



Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Institut für Elektronische Musik und Akustik

Bachelorarbeit

zum

Informationsgehalt rechteckiger Platten

Autor: Michael Bernhard Aurenhammer
MatNr. 01473220

Version vom: 18. November 2021

Betreuer: DI BSc Marian Weger
Beurteiler: O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich

Danksagung

Hiermit möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die diese Bachelorarbeit möglich machten.

Ich bedanke mich bei O.Univ.Prof. Mag.art. DI Dr.techn. Robert Höldrich für die Betreuung und Beurteilung meiner Arbeit.

Besonders bedanken möchte mich bei DI BSc Marian Weger, der mich betreute, mir das Plattenmodell seiner Dissertation, sowie die für das zweite Experiment verwendeten Klangbeispiele zur Verfügung stellte.

Ebenfalls bedanke ich mich bei allen Teilnehmern der Versuche, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, die von mir vorgelegte Arbeit selbstständig verfasst zu haben. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder nicht veröffentlichten Arbeiten Anderer entnommen sind, habe ich als entnommen kenntlich gemacht. Sämtliche Quellen und Hilfsmittel, die ich für die Arbeit benutzt habe, sind angegeben. Die Arbeit hat mit gleichem Inhalt bzw. in wesentlichen Teilen noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

Unterschrift :

Ort, Datum :

Ostenhammer

Graz, am 4.11.2021

Disclaimer

In dieser Arbeit wird aus Gründen der Lesbarkeit das generische Maskulinum verwendet. Weibliche und anderweitige Geschlechtsidentitäten werden damit ausdrücklich eingeschlossen.

Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden die Grundlagen zur Anwendung von Sonifikation von rechteckigen Platten näher erforscht. Es gilt herauszufinden, wie gut Hörer die Parameter Größe und das Seitenverhältnis sowie Material von Platten durch Klopfen auf diese unterscheiden können. Dafür wurde ein Vorexperiment durchgeführt, um geeignete Stufengrößen zu wählen. Um die Fragestellung beantworten zu können, wurden im Vorexperiment (Experiment 1) von 14 Versuchsteilnehmern jeweils zwei Platten im AB-Vergleich perkuttiert, um einen veränderten Plattenparameter sowie dessen Richtung und Effektstärke festzustellen. Der Versuch beinhaltete zweimal 48 AB-Paarvergleiche und wurde nach Material (Glas/Holz) aufgeteilt. Die veränderlichen Plattenparameter waren Länge und Seitenverhältnis. Es wurde auf eine analoge Platte geklopft, welche durch Umschalten Platte A und B digital simulierte. In Experiment 2 wurde nun die Unterscheidbarkeit von den Materialien Plastik, Holz, Glas (Nichtmetalle) und Gold, Messing, Aluminium (Metalle) sowie die Seitenverhältnisse kompakt, länglich und stabförmig (2:1, 4:1, 8:1) mittels in der Software Matlab generierten Klangbeispielen in einem Online-Versuch untersucht. In randomisierter Reihenfolge wurden zwei Blöcke (stark und schwach gedämpft) von jeweils 36 Klangbeispielen abgespielt, dabei mussten die Probanden die Art der Metallizität (Nichtmetall/Metall), das jeweilige Material und Seitenverhältnis auswählen. In Experiment 1 zeigte sich, dass nur zwischen zwei Stufen an Plattenparametern unterschieden werden konnte. Experiment 2 zeigte, dass die Unterscheidungsgenauigkeit zwischen Seitenverhältnissen niedrig ist. Bei Materialien wurden bei der Gruppe der Nichtmetalle höhere Genauigkeiten erzielt, als die Gruppe der Metalle.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Grundlagen	7
2.1	Physikalische Modellierung rechteckiger Platten mittels Modalsynthese	7
2.1.1	Implementierung mittels Modalsynthese	7
2.1.2	Schwingungsmoden und deren Form	7
2.1.3	Berechnung der Resonanzfrequenzen	9
2.1.4	Anregung des Modells	9
2.1.5	Abstrahlung der rechteckigen Platte ohne Schallwand	10
2.1.6	Berechnung der Dämpfung	10
2.2	Akustische Wahrnehmung physikalischer Eigenschaften rechteckiger Platten	12
2.2.1	Wahrnehmungsschwellen	12
2.2.2	Einfluss der Parameter auf den Klang	13
3	Experiment 1: Unterscheidung der geometrischen Abmessungen rechteckiger Platten durch Perkussion	14
3.1	Perkussions-Simulator	14
3.1.1	Feedback-Unterdrückung und Signalaufbereitung	14
3.2	Ablauf und Versuchspersonen	15
3.2.1	User-Interface: Grafische Benutzeroberfläche und Midi-Controller	16
3.2.2	Datenerhebung	19
3.3	Auswahl der verwendeten Parameter	19
3.3.1	Plattenparameter Experiment 1	19
3.4	Ergebnisse	20
3.5	Diskussion	25
4	Experiment 2: Identifikation von Material und Geometrie rechteckiger Platten anhand des Klangs	27
4.1	Versuchsaufbau als Online-Experiment	27
4.2	Ablauf und Versuchspersonen	27
4.2.1	Grafische Benutzeroberfläche	28
4.3	Auswahl und Erstellung der Stimuli in Matlab	29
4.3.1	Plattenparameter Experiment 2	29
4.4	Ergebnisse	30
4.5	Diskussion	35
5	Schlussfolgerungen und Ausblick	38
	Abbildungsverzeichnis	40
	Literaturverzeichnis	41
	Anhang	43

1 Einleitung

Wie das Piepen beim rückwärts Einparken oder die Sirene der Feuerwehr Daten akustisch kodiert, bietet Sonifikation eine Vielzahl von Anwendungsmöglichkeiten durch die Verklanglichung von Daten. Schon Leopold von Auenbrugger erkannte 1761 die Bedeutung vom Informationsgewinn aus akustischen Signalen durch das Beklopfen des menschlichen Körpers. Er prägte den Begriff Perkussion als medizinische Untersuchungstechnik, welche bis heute Anwendung findet. Die Perkussion beschränkt sich allerdings nicht nur auf die Medizin, sondern wird auch im Alltag ständig benutzt, um Materialeigenschaften schnell und einfach akustisch zu untersuchen. Um die Möglichkeiten des Informationsgewinns mittels Perkussion zur Umsetzung in verschiedenen technischen Anwendungen auszuloten, muss zuerst ermittelt werden, welche und wie genau Teilaspekte von Klängen von Hörern überhaupt wahrgenommen werden. Im Fall von rechteckigen Platten sind die geometrischen Abmessungen, im Detail Fläche und Seitenverhältnis sowie Materialerkennung und Dämpfung die wichtigsten Teilaspekte.

