und Wiederholungen.

3.4.2 Verschiedene Schwellen und Testverfahren

3.4.2.1 Maskierschwelle

Die Echoschwelle ΔL_{ES} als eine von der Zeit ΔT abhängige Schwelle konnte in Abschnitt 3.4.1 bereits bestimmt werden. Im Adaptive-Forced-Choice-Verfahren (AFC) sollten weitere Schwellen untersucht werden. Zunächst ergab sich aus dem MS_{1I} -Testszenario (vgl. Abschnitt 3.2) die Maskierschwelle ΔL_{MS} , ebenfalls abhängig von der Verzögerungszeit ΔT . Die erhaltenen Ergebnisse aller Versuchspersonen werden wiederum einer Mittelung und Normalisierung nach Gleichung 2.1 unterzogen (vgl. Abbildung 3.13). Durch die Normalisierung verkleinern sich die Konfidenzintervalle beträchtlich von vorher 6 dB - 13 dB auf nachher 3 dB - 8 dB.

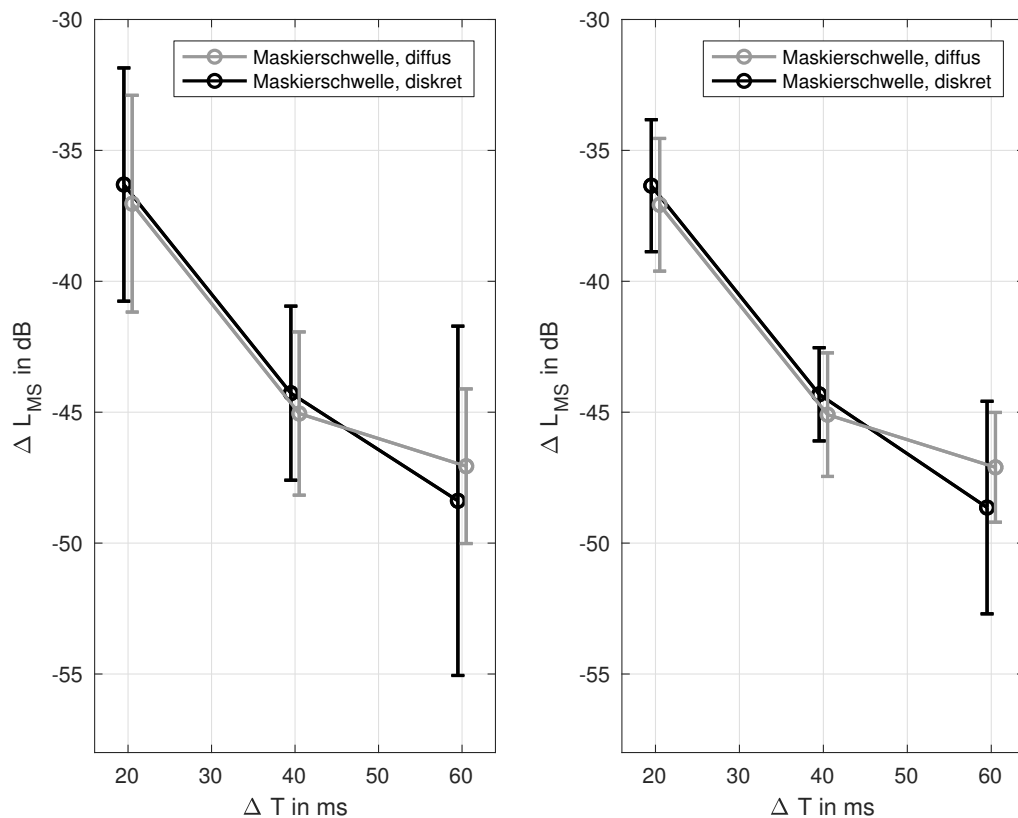


Abbildung 3.13: Normalisierte Maskierschwelle (diffus in grau, diskret in schwarz), nicht normalisiert (links) und normalisiert (rechts).

Durch Messung der Maskierschwelle, kann wiederum überprüft werden, ob ein Unterschied zwischen diskreter und diffuser Reflexion besteht. Eine erste ANOVA der Testkonditionen MS_{1I} , MS_{2I} und RS_{1I} und des Streufaktors S ergibt keine Signifikanz dieser beiden Gruppierungen ($p > 0,5$ in beiden Fällen). Eine ANOVA der *gepölt*

zusammengefassten Daten der genannten Testkonditionen ergibt für den Parameter Diffusion (Streufaktor S) einen p -Wert von 0,61. Die Unterschiede durch den Streufaktor sind dadurch nicht signifikant und ein weiterer Aspekt der Datenauswertung, *Cohens d*, bestätigt die geringen Effektstärken der Diffusion (siehe Tabelle 3.4).

Verzögerung:	20 ms	40 ms	60 ms
Maskierschwelle AFC	0,219	0,161	-0,162
	klein – mittel	sehr klein – klein	sehr klein – klein

Tabelle 3.4: *Cohens d* des Streukoeffizients S (für gepaarte Variablen) der Maskierschwelle nach Verzögerungszeit

3.4.2.2 Maskierschwelle im Vergleich zur Echoschwelle

Die Maskierschwelle im Vergleich mit der Echoschwelle ist in Abbildung 3.14 dargestellt. Im Mittel unterscheiden sich die beiden Schwellen um 9 dB. Die zeitliche Abhängigkeit der Maskierschwelle entspricht dem Prinzip der indirekten Proportionalität bei der Echoschwelle. Auch die Steigungen der beiden Schwellen ähneln sich mit circa $-0,3\text{dB/ms}$, doch es zeigen sich größere Unterschiede zur Literatur in [WH18] ($-0,5\text{dB/ms}$ bis $-1,0\text{dB/ms}$). Diese Beobachtung begründet sich durch den größeren Wertebereich der Zeitverzögerungen in diesem Hörversuch und dem bereits beschriebenen Abflachen der Schwellen zu höheren Verzögerungszeiten. Beschränkt man den beobachteten Wertebereich auf die ersten 40 ms, ergeben sich $-0,7\text{dB/ms}$ für die Echoschwelle (diffus) und $-0,4\text{dB/ms}$ (diskret). Für die Maskierschwelle bleibt die Steigung jedoch vergleichsweise moderat $-0,4\text{dB/ms}$ (diffus sowie diskret). Generell ist ein stark abflachender Verlauf beider Schwellen oberhalb von 40 ms ersichtlich. Abbildung 3.14 zeigt das sich ähnelnde Verhalten der diffusen ($S = 1$) und der diskreten Reflexion ($S = 0$) bei Echoschwelle und Maskierschwelle. Interessant ist dabei die stärkere Krümmung beider Schwellen für diffuse Reflexionen. Auffällig ist außerdem das vergrößerte Konfidenzintervall der Maskierschwelle der diskreten Reflexion bei 60 ms. Da es sich zugleich um den niedrigsten Pegelwert handelt, ist ein Zusammenhang mit der Mithörschwelle der Versuchspersonen und eine Bewertung ähnlich zu Abschnitt 3.4.1 möglich. Insgesamt sind die Konfidenzintervalle der Echoschwelle kleiner als die der Maskierschwelle. Das ist insofern erwartbar, als für die Echoschwelle durch die Wiederholung doppelt so viele Daten zur Verfügung stehen. Dadurch wird aber das vergrößerte Konfidenzintervall der Echoschwelle bei 20 ms auffällig. Versuchspersonen berichteten dabei unabhängig voneinander, große Schwierigkeiten zu haben, bei kurzen Verzögerungen ein wahrnehmbares Echo einzustellen.

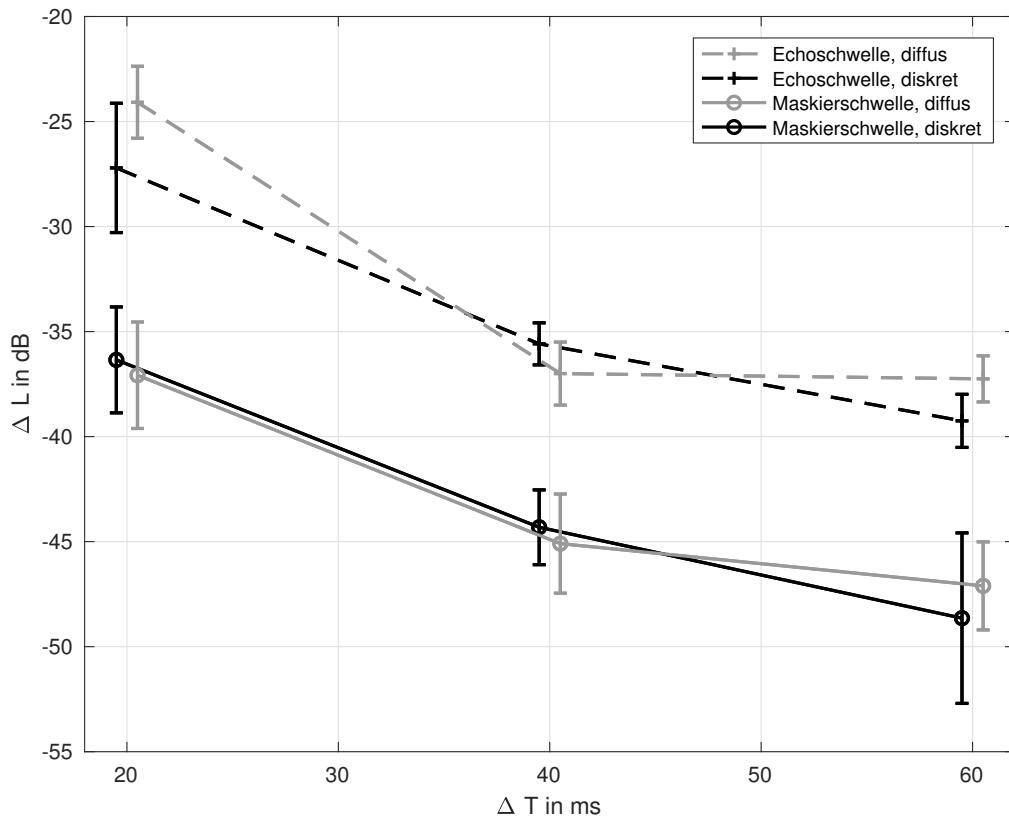


Abbildung 3.14: Normalisierte gemittelte Maskierschwelle und Echoschwelle (jeweils diffus und diskret), relativ zur Verzögerungszeit.