Im ersten Teil der Arbeit wird der theoretische Hintergrund des physikalischen Modells für rechteckige Platten und die Wahrnehmung der Plattenparameter genauer erläutert. Die zwei darauf folgenden Kapitel beinhalten zwei Experimente, bei denen die vorhin erwähnten Teilaspekte von rechteckigen Platten - im Hinblick zur Anwendung auf Sonifikation - untersucht wurden. Experiment 1 befasst sich in der Hauptsache mit der Frage, zwischen wie vielen Stufen von Plattenparametern Hörer unterscheiden können, um im weiterführenden zweiten Experiment sinnvolle Stufengrößen zu wählen. Dafür konnten Probanden selbst mit einem Stift ein Plattenmodell perkuttieren, um die Änderung der Platteneigenschaften herauszufinden. In Experiment 2 wurde die Unterscheidbarkeit von Materialien und Seitenverhältnissen anhand von zuvor generierten Hörbeispielen getestet.

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des verwendeten Modells zur Simulation von rechteckigen Platten genauer erläutert. Für die Erzeugung der Klänge wird die subtraktive Modalsynthese genutzt, ein Verfahren bei dem ein lineares Modell durch Überlagerung einzelner Schwingungsmoden mit unterschiedlichen Intensitäten zu einem Gesamtklang führt.

2.1 Physikalische Modellierung rechteckiger Platten mittels Modalsynthese

Für das physikalische Modell findet ein Umrechnen von rein physikalischen Parametern wie Material, Geometrie und Randbedingungen auf Klangparameter statt. Dabei handelt es sich in erster Linie um die Resonanzen, die je nach Anregung in diverser Art und Weise im Objekt auftreten. Sie sind definiert durch die Parameter Frequenz, Amplitude und Dämpfung und die daraus errechnete Abklingzeit.

Das Modell gilt für rechteckige Platten aus orthotropen sowie isotropen Materialien. Bei isotropen Materialien sind die Materialkonstanten in allen Richtungen gleich. Ein orthotropes Material hingegen, wie z.B. Holz, hat zwei orthogonale Richtungen: longitudinal (in Faserrichtung) und radial (gegen die Faserrichtung). Die meisten Materialkonstanten unterscheiden sich für verschiedene Richtungen. Bei dem Material Holz wird, wie üblich, „quarter cut“ angenommen. Dies bedeutet, dass eine der Plattenkanten der Faserrichtung entspricht.

2.1.1 Implementierung mittels Modalsynthese

Bei der Modalsynthese wird der Klang durch Überlagerung gewichteter Moden der Platte mit deren Eigenfrequenzen berechnet und erzeugt. Es wird davon ausgegangen, dass die Moden voneinander unabhängig sind und deshalb deren Abklingzeit separat berechnet werden kann. Aufgrund der Linearität können die einzelnen Klänge schließlich zu einem Gesamtklang zusammengeführt werden.

2.1.2 Schwingungsmoden und deren Form

Die verschiedenen Modenformen hängen von der Geometrie der Platte und deren Randbedingungen ab. Als Randbedingungen bezeichnet man die Aufhängung der Platte, wobei die Kanten frei schwingend, aufgelagert oder eingespannt sein können. In dem verwendeten Modell für diesen Versuch werden frei schwingende Kanten angenommen.

Für die Berechnung der Modenformen werden je nach Kombination der Randbedin-

gungen das Ergebnis mit der Rayleigh-Methode angenähert. Diese kann in [Warburton, 1954, S.372-374] nachgelesen werden.

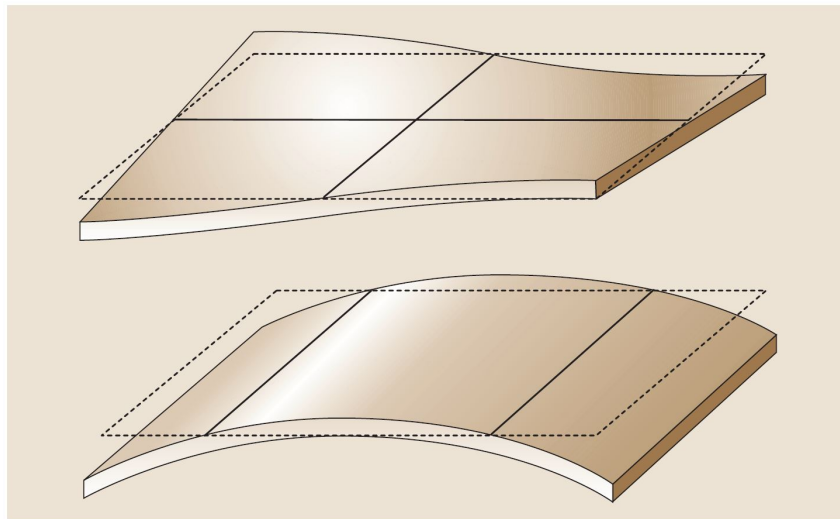


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Schwingungsmoden mit Rotation (1,1) und Biegung (2,0) einer dünnen, frei schwingenden Platte [Rossing, 2007, S.584]

Der Index ober den quadratischen Platten in Abbildung 2 bezeichnet die Anzahl der Knotenlinien in X- und Y-Richtung. Unter den Platten ist der jeweilige Frequenzfaktor angegeben.

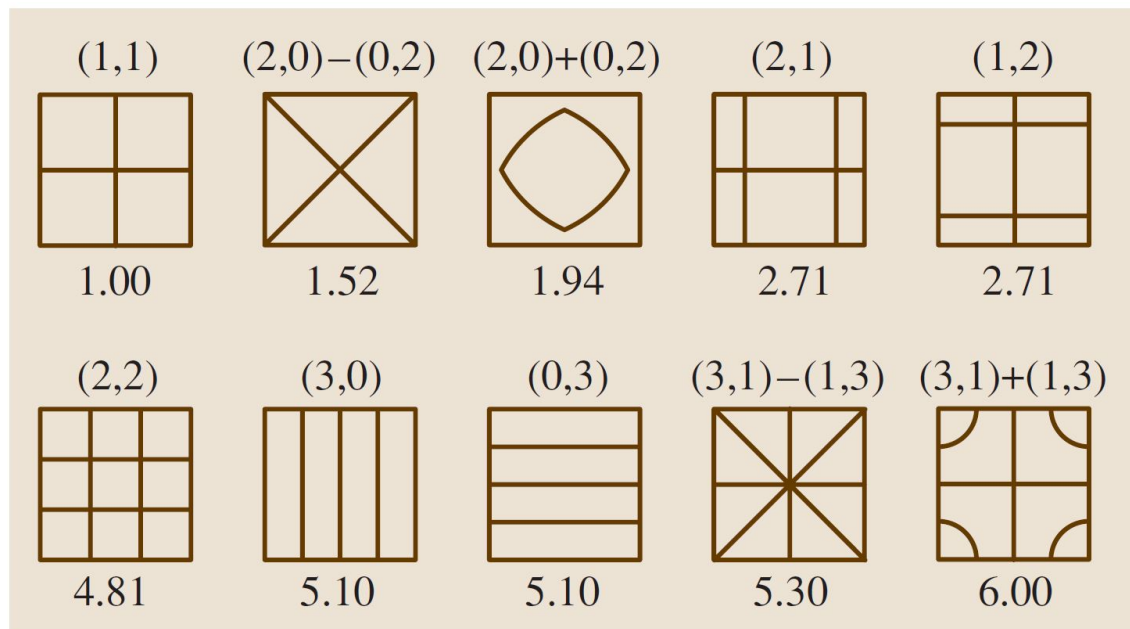


Abbildung 2: Schematische Darstellung der 10 niedrigsten Schwingungsmoden einer dünnen, frei schwingenden quadratischen Platte [Rossing, 2007, S.585]

2.1.3 Berechnung der Resonanzfrequenzen

Für die Berechnung der Eigenfrequenzen der Platte wird auf die Publikation [McIntyre and Woodhouse, 1988, S.1399] verwiesen.