3.4.2.3 Richtungsunterscheidung ohne Einblendung (RS_{1I})

Als weitere Schwelle sollte die Richtungsunterscheidbarkeit mittels der RS_{1I} -Fragestellung (vgl. Abschnitt 3.2) untersucht werden. Der untersuchte Messbereich ist dem Aufbrechen der Lokalisationsdominanz gleichzusetzen, da die wahrgenommene Richtung gerade nicht mehr ausschließlich der Direktschallrichtung entspricht. Laut Litovsky et al. [LSC01] muss diese Schwelle nicht zwangsläufig mit der Maskierschwelle übereinstimmen, da sich die Kriterien für diese unterscheiden können. Die erzielten Ergebnisse sind in Abbildung 3.15 zu sehen. Die Richtungsabfrage ohne Einblendung (RS_{1I} , hellgrau) ergibt in diesem Fall tatsächlich ähnliche Werte wie die verschiedenen Hörbarkeitsparadigmen der Maskierschwelle. Die Richtungsunterscheidungsschwelle liegt bei im Mittel $\Delta L = -36,9$ dB (diskret) und $\Delta L = -35,8$ dB (diffus). Im Vergleich zu den Maskierschwellen bei $-36,3$ dB (diskret) und $-37,1$ dB (diffus) muss die Abweichung, mit maximal 1,3 dB, als sehr gering bezeichnet werden. Eine ANOVA der beiden Maskierschwellen (MS_{1I} und MS_{2I}) und der Richtungsunterscheidung (RS_{1I}) bestätigt, dass die Testkonditionen nicht signifikant unterschiedlich sind ($p = 0,54$). Kleinere Konfiden-

zintervalle bei der Richtungsunterscheidung zeugen zudem von einem präziseren Entscheidungskriterium, verglichen mit einem einfachen Einzelintervall-Paradigma (MS_{1I}). Durchaus noch präziser, aber mit vergleichbaren Mittelwerten, ist das Zweiintervall-Paradigma (MS_{2I}) einzuordnen. Interessanterweise ist der Einfluss der Diffusion auf die Richtungsunterscheidung und das Zweiintervall-Paradigma genau entgegengesetzt. Während eine diffuse Reflexion gegen eine Referenz (MS_{2I}) leichter hörbar wird (im Mittel $-1,5$ dB), ist der Ort der selben diffusen Reflexion tendenziell schwerer erkennbar (im Mittel $+1$ dB). Zieht man die räumliche Verteilung der diffusen Reflexion in Betracht, ist eine weniger eindeutige Reflexionsrichtung absolut nachvollziehbar. Es ist jedenfalls folgerichtig, die Richtungsunterscheidungsschwelle, zumindest im diskreten Fall und mit den hier verwendeten Parametern, der Maskierschwelle gleichzusetzen. Dieser Zusammenhang soll im Abschnitt 3.4.3 näher diskutiert werden.

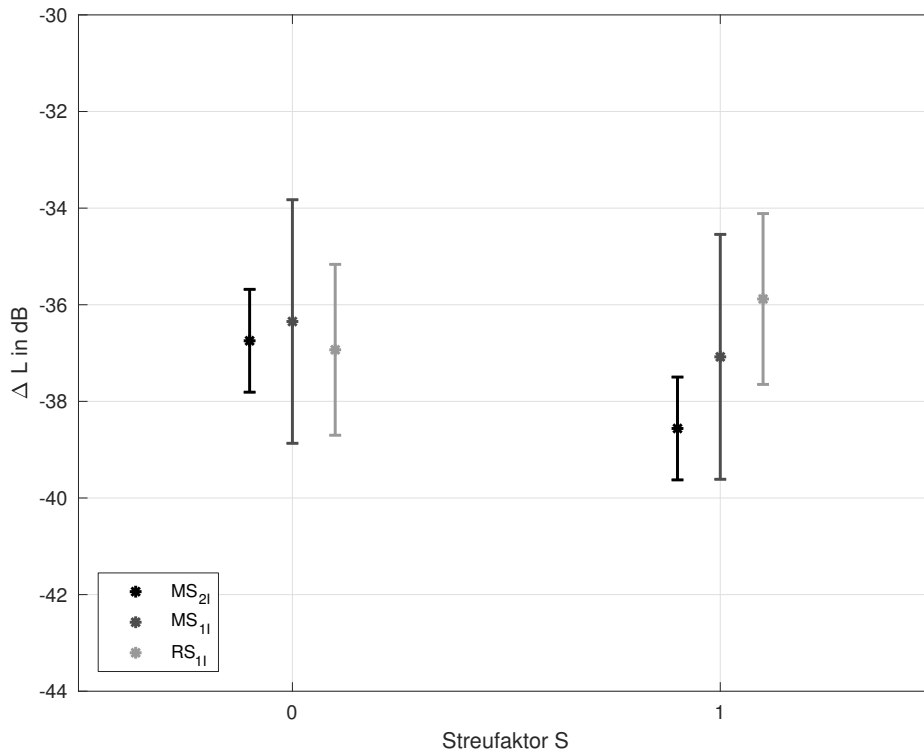


Abbildung 3.15: Normalisierte Wahrnehmbarkeitsschwellen nach Testparadigma und Streufaktor S , als Mittelwerte und zugehörige 95% Konfidenzintervalle.

3.4.2.4 Richtungsunterscheidung mit Einblendung ($RS_{1I, einbl}$)

Die Wahrnehmbarkeitsschwelle der Richtungsabfrage mit Einblendung der Stimuli (schwarz, Abbildung 3.16) beträgt $-29,1$ dB (diskret), beziehungsweise $-21,7$ dB (diffus) und ist signifikant unterschiedlich von den zuvor bestimmten Maskierschwellen ($p \ll 0,01$). Sie unterscheidet sich damit, bei bis auf die Einblendung

identischen Testparametern, am deutlichsten von allen anderen Testkonditionen der Maskierschwelle und entspricht eher der zuvor bestimmten Echschwelle. Die größte konzeptionelle Ähnlichkeit der beiden Schwellen besteht dabei in der Einblendung über zwei Sekunden zu Beginn der Stimuluspräsentation. Das Einblenden unterstützt offenbar die Ausbildung des Präzedenzeffektes (*Buildup*) und erschwert dadurch die Hörbarkeit einer Reflexion. Auffällig ist, dass die Auswirkung des *Buildup*-Effektes für diskrete Reflexionen mit im Mittel 7,8 dB viel kleiner ist, als im diffusen Fall (14,1 dB). Ein weiterer großer Unterschied durch die Einblendung der Stimuli ist die Differenz zwischen diskreter und diffuser Reflexion. Auch die Konfidenzintervalle zeigen sich im Vergleich etwas vergrößert. Dieses Testparadigma beinhaltet zudem als einziges einen offensichtlich signifikanten Unterschied durch eine Variation der Streufaktoren ($p = 0,013$). Es ist dabei die diffuse Reflexion, die eine höhere Wahrnehmbarkeitsschwelle erzielt, erklärbar durch eine weniger eindeutige Richtung, da die Diffusion mit räumlicher Aufweitung einhergeht. *Cohens d* = 0,86 zeigt ebenso eine große Effektstärke an.

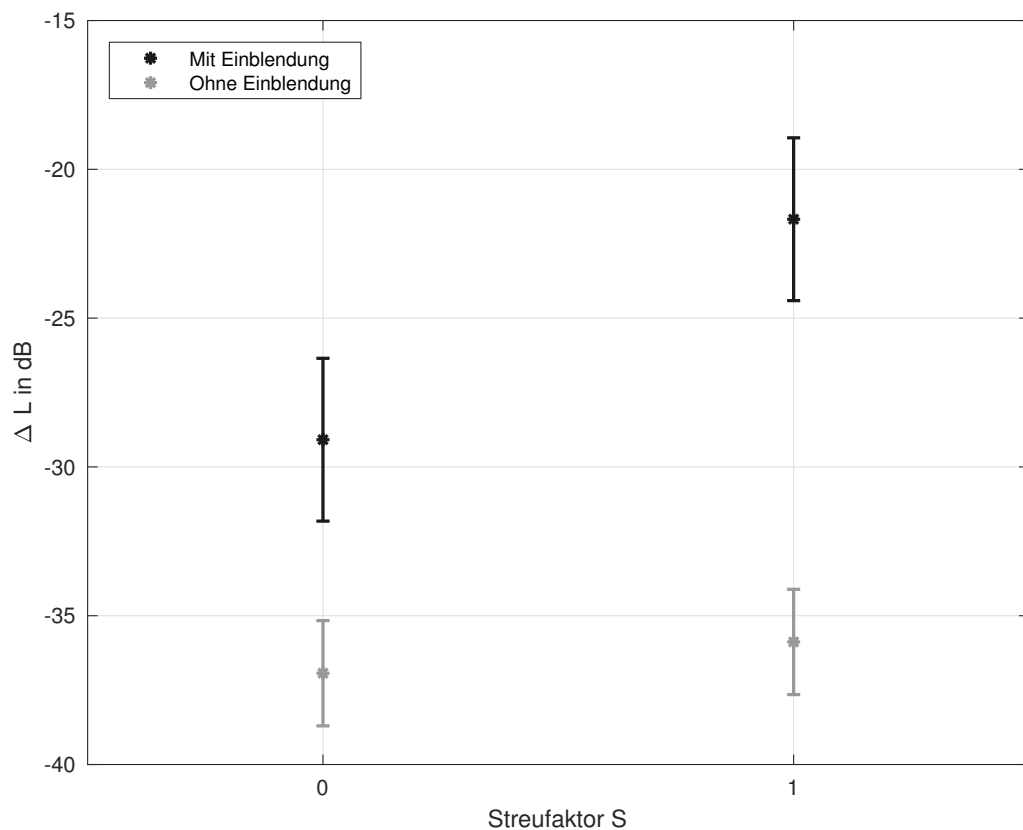


Abbildung 3.16: Normalisierte Wahrnehmbarkeitsschwelle für Richtungsunterscheidung mit Einblendung (schwarz) und ohne Einblendung (grau).

3.4.3 Vergleich von Maskierschwellen verschiedener Verfahren

Die bisherigen Versuchsergebnisse der Maskierschwelle geben Grund zur Annahme, dass die Schwelle mittels verschiedener Testkonditionen bestimmt werden kann. Abbildung 3.2 bestätigt diese Überlegung und Abbildung 3.17 zeigt die übrigen Testparadigmen im Vergleich. Die Präsentation des zweiten Intervalls in der MS_{2I} -Testkondition führt zu dem in Abschnitt 3.2 erwarteten Ergebnis einer etwas niedrigeren Schwelle und erhöhter Konsistenz (kleinere Konfidenzintervalle). Für diffuse Reflexionen beträgt der Unterschied der Mittelwerte des MS_{2I} -Testparadigmas und der Richtungsunterscheidungsfrage (RS_{II}) zumindest im Mittel 2,5 dB, eine ANOVA ($p = 0,30$) lässt aber auch hier keine Signifikanz der Unterschiede erkennen. Interessant ist ein Vergleich der diffusen und diskreten Reflexion, in diesem Fall der die erschwerte Richtungs-differenzierung der diffusen Reflexion zeigt. Um die Signifikanz dieser Tendenzen zu testen, wird eine weitere Varianzanalyse durchgeführt und ergibt $p = 0,10$ für den Vergleich der Testparadigmen MS_{2I} und RS_{II} der diffusen Reflexion. Es besteht also auch hier kein signifikanter Unterschied. Das gleiche gilt bei diesem Vergleich für eine diskreten Reflexion ($p = 0,84$). Da zur Erkennung der Maskierschwelle kein vorgegebenes Kriterium besteht, konnte dieser Parameter frei gewählt werden. Das legt den Schluss nahe, dass das bewertete Kriterium der Maskierschwelle der Richtungseindruck ist.