Die Eigenfrequenz wird berechnet mit

$$\omega_0^2 = \frac{V}{T} \quad (1)$$

wobei

$$\omega_0 = 2 \cdot \pi \cdot f_0 \quad (2)$$

V entspricht der potentiellen und $T \cdot \omega_0^2$ der kinetischen Energie. Die exakte Tonhöhe der berechneten Frequenzen hört man nur im völlig ungedämpften Fall, da sich diese abhängig von der Stärke der Dämpfung minimal senkt.

$$\omega_r = \omega_0 \cdot \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (3)$$

ζ ...Dämpfungsfaktor

Die Tonhöhe, die man also tatsächlich beim Modell der Platte hört, ist deshalb auch minimal niedriger, als die errechnete Resonanzfrequenz $f_r = \frac{\omega_r}{2\pi}$.

2.1.4 Anregung des Modells

Anregungsposition und Amplitudengewichtung der Moden Die durch die Anregung hervorgerufenen Amplituden ergeben sich aus der Anregungsposition in Kombination mit den verschiedenen Modenformen der Platte. Hierbei entspricht die Amplitude einer Auslenkung der jeweiligen Mode an der Anregungsposition. Bei Anregungen auf einer Knotenlinie geht der Einfluss auf die Amplitude einer Mode gegen Null, wird allerdings ein Wellental bzw. -bauch angeregt, erreicht die Amplitude ihr Maximum. Man merke an, dass die Amplitude auch negativ sein kann, was einer Phasendrehung von 180° entspricht.

Oberflächenhärte Je nach Härte des Materials der Platte - im Verhältnis zur Härte des Materials des anschlagenden Objekts (z.B. Hammer oder Schlägel) - ändert sich die Dauer des Kraftstoßes, welcher die Platte anregt. Diese Anregung verhält sich bei kugelförmigen Objekten die auf Platten treffen sowohl räumlich als auch zeitlich annähernd Hann-Fenster förmig. Mit steigender Härte der Materialien wird dieses Hann-Fenster nun aufgrund der schnelleren Kraftübertragung kürzer, was die Anregung höherer Frequenzen zur Folge hat. Mit den Messungen aus [Chaigne and Doutaut, 1997] und [Troccaz et al., 2000] und der zugehörigen Brinell-Härte der Materialien, wurde ein Zusammenhang zwischen $\frac{1}{Härte}$ und Hann-Fensterlänge

geschätzt.

$$Dauer \approx \frac{6.1557 \cdot 10^{-10}}{H\ddot{a}rte} \quad (4)$$

Ein zeitliches Hann-Fenster entspricht dann ungefähr einem Tiefpassfilter 3. Ordnung mit der Grenzfrequenz $f_c \approx \frac{\sqrt{\log(2) \cdot 2.4733}}{\pi \cdot Dauer}$ was einer Grenzfrequenz von circa $f_c = 1065 \cdot H\ddot{a}rte$ entspricht. Die Grenzfrequenz f_c liegt nur bei weichen Materialien wie Holz oder weichem Kunststoff im hörbaren Bereich. Bei Metallen oder Glas liegt sie über 20kHz und wirkt sich nicht mehr auf den wahrgenommenen Klang aus.

2.1.5 Abstrahlung der rechteckigen Platte ohne Schallwand

In diesem Fall wird eine frei schwingende Platte (engl. unbaffled) modelliert. Im Gegensatz dazu würde eine in eine unendlich große Schallwand eingebaute Platte (engl. baffled) stehen. Bei tiefen Frequenzen schwingt die Platte zwar, strahlt aber kaum Schallenergie ab, da es zum sogenannten akustischen Kurzschluss kommt. Als empirisches Modell dient [Putra, 2010, S.1119-1120]. Die Abstrahlung der Platte verhält sich demnach im Frequenzbereich circa wie ein Hochpass 2. Ordnung. Die kritische Frequenz f_c wurde berechnet nach [McAdams et al., 2010, S.1403].

$$f_c = \frac{1}{2\pi} \frac{c_0^2}{h} \sqrt{\frac{\rho}{D}} \quad (5)$$

mit $c_0 = 344\text{m/s}$

2.1.6 Berechnung der Dämpfung

Allgemein lassen sich die Dämpfungen für die verschiedenen Materialien aus mehreren Teildmpfungen zusammensetzen. Als gemeinsame Groe wird der so genannte „loss factor“

$$\eta = \frac{1}{Q} \quad (6)$$

bzw.

$$\eta = \frac{2 \cdot \alpha}{\omega} \quad (7)$$

verwendet. Das hat den Vorteil, dass die Teildmpfungen aus den verschiedenen Dämpfungsmechanismen einfach zu einer Gesamtdämpfung aufsummiert werden können. Die Mechanismen für die verschiedenen Dämpfungen werden in den folgenden Unterkapiteln erläutert.

Viskoelastische Dämpfung Die viskoelastische Dämpfung überwiegt bei Nichtmetallen wie Glas, Kunststoff und Holz, existiert aber auch bei Metallen. Allerdings spielt ihr Einfluss auf die Gesamtdämpfung bei Metallen eine untergeordnete Rolle. Nach [Zoghaib and Mattei, 2015, S.17] gibt es keine Möglichkeit der Berechnung

der viskoelastischen Dämpfung ohne vorherige Messung. Jedoch kann sie durch ein frequenzunabhängiges η modelliert werden, welches nur vom jeweiligen Material abhängig ist.

Für isotrope Materialien wurden die gemessenen Werte aus [Cremer et al., 2005, S.191-196] verwendet. Bei orthotropen Materialien wie z.B. Holz wurde Tabelle 5 aus [McIntyre and Woodhouse, 1988, S.1408] für die gemessenen Dämpfungsfaktoren η_1 bis η_4 herangezogen.

Thermoelastische Dämpfung Die thermoelastische Dämpfung resultiert aus dem Zusammenhang zwischen der elastischen Verformung und der Wärmediffusion. Sie wurde nach [Chaigne et al., 2016, S.220-224] berechnet und ist insbesondere bei gut wärmeleitenden Materialien wie Metallen relevant. Bei schlecht wärmeleitfähigen Materialien wie den meisten Nichtmetallen spielt die thermoelastische Dämpfung eine untergeordnete Rolle.