Die Maskierschwelle ist für die hier gewählten Konditionen also tatsächlich mittels drei verschiedener Testparadigmen bestimmbar und ist nicht signifikant unterschiedlich für diffuse und diskrete Reflexionen.

3.5 Diskussion und Zusammenfassung

Insgesamt konnten in diesem Hörversuch drei verschiedene Schwellen durch mehrere unterschiedliche Paradigmen getestet werden. Anhand der Herstellungsmethode, konnte die Echschwelle für zwei Einfallswinkel, drei Verzögerungszeiten und drei Streufaktoren bestimmt werden. Die Verzögerungszeit ist als signifikanter Parameter bestätigt ($p = 0$), jedoch ergeben sich nur zwei relevante Gruppen $\Delta T = 20\text{ms}$ und $\Delta T = [40\text{ms}; 60\text{ms}]$. Die Echschwelle ΔL_{ES} flacht oberhalb von $\Delta T = 40\text{ms}$ bereits stark ab. Der Einfallswinkel und der Streufaktor erweisen sich als nicht signifikant (beide $p > 0,08$). Die Effektstärke des Streufaktors zeigt mit Cohens's d - Werten von 0,14 (für $\Delta T = 20\text{ms}$) bis 0,76 (für $\Delta T = 60\text{ms}$), dass der Effekt höchstens für große Verzögerungszeiten relevante *mittlere* Stärken erreichen kann, sonst aber gering ist.

Mittels eines adaptiven Forced-Choice-Verfahrens und verschiedener Testparadigmen wurde die Maskierschwelle bestimmt. Die Maskierschwelle ΔL_{MS} , ermittelt durch ein MS_{II} -Testverfahren, liegt im Mittel 9dB unterhalb der Echschwelle und zeigt einen

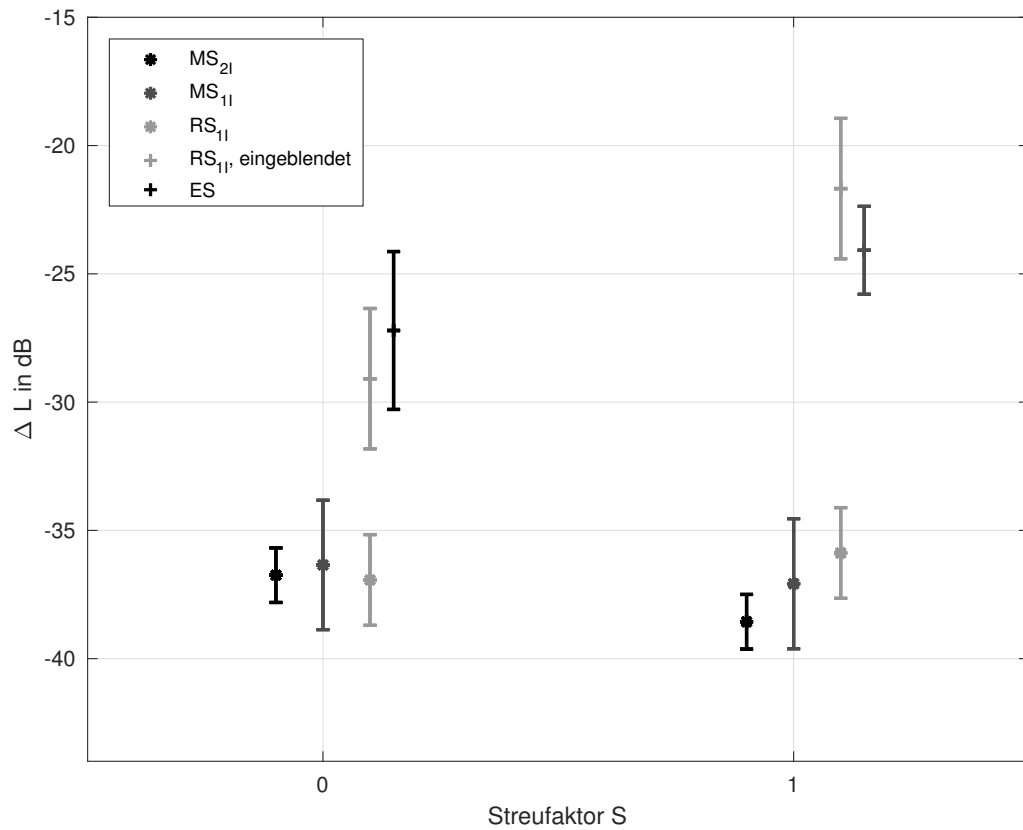


Abbildung 3.17: Normalisierte Schwellen je Streufaktor S .

ähnlichen zeitlichen Verlauf wie diese. Der Streufaktor dieser ist ebenfalls nicht signifikant ($p = 0,46$). Auch die Effektstärken für verschiedene Verzögerungszeiten ΔT sind durchwegs *sehr klein* bis *mittel* ($Cohens\ d = [0,22; 0,16; -0,16]$). Ein MS_{2I} -Paradigma ergibt die gleiche Maskierschwelle und ermöglicht zusätzlich kleinere Konfidenzintervalle. Ein zweites Intervall als Referenz erleichtert den Versuchspersonen das präzise Erkennen einer Reflexion, verändert aber nicht den Pegel, ab dem diese hörbar wird. Im Mittel ist eine diffuse Reflexion um 1,5dB leichter zu hören, als eine diskrete, dieser Unterschied ist aber nicht signifikant ($p = 0,09$). $Cohens\ d$ beträgt $d = 0,54$ und bestätigt eine *mittlere* Effektstärke.

Die Richtungsunterscheidungsschwelle (RS_{1I}) entspricht für die hier gewählten Konditionen (Reflexion aus $\varphi = 70^\circ$ und Direktschall frontal bei $\varphi = 0^\circ$) der Maskierschwelle und erreicht ähnliche Konfidenzintervalle wie das einfache Hörbarkeitsparadigma (MS_{1I}). Die diffuse Reflexion erzielt hierbei tendenziell höhere Richtungsunterscheidungsschwellen, jedoch keinen signifikanten Unterschied zur diskreten Reflexion ($p = 0,52$). Eine mögliche Erklärung für die höhere Schwelle liegt darin, dass eine diffuse Reflexion durch räumliche Aufweitung einen weniger eindeutigen Richtungsein-

druck bewirkt.

Eine Erweiterung des Richtungsunterscheidungsparadigmas um eine lineare Einblendung der Lautstärke zu Beginn jedes Trials erzeugt höhere Schwellenwerte. Diese Differenz lässt sich durch den *Buildup*-Effekt erklären. Für die diskrete Reflexion erhöht sich die Schwelle dabei um 7,8dB und für die diffuse Reflexion sogar um 14,1dB im Vergleich zur Fragestellung ohne Einblendung. Diese Testkondition ist damit die einzige, anhand derer ein signifikanter Unterschied zwischen diffuser und diskreter Reflexion entsteht ($p = 0,013$). Zugleich beweist dieses Ergebnis die unterschiedliche Wirkung des *Buildups* auf verschiedene Signale. Diese Beobachtung deckt sich möglicherweise auch mit Litovskys These der unterschiedlichen Wirkmechanismen des *Buildups* bei Fusion und Diskriminationsunterdrückung. Die gute Übereinstimmung der Richtungsunterscheidungsschwelle mit Einblendung ($RS_{II,embl}$) mit der vorher bestimmten Echoschwelle ist besonders auffällig. Die große Veränderung der Richtungsunterscheidungsschwelle durch das lineare Einblenden der Lautstärke, zeigt wie wichtig die zeitliche Entwicklung des Präzedenzeffektes und dessen Betrachtung als dynamisches Phänomen ist.

Kapitel 4

Conclusio

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Hörversuche zum Präzedenzeffekt, bestehend aus jeweils zwei Experimenten, durchgeführt und ausgewertet. Das erste Experiment untersuchte den Einfluss von Pegel ΔL , Verzögerungszeit ΔT und Reflexionswinkel $\Delta\varphi$ auf die Echschwelle und definierte sinnvolle Wertebereiche dieser Parameter. Durch die Herstellungsmethode konnten Versuchspersonen die individuelle Echschwelle bestimmen. Dazu wurden die Versuchspersonen gebeten, den Reflexionspegel so einzustellen, dass gerade zwei Hörereignisse wahrnehmbar sind. Die erhaltenen Daten wurden einer Normalisierung unterzogen und alle untersuchten Parameter sind signifikant, haben aber unterschiedliche Sensitivität. Der Reflexionswinkel $\Delta\varphi$ weist keinen monotonen Zusammenhang mit den anderen Parametern auf, die Verzögerungszeit ΔT hingegen ist indirekt proportional zum Reflexionspegel ΔL . Die Veränderung der Einfallsrichtung $\Delta\varphi$ der Reflexion ist nur für Verzögerungszeiten $\Delta T \geq 40$ ms signifikant. Die Erkenntnisse von Kurz [Kur18], bezüglich der Vernachlässigbarkeit der Einfallsrichtung zur Modellierung des Energievektors für übliche Anwendungsfälle mit $\Delta T \leq 20$ ms, konnten damit bestätigt werden.

Für ein zweites Experiment ergaben sich die folgenden Rahmenbedingungen: Die Echschwelle ΔL_{ES} , wird durch Variation des Pegels ΔL bestimmt und ist abhängig von der vorgegebenen Verzögerungszeit ΔT . Der gewählte Wertebereich für die Verzögerungszeit ΔT liegt zwischen 20 ms und 60 ms. Die erhaltenen Ergebnisse sind stark individuell und wurden für eine schlüssige Auswertung einer Normalisierung unterzogen.

Durch die Variation der Verzögerungszeit, kann auch die Echschwelle ΔT_{ES} , abhängig vom präsentierten Reflexionspegel ermittelt werden. Für vorgegebene Verzögerungszeiten ΔT_{IN} stellte jede Versuchsperson ihre individuelle Echschwelle ΔL_{ES} ein. Für diese eingestellten Pegel von ΔL_{ES} ermittelte dann jede Versuchsperson die zugehörige Echschwelle ΔT_{ES} durch Einstellen der Verzögerungszeit ΔT_{OUT} . Die eingesetzte Verzögerungszeit ΔT_{IN} ist dann mit der reproduzierten Verzögerungszeit $\Delta T_{OUT} =$

ΔT_{ES} idealerweise identisch. Es zeigt sich jedoch ein Abflachen der gemessenen Echoschwellen. Statt der Übereinstimmung der Eingangszeiten ΔT_{IN} mit Ausgangszeiten ΔT_{OUT} des Versuches wird die eingesetzte Zeit ΔT_{IN} durch ΔT_{OUT} nicht mehr erreicht. Eine Erklärung dafür kann die gewachsene Sensibilität für das Auftreten eines Echos im Versuchsverlauf sein. Eine weitere Möglichkeit besteht in einer Veränderung des Kriteriums, das die Versuchspersonen zur Erkennung eines Echos verwendeten.