Abstrahlungsdämpfung Die Abstrahlungsdämpfung ist die Dämpfung, die die Platte erfährt, wenn sie ihre Bewegungsenergie als Schallenergie an das sie umgebende Medium (in unserem Fall Luft) abgibt. Sie gilt für alle isotropen Materialien und wurde nach [Chaigne and Lambourg, 2001] Gleichung 22 wie folgt berechnet.

$$\tilde{D}(s) \triangleq D \left(1 + \frac{2\rho_a c}{\omega_c \rho h} \frac{\sum_{m=1}^3 b_m (s/\omega_c)^m}{\sum_{n=0}^3 a_n (s/\omega_c)^n} \right) = D(1 + \tilde{d}_r(s)) \quad (8)$$

mit $a_0 = 1.1669, a_1 = 1.6574, a_2 = 1.5528, a_3 = 1, b_1 = 0.0620, b_2 = 0.5950, b_3 = 1.0272$. und

$$\omega_c = c^2 \sqrt{\frac{\rho}{h^2 D}} \quad (9)$$

Die Abstrahlungsdämpfung ist also abhängig von der Frequenz ω , der Dichte der Platte ρ , der Dicke der Platte h , der Schallgeschwindigkeit der Luft c , der Dichte der Luft ρ_a und der Steifigkeit des Materials D . Der benötigte „loss factor“ η entspricht dem Imaginärteil von $\tilde{d}_r(s)$.

$$\eta = \Im\{\tilde{d}_r(s)\} \quad (10)$$

wobei

$$s = j\omega \quad (11)$$

Fluid Damping Streng genommen entspricht eine ideale frei schwingende Platte bei einer Schwingung mit 0Hz (entsprechend der Mode (0/0)) einfach einer Translation der Platte im Raum. Da in der Praxis die Platte jedoch immer irgendwo im Raum fixiert sein muss, bedeutet das auch, dass sie immer wieder in die Ausgangsposition zurückgezogen wird. Deshalb ist der Fluid-damping-factor als Kor-

rekturfaktor notwendig, der zum Dämpfungsfaktor α hinzu addiert wird, da die anderen Dämpfungsmodelle (viskoelastisch, thermoelastisch, Abstrahlungsdämpfung) bei 0Hz gegen Null konvergieren, was eine unendliche Abklingzeit bedeuten würde. Die verwendeten Werte stammen aus [Chaigne and Lambourg, 2001, S.10].

$$\eta = \frac{2 \cdot \alpha}{\omega} = \frac{R_f}{\omega} \quad (12)$$

Auflagerungsdämpfung Die Auflagerungsdämpfung der Platte wurde nach Gehör eingestellt, um den Energieverlust der Dämpfung an den auf Filz aufgelagerten Plattenkanten zu berücksichtigen. Sie wird als konstanter Wert η zur Gesamtdämpfung hinzu addiert.

2.2 Akustische Wahrnehmung physikalischer Eigenschaften rechteckiger Platten

In diesem Kapitel der Arbeit wird auf die Unterschiede der Wahrnehmung von verschiedenen Parametern bei schwingenden Körpern eingegangen. Es wird gezeigt, welche wissenschaftlichen Ergebnisse zum jetzigen Stand zu diesem Thema vorhanden sind. Auch die Wahrnehmungsschwellen von Frequenz, Amplitude und dem zeitlichen Abklingen eines Signals spielen eine bedeutende Rolle für den Aufbau der eigenen Hörversuche.

2.2.1 Wahrnehmungsschwellen

Die Unterscheidbarkeitsschwelle „just noticeable difference“ (JND) für Frequenz, Amplitude und Abklingzeit von [Lutfi and Stoelinga, 2010, S.353] werden wie folgt angegeben:

Frequenz f Bei moderaten Schalldrücken von 40dB SPL(Sound Pressure Level) ist die JND

$$\Delta f = 10^{0.026\sqrt{f}-0.533} \quad (13)$$

über einen Frequenzbereich von 0.2 bis 8.0 kHz.

Amplitude A Die kleinste wahrnehmbare Änderung (JND) für Amplituden beträgt

$$\Delta A = 0.680(A/A_0)^{0.928} \quad (14)$$

wobei A_0 die Wahrnehmungsschwelle darstellt.

Abklingzeit τ Die JND für die Abklingzeit beträgt

$$\Delta\tau = 0.439\tau^{0.535} \quad (15)$$

für $2 \leq \tau \leq 20$ ms und

$$\Delta\tau = 0.243\tau^{0.722} \quad (16)$$

für $20 \leq \tau \leq 200$ ms.

2.2.2 Einfluss der Parameter auf den Klang

Länge Die Veränderung der Länge bei gleich bleibendem Seitenverhältnis wirkt sich als eine reine Größen- bzw. Flächenänderung der Platte aus. Auf den Klang hat das zweierlei Auswirkungen: Eine Verschiebung der Tonhöhe (Frequenz) sowie die Änderung der Grenzfrequenz der Abstrahlung der Platte.

Material Laut [Lutfi and Stoelinga, 2010, S.9] treffen die Hörer ihre Entscheidung betreffend Material in erster Linie anhand der Frequenz und Abklingzeit des wahrgenommenen Klangs. Da in Experiment 2 die Frequenzen der Klänge innerhalb eines Klangpaares normiert wurden, um das Erkennen der Metallizität ohne ein Merken der Tonhöhe zu untersuchen, mussten die Teilnehmer ihre Entscheidung (betreffend Metallizität) anhand des unterschiedlichen Dämpfungsverlaufs des Materials fällen. Die Materialpaare zueinander unterschieden sich in ihrer Grundfrequenz.

Seitenverhältnis Zur Veränderung des Seitenverhältnisses wurde die Breite der Platte bei fixierter Länge variiert. Mit größer werdender Breite bleiben somit die Modenfrequenzen der Länge dieselben, alle anderen Moden jedoch verschieben sich von oben ins hörbare Spektrum hinein. Sobald diese in den hörbaren Bereich eintreten, beinhaltet der Klang damit mehr hohe Frequenzen - die Modendichte steigt. Man würde ihn als schärfer bezeichnen.

3 Experiment 1: Unterscheidung der geometrischen Abmessungen rechteckiger Platten durch Perkussion

Ziel des ersten durchgeführten Experiments war es, herauszufinden, zwischen wie vielen Stufen pro Parameterbereich die Probanden im Durchschnitt unterscheiden können. Des weiteren galt es herauszufinden, wie genau die absolute Schätzung aller Parameter auf einmal war, welche Parameterverwechslungen am häufigsten auftreten und weshalb das der Fall ist.

3.1 Perkussions-Simulator

Das in Kapitel 2 beschriebene physikalische Modell wurde von Marian Weger implementiert und für diesen Versuch zur Verfügung gestellt. Es wurde als Echtzeit-Modell in SuperCollider umgesetzt und über die Software PureData gesteuert.

Die Schallwiedergabe erfolgte über platten-interne Exciter (Anreger) und zwei Genelec 8020 CPM Lautsprecher, die zur Erweiterung des Frequenzspektrums für tiefe Frequenzen und Erhöhung der generellen Lautstärke genutzt wurden.

Durch Piezoscheiben als Kontaktmikrofone auf der Platte wurde das Anregungssignal gemessen. Dieses Signal wurde durch das in SuperCollider implementierte physikalische Modell geleitet und an die Exciter auf der Platte gesendet. Diese fungierten als Lautsprecher, mit der Platte als Membran. Daraus ergibt sich ein realistisches Modell, welches allerdings anfällig für Rückkopplungen ist, da die Platte sowohl als Membran der Kontaktmikrofone als auch als Lautsprechermembran der Exciter dient. Als Lösung wurde ein dreistufiges Feedback-Unterdrückungssystem implementiert.

3.1.1 Feedback-Unterdrückung und Signalaufbereitung

Antiresonator und Frequenzshifting Das Resonanzsystem wird durch einen Impuls (z.B. Klopfen) breitbandig angeregt. Bei dieser Stufe des Feedback - Unterdrückungssystems wird die resonierende Frequenz des Systems durch einen Notch - Filter (Antiresonator) wieder unterdrückt. Um trotzdem noch ein Ausgangssignal zu haben, findet nach der Frequenzunterdrückung ein Frequenzshift mittels Einseitenbandmodulation statt. Da das Signal breitbandig ist, ist dies ohne Veränderung des Ausgangssignals möglich. Nach dem Frequenzshift wird das Signal wieder bei der Resonanzfrequenz verstärkt, woraus das ursprüngliche Signal resultiert.

Faltung mit Impulsantwort Um die Resonanzfrequenzen des gesamten Modells zu dämpfen, wurde die Impulsantwort des gesamten Systems mit dem Ausgangssignal gefaltet und das gefilterte Signal mit einer Gewichtung vom Eingang abgezogen.

Klassisches Einmessen des Systems Die Platte stellt auch durch den geometrischen Abstand der Kontaktmikrofone zu den Excitern ein Resonanzsystem dar. Dieses wurde wie in der klassischen Tontechnik mit einem Rauschsignal eingemessen und die Spitzen im Frequenzspektrum mit Notch-Filtern gedämpft, um den Frequenzgang zu linearisieren.

3.2 Ablauf und Versuchspersonen

Der Versuchsablauf ist in drei Abschnitten erfolgt. Zuerst wurden den Probanden alle physikalischen Parameter in einem passiven Training näher gebracht. Dabei wurde jeweils ein Parameter in feinen Abstufungen über den gesamten Parameterbereich, vom minimalen bis zum maximalen Wert, variiert. Die anderen Parameter wurden auf Durchschnittswerte gesetzt. Am Bildschirm konnten die aktiven Einstellungen in Echtzeit durch eine grafische Repräsentation nachvollzogen werden.

Im Anschluss war ein aktives Training zu absolvieren, bei dem die Probanden mit einem Stift mit der Platte interagierten. Die Einstellungen für Platten A und B wurden vorher fixiert und folgten einem pseudo-zufälligen Pfad, bei dem sich zwischen A und B immer nur ein Parameter ändert. Sie werden im A/B Test verglichen. Nach Eingabe des vermuteten Ergebnisses wurde optisches Feedback angezeigt, um schnelles Lernen zu ermöglichen. Es wurden größere Sprünge für den Vortest gewählt, um Unterschiede vorerst besser wahrnehmen zu können. Falls der falsche Parameter gewählt wurde, wurde dem Probanden der richtige Parameter gezeigt, und dort eine Antwort erwartet. Der Versuch verlängerte sich dadurch mit der Anzahl der falschen Antworten. Die Materialien waren vorgegeben und beschränkten sich auf Holz und Glas.

Zur Benutzereingabe stand ein MIDI-Controller mit Knöpfen zum Umschalten zwischen Platte A und B und zwei Fadern für je Größe und Seitenverhältnis zur Verfügung. Da sich pro Abfrage immer nur ein Parameter änderte, konnte man auch nur einen Fader für entweder Größe oder Seitenverhältnis einstellen. Wurde der zweite Fader trotzdem bewegt, setzte sich der erste auf seine vorherige Position zurück.

Der eigentliche Versuch verlief genau gleich wie das aktive Training, allerdings mit feineren Parameterabstufungen. Damit die Probanden keine Stufen feststellen oder sich merken konnten, wurden Ablenkstufenpaare (Distractors) eingeführt und die Stufengrößen minimal zufällig auf und ab variiert (gejittert). Um jeden Parameter-

sprung abzudecken, wurden pro Experiment für die Materialien Holz und Glas je 48 Versuchstrials durchgeführt.

Der Versuch wurde von 14 Versuchspersonen am IEM Graz durchgeführt. Es wurden Hörer ausgewählt, die ihr Gehör entweder als beruflich oder privat geschult bezeichneten. Geschlechtsspezifisch wurde keine Unterscheidung getroffen.

3.2.1 User-Interface: Grafische Benutzeroberfläche und Midi-Controller

Zur Interaktion diente ein Behringer BCF-2000 MIDI Controller, bei dem die Antworten mit Knöpfen und Fadern eingegeben wurden. Als Schnittstelle mit der Hardware diente eine grafische Benutzeroberfläche, welche in PureData entworfen und programmiert wurde.