Die Entwicklung einer kriteriumsfreien Möglichkeit zur Messung des Präzedenzeffektes stand im Fokus des zweiten Hörversuches. Außerdem sollte die Diffusität als weitere wichtige Reflexionseigenschaft untersucht werden. Das Modell zum Entwurf der Impulsantworten diffuser Reflexionen beruht auf dem Lambert-Kosinus. Dieser bestimmt mit welcher Intensität die einzelnen Teilflächen der Wand zur gesamten Impulsantwort beitragen. Durch eine Normalisierung und anschließende energieerhaltende Enkodieren der Teilimpulse in Außenohrübertragungsfunktionen entstehen die räumlich und zeitlich aufgeweiteten Impulsantworten. Der Energieschwerpunkt dieser Reflexionen ähnelt wie bei Robinson der nominellen Verzögerungszeit.

Die Echoschwelle eignet sich nicht zur kriteriumsfreien Bestimmung des Präzedenzeffektes, da ihr Erreichen nicht verifiziert werden kann. Eine gut messbare Alternative stellt die Maskierschwelle dar. Diese wurde mittels eines Two-Alternative-Forced-Choice-Verfahrens bestimmt. Eine Untersuchung der Maskierschwelle für verschiedene Verzögerungszeiten mittels eines Einzelintervallparadigmas erzeugt einen parallel zur Echoschwelle verschobenen Kurvenverlauf. Die Differenz beträgt im Mittel 9 dB.

Durch verschiedene weitere Testparadigmen konnten unterschiedliche Aspekte des Präzedenzeffektes untersucht werden. Ein AFC-Verfahren mit zwei Intervallen und zwei Alternativen ergab die Maskierschwelle mit der geringsten Unsicherheit (95%-Konfidenzintervalle ≤ 2 dB). Das Messparadigma mit nur einem Intervall und die Richtungsunterscheidung ergaben im Mittel vergleichbare Schwellenwerte.

Die Maskierschwelle unterscheidet sich nicht signifikant von der Richtungsunterscheidung für die gewählten Parameter, lateral einfallende Reflexion ($\Delta\varphi = 70^\circ$) und 20 ms Verzögerungszeit. Generell zeigt sich für die drei Messparadigmen (MS_{2I} , MS_{1I} und RS_{1I}) kein signifikanter Unterschied weder für diffuse noch für diskrete Reflexionen.

Die gute Übereinstimmung für diffuse und diskrete Reflexionen bestätigt die Erkenntnis von Wendt [WH18], dass der Energieschwerpunkt mit der nominellen Verzögerungszeit einer diffusen Reflexion gleichzusetzen ist.

Das Richtungsunterscheidungskriterium ($RS_{1I, einbl}$) mit einer Einblendung der Stimuli innerhalb von 2 s zu Beginn jedes Tracks bringt die einzigen signifikanten Unterschiede zwischen diskreten und diffusen Reflexionen hervor. Eine diffuse, räumlich

aufgeweitete, Reflexion erzielt den geringer ausgeprägten Richtungseindruck. Die erzielten Schwellen dieses Testparadigmas unterscheiden sich insgesamt von den übrigen Forced-Choice-Testszenarien und gleichen der mittels Herstellungsmethode und kontinuierlicher Stimuli bestimmten Echoschwelle. Die Einblendung und fortlaufende Darbietung der Stimuli unterstützen den *Buildup*-Effekt und damit die Ausbildung des Präzedenzeffektes.

Eine kriteriumsfreie Reizschwelle zur Quantifizierung des Präzedenzeffektes konnte insofern gefunden werden, als die Maskierschwelle kein vorgegebenes Kriterium erfordert. Die Auswahl eines Kriteriums bleibt der Versuchsperson selbst überlassen und das Erreichen der Schwelle wird durch den Vergleich mit einer Referenz sichergestellt.

Literaturverzeichnis

- [BCW17] C. Becker-Carus and M. Wendt, *Allgemeine Psychologie: Eine Einführung (German Edition)*. Springer, 2017.
- [BD88] J. Blauert and P. Divenyi, “Spectral selectivity in binaural contralateral inhibition,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 66, pp. 267–274, 10 1988.
- [Ber13] B. Bernschütz, “A spherical far field hrir/hrtf compilation of the neumann ku 100,” *Fortschritte der Akustik, Merano, Italy*, 2013.
- [Bla74] J. Blauert, *Räumliches Hören – Monographien der Nachrichtentechnik*. Stuttgart: Hirzel, 1974.
- [BST14] A. Brown, G. C. Stecker, and D. Tollin, “The precedence effect in sound localization,” *Journal of the Association for Research in Otolaryngology : JARO*, vol. 16, 12 2014.
- [Cre48] L. Cremer, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Geometrische Raumakustik*, ser. Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik. S. Hirzel, 1948. [Online]. Available: <https://books.google.de/books?id=c3YZAAAIAAJ>
- [Cre61] —, *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik: Statistische Raumakustik*, ser. Physik und Technik der Gegenwart. Abt. Akustik. S. Hirzel, 1961.
- [CSB12] G. Christopher Stecker and A. D. Brown, “Onset- and offset-specific effects in interaural level difference discrimination,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 132, no. 3, pp. 1573–1580, 2012. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.4740496>
- [EBU] Ebu sqam cd sound quality assessment material recordings for subjective tests, ebu tech 3253. [Online]. Available: <https://tech.ebu.ch/publications/sqamcd>