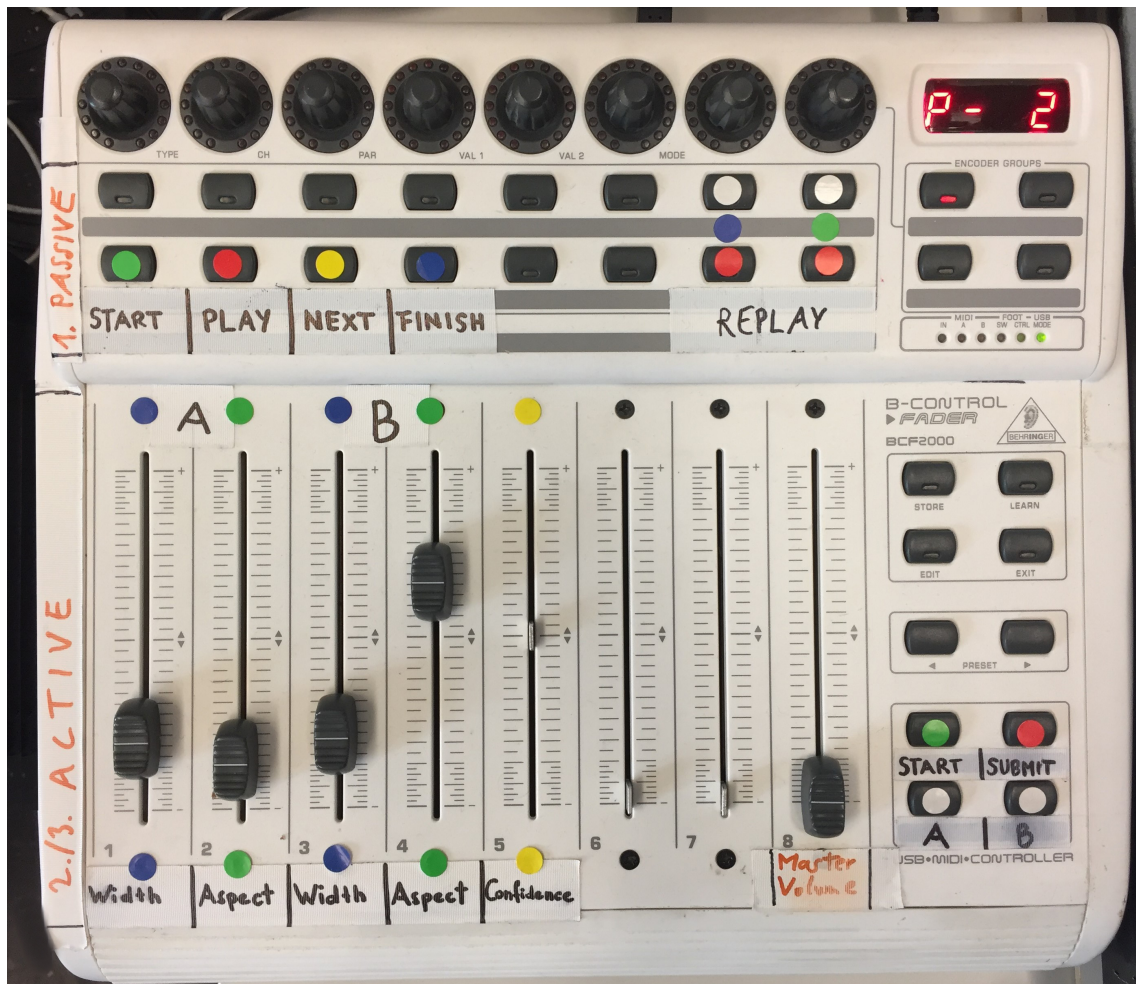


Abbildung 3: Behringer BCF-2000 MIDI Controller

Abbildungen 4 und 5 zeigen die in PureData programmierten Benutzeroberflächen des passiven und aktiven Vortrainings, mit welchen die Probanden auf den

eigentlichen Versuch vorbereitet werden.

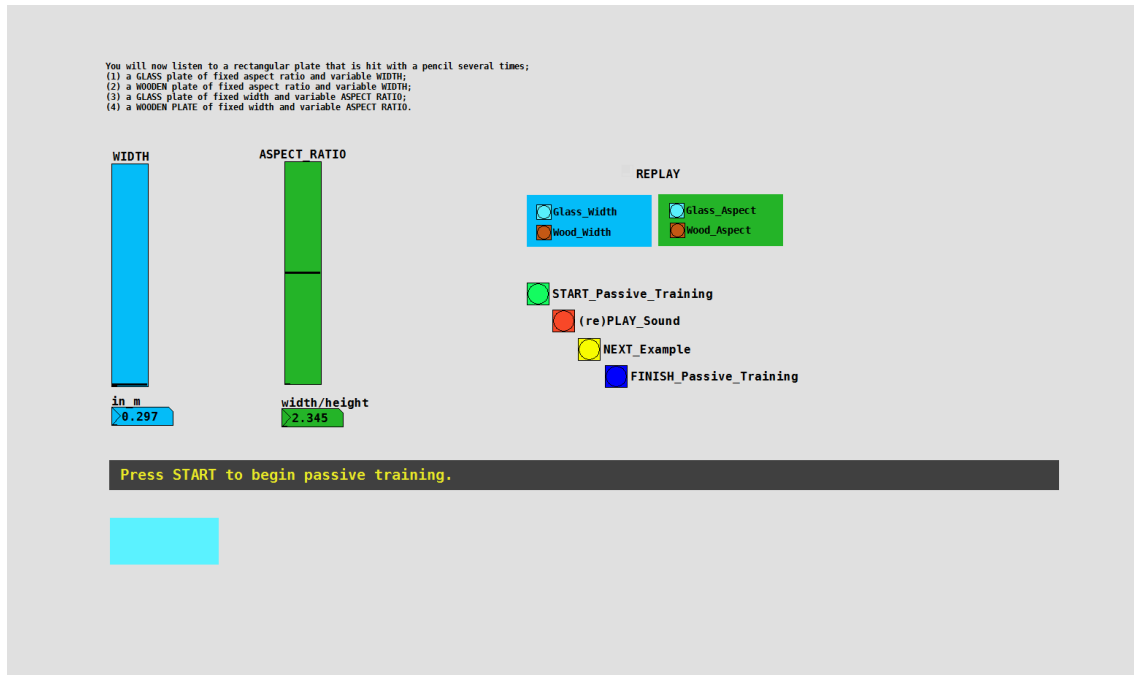


Abbildung 4: Grafische Benutzeroberfläche passives Training

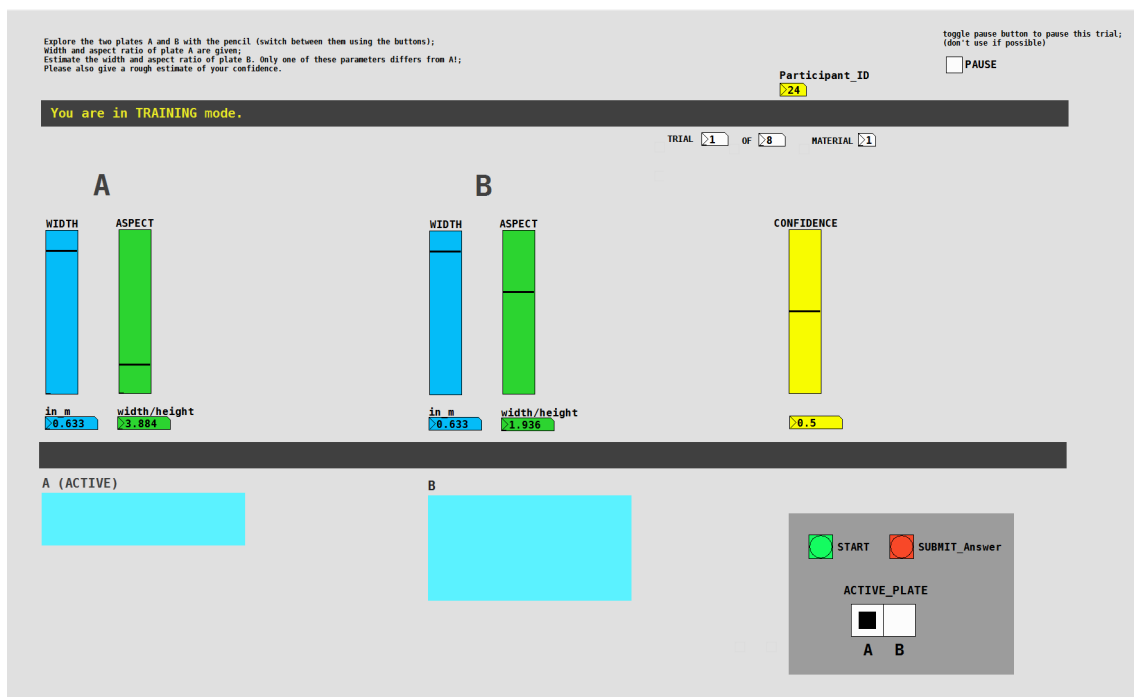


Abbildung 5: Grafische Benutzeroberfläche aktives Training

Abbildung 6 zeigt die Benutzeroberfläche des Versuchs, so wie sie auf dem Bildschirm für die Probanden sichtbar war. Die hellblauen Rechtecke im unteren Bild-

schirmbereich symbolisieren die jeweiligen AB-Paare der Versuchsplatten.

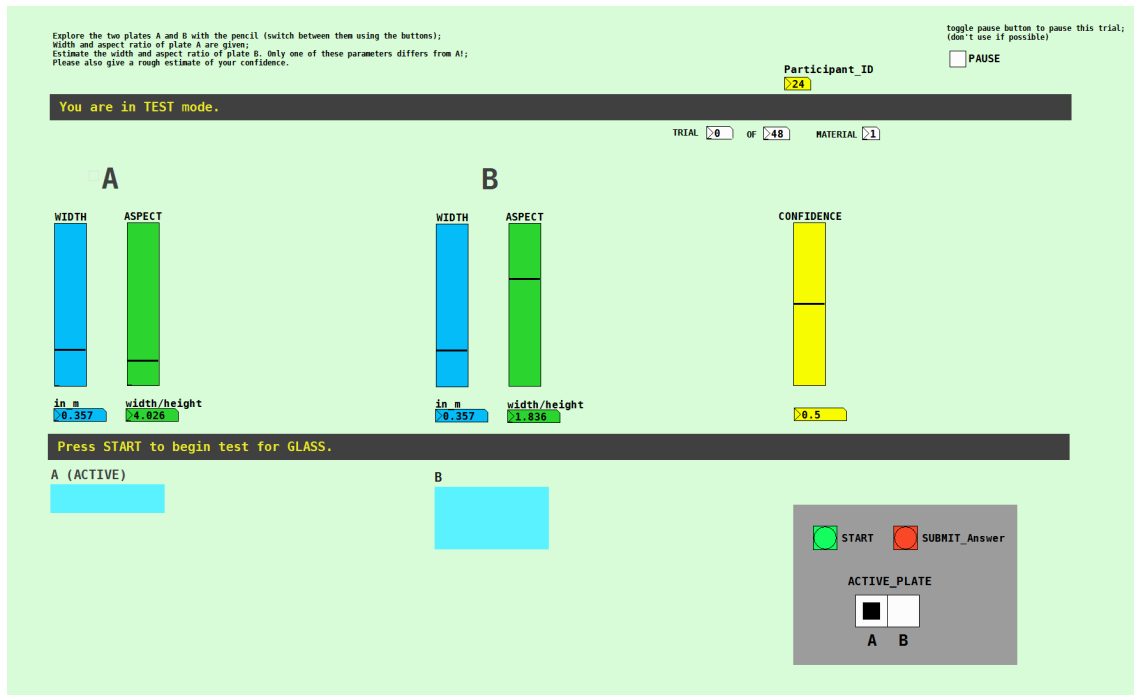


Abbildung 6: Grafische Benutzeroberfläche Experiment 1

In Abbildung 7 ist die Benutzerinteraktion am Versuchsplatz, welcher sich im Experimentalstudio des IEM-Graz befindet, zu sehen. Am Stift des Probanden ist die für das optische Trackingsystem notwendige Vorrichtung montiert.

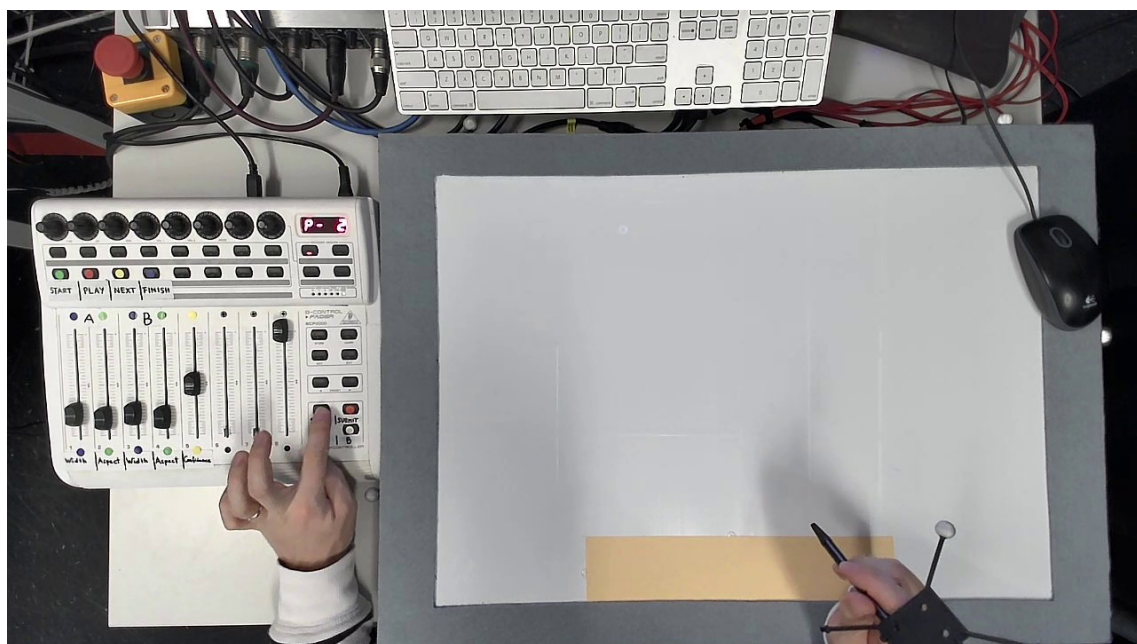


Abbildung 7: Versuchsplatz Experiment 1

3.2.2 Datenerhebung

Bei aktivem Training und dem Versuch wurden von der ausführenden Software PureData folgende Daten gesammelt: Antwort des Probanden, bestehend aus Größe, Seitenverhältnis, Material und selbst eingeschätzte Sicherheit (Confidence), Dauer der Antwortfindung und Dauer bis zum nächsten Plattenvergleich, Videoaufnahme der Platte von oben, Audioaufnahmen des Piezo-Signals der Platte, des Ausgangs des Modells und Stereo-Downmix vom gehörten Klang. Zusätzlich wurde die Stiftposition in (x/y/z) Koordinaten via Infrarot-Trackingsystem OptiTrack über die Zeit und das Klopfmuster der einzelnen Probanden auf Papier aufgenommen.

3.3 Auswahl der verwendeten Parameter

Mit informellen Hörtests, die im Vorfeld am IEM Graz mit kleineren Personengruppen durchgeführt wurden, wurde die Parameterauswahl wie folgt getroffen.

3.3.1 Plattenparameter Experiment 1

- 2 Materialien (mit fixierten Dicken, je Material)
 - Holz (orthotrop)
 - Glas (isotrop)
- 3 Größen (Länge der Platte)
 - klein (34.3 cm)
 - mittel (45.6 cm)
 - groß (60.7 cm)
- 3 Seitenverhältnisse (Faktor Länge zu Höhe)
 - kompakt (1.416)
 - länglich (2.345)
 - stabförmig (3.884)

Als mittlere Länge und längliches Seitenverhältnis wurde jeweils das geometrische Mittel zwischen maximalem und minimalem Plattenparameter gebildet.