- [Fra13] M. Frank, “Phantom sources using multiple loudspeakers in the horizontal plane,” Ph.D. dissertation, 2013.
- [Ger92] M. A. Gerzon, “General metatheory of auditory localisation,” in *Audio Engineering Society Convention 92*, Mar 1992. [Online]. Available: <http://www.aes.org/e-lib/browse.cfm?elib=6827>
- [GvdPT17] J. Grosse, S. van de Par, and C. Trahiotis, “Stimulus coherence influences sound-field localization and fusion/segregation of leading and lagging sounds,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, no. 4, pp. 2673–2680, 2017. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1121/1.4980137>
- [Haa] H. Haas, “ü.”
- [HOB06] J. Hartcher-O’Brien and J. Buchholz, *Investigating the build-up of precedence effect using reflection masking*. Acoustical Society of America, 2006, vol. 120, copyright (2006) Acoustical Society of America. This article may be downloaded for personal use only. Any other use requires prior permission of the author and the Acoustical Society of America.
- [KBBW12] M. Kuehner, H. Bubb, K. Bengler, and J. Wild, “Adaptive verfahren in der psychophysik: Effiziente bestimmung von absolut- und unterschiedsschwellen,” *Ergonomie aktuell (ISSN 1616-7627)*, pp. 26–30, 01 2012.
- [KF17] E. Kurz and M. Frank, “Prediction of the listening area based on the energy vector,” 09 2017.
- [Kle01] S. Klein, “Measuring, estimating, and understanding the psychometric function: A commentary,” *Perception & psychophysics*, vol. 63, pp. 1421–55, 11 2001.
- [Kur18] E. Kurz, “Efficient prediction of the listening area for plausible reproduction,” Master’s thesis, Universität für Musik und darstellende Kunst Graz (KUG), 2018.
- [LSC01] R. Litovsky and B. Shinn-Cunningham, “Investigation of the relationship among three common measures of precedence: Fusion, localization dominance, and discrimination suppression,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 109, pp. 346–58, 02 2001.
- [Pau19] V. Pausch, “Die berechnung des konfidenzintervalls für die effektgröße cohen’s d,” *Jahrbuch Musikpsychologie*, vol. 28, 03 2019.

- [Pol15] A. Politis, “Higher order ambisonics library, a compact library for encoding, manipulation and decoding of spatial sound using higher order ambisonics.” 2015. [Online]. Available: <http://research.spa.aalto.fi/projects/ambi-lib/ambi.html>
- [RH86] B. Rakerd and W. M. Hartmann, “Localization of sound in rooms, iii: Onset and duration effects,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 80, no. 6, pp. 1695–1706, 1986.
- [RHH00] B. Rakerd, W. Hartmann, and J. Hsu, “Echo suppression in the horizontal and median sagittal planes,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 107, pp. 1061–4, 03 2000.
- [RWFB13] P. Robinson, A. Walther, C. Faller, and J. Braasch, “Echo thresholds for reflections from acoustically diffusive architectural surfaces,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 134, pp. 2755–2764, 10 2013.
- [Saw09] S. Sawilowsky, “New effect size rules of thumb,” *Journal of Modern Applied Statistical Methods*, vol. 8, pp. 597–599, 11 2009.
- [SBVW16] P. Stitt, S. Bertet, and M. Van Walstijn, “Extended energy vector prediction of ambisonically reproduced image direction at off-center listening positions,” *Journal of the Audio Engineering Society*, vol. 64, pp. 299–310, 05 2016.
- [SCZD93] B. Shinn-Cunningham, P. Zurek, and N. Durlach, “Adjustment and discrimination measurements of the precedence effect,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 93, pp. 2923–32, 06 1993.
- [Ser61] H. Seraphim, “Über die wahrnehmbarkeit mehrerer rückwürfe von sprachschall,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 11, no. 2, 1961.
- [Ser63] H.-P. Seraphim, “Raumakustische nachbildungen mit elektroakustischen hilfsmitteln,” *Acta Acustica united with Acustica*, vol. 13, 01 1963.
- [SLTS12] S. Siltanen, T. Lokki, S. Tervo, and L. Savioja, “Modeling incoherent reflections from rough room surfaces with image sources,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 131, pp. 4606–14, 06 2012.
- [WF18] F. Wendt and M. Frank, “On the localization of auditory objects created by directional sound sources in a virtual room,” in *Tonmeistertagung 2018*, G. Theile, Ed., Köln (Deutschland), 11 2018, procedure: without peer reviewing.

- [WH18] F. Wendt and R. Höldrich, “Reflection properties influencing the precedence effect,” in *44. Jahrestagung für Akustik DAGA*, B. Seeber, Ed., München (Deutschland), 11 2018, procedure: without peer reviewing.
- [WWH19] K. Wegler, F. Wendt, and R. Höldrich, “How level, delay, and spatial separation influence the echo threshold,” in *Forstschritte der Akustik - DAGA 2019*, S. Spors, Ed., Rostock (Deutschland), 04 2019, procedure: without peer reviewing.
- [YG97] X. Yang and D. W. Grantham, “Echo suppression and discrimination suppression aspects of the precedence effect,” *Perception & Psychophysics*, vol. 59, no. 7, pp. 1108–1117, Jan 1997. [Online]. Available: <https://doi.org/10.3758/BF03205525>
- [Zec] E. Zechmann. [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/21384-continuous-sound-and-vibration-analysis>