3.4 Ergebnisse

Die Auswertung des ersten Versuches wurde von Marian Weger durchgeführt und ergab folgende Ergebnisse. [Weger]¹

Absolute Genauigkeit Für Parameterdimension, Parameterwert und Parameter - Änderungsrichtung wurde aus den Wahrheitsmatrizen die absolute Treffergenauigkeit (ACC, accuracy) der Probanden errechnet. Die durchschnittliche Genauigkeit liegt für die Parameter - Änderungsrichtung bei 0.89 (Standardabweichung $SD=0.096$), 0.83 ($SD=0.067$) für Parameterwert und 0.78 ($SD=0.104$) für Parameterdimension. Drei Probanden (P7, P9, P14) wurden von weiteren statistischen Analysen ausgeschlossen, da sie über 1.5 Standardabweichungen des Durchschnitts in mindestens einer der 3 Kategorien (Parameterverwechslung, Richtungsverwechslung und Stufenverwechslung) lagen.

Die Genauigkeit (ACC) errechnet sich aus der Summe der richtigen Antworten, geteilt durch die Gesamtanzahl der gefragten Werte.

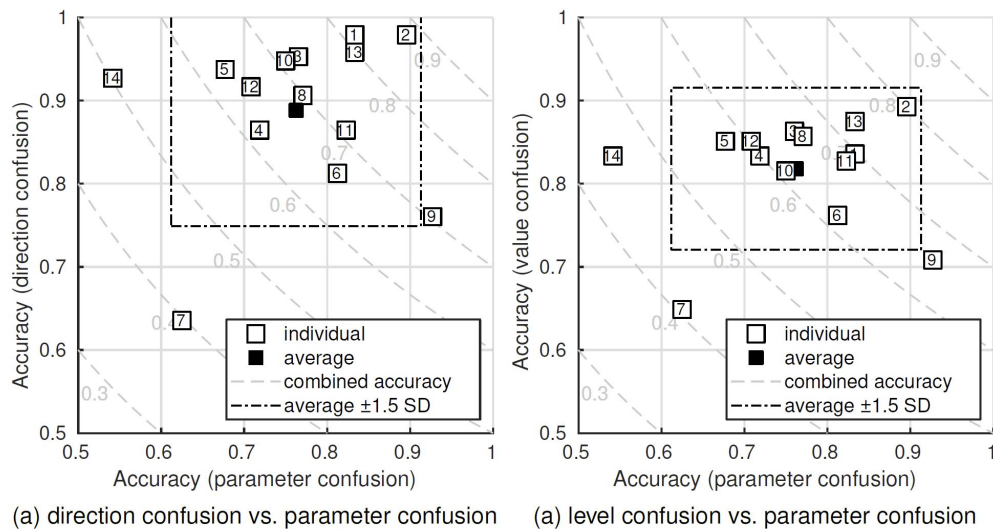


Abbildung 8: Ergebnis einzelner Probanden

Dimensionsverwechslung Eine der Hauptaufgaben der Probanden war es, zu erkennen, welche Dimension sich zwischen der Referenzplatte und der unbekannten Platte veränderte. In Abbildung 9 kann man in der Wahrheitsmatrix die richtigen und falschen Antworten der Probanden, für das jeweilige Material, ablesen. Jede Abfrage kann dabei einem Feld der Wahrheitsmatrix zugewiesen werden. „true“ bezeichnet die wahren, „estimated“ die von den Probanden geschätzten Werte.

¹Die Auswertung von Experiment 1 stammt weitgehend von Marian Weger. Ich bedanke mich, dass diese zur Verfügung gestellt wurde, um ein inhaltlich geschlossenes Dokument vorlegen zu können.

Der Matthews Korrelationskoeffizient (MCC) ist über die Formel $MCC = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}}$ mit der Chi - Square Statistik verwandt. Sie beschreibt, wie stark der geschätzte Wert vom wahren Wert abhängt.

(a) glass

	true	
	length	aspect
length	184	59
aspect	72	213

ACC = 0.75, MCC = 0.50

(b) wood

	true	
	length	aspect
length	209	32
aspect	69	218

ACC = 0.81 , MCC = 0.63

Abbildung 9: Wahrheitsmatrix Parameterdimensionen

Plattenverwechslungen Die am häufigsten verwechselten Plattenpaare sind in Tabelle 1 angeführt. P gibt dabei die Wahrscheinlichkeit der Verwechslung an.

P	verwechselte Plattenpaare	
0.24	(mittel/kompakt)	(groß/länglich)
0.14	(klein/länglich)	(mittel/stabförmig)
0.14	(mittel/länglich)	(groß/stabförmig)
0.13	(klein/kompakt)	(mittel/länglich)
0.12	(klein/kompakt)	(groß/stabförmig)

Tabelle 1: Die häufigsten Plattenverwechslungen

Stufenverwechslungen Für den Vergleich zwischen den Hauptstufen Länge und Seitenverhältnis wurden die Versuchsdurchgänge, wo die unbekannte Platte einen Distractor darstellte, ausgeschlossen. Es wurden nur korrekte bzw. korrigierte Antworten ausgewertet. Die geschätzten Werte wurden jitter-korrigiert und zur nächsten Hauptstufe gerundet. Von drei Hauptstufen ausgehend wurden Wahrheitsmatrizen für jeden Parameter und jedes Material generiert. Siehe Abbildung 10 und 11. Zusätzlich wurden die ACC und der MCC für alle Wahrheitsmatrizen angegeben.

Ein höherer wahrer Wert in Länge führte zu einem größeren Schätzwert der Länge. Die Seitenverhältnisse „stabförmig“ und „länglich“ wurden signifikant größer geschätzt als „kompakt“. Ebenfalls wurde „stabförmig“ signifikant größer geschätzt als „länglich“ (alle $p \leq 0.001$).

Ähnlich dazu verhielt es sich bei der Plattenlänge. „groß“ und „mittel“ wurden bei beiden Materialien signifikant größer geschätzt als „klein“ ($p \leq 0.001$). Im Falle des Materials Holz wurde „groß“ signifikant größer geschätzt als „mittel“ ($p \leq 0.001$). Im Falle des Materials Glas war diese Unterscheidung jedoch nicht signifikant ($p = 0.026$), wenn die Bonferroni-Korrektur angewendet wurde.

		(a) glass					(b) wood		
		true					true		
estimated		small	medium	large	estimated		small	medium	large
	small	130	7	7		small	147	23	1
	medium	10	118	13		medium	5	115	13
	large	6	33	138		large	1	18	139
ACC = 0.84, MCC = 0.75					ACC = 0.87, MCC = 0.80				

Abbildung 10: Wahrheitsmatrix Länge

		(a) glass					(b) wood		
		true					true		
estimated		small	medium	large	estimated		small	medium	large
	small	123	13	11		small	131	17	4
	medium	19	129	11		medium	19	127	24
	large	4	18	134		large	3	12	125
ACC = 0.84, MCC = 0.75					ACC = 0.83, MCC = 0.74				

Abbildung 11: Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis

Richtungsverwechslung Abbildung 12 zeigt die geschätzten Stufen gegenüber den wahren Werten für alle vier Kombinationen von Material und Parameter. Die Dreiecke stellen den Median dar, Fehlerbalken sind Quartile und 95% - Quantile. $\triangle$ stellt einen Sprung um zwei Stufen nach oben, $\triangle$ einen Sprung um eine Stufe nach oben, ∇ einen Sprung um zwei Stufen nach unten und ∇ einen Sprung um eine Stufe nach unten dar. Die strichlierten Linien stellen die wahren Werte dar.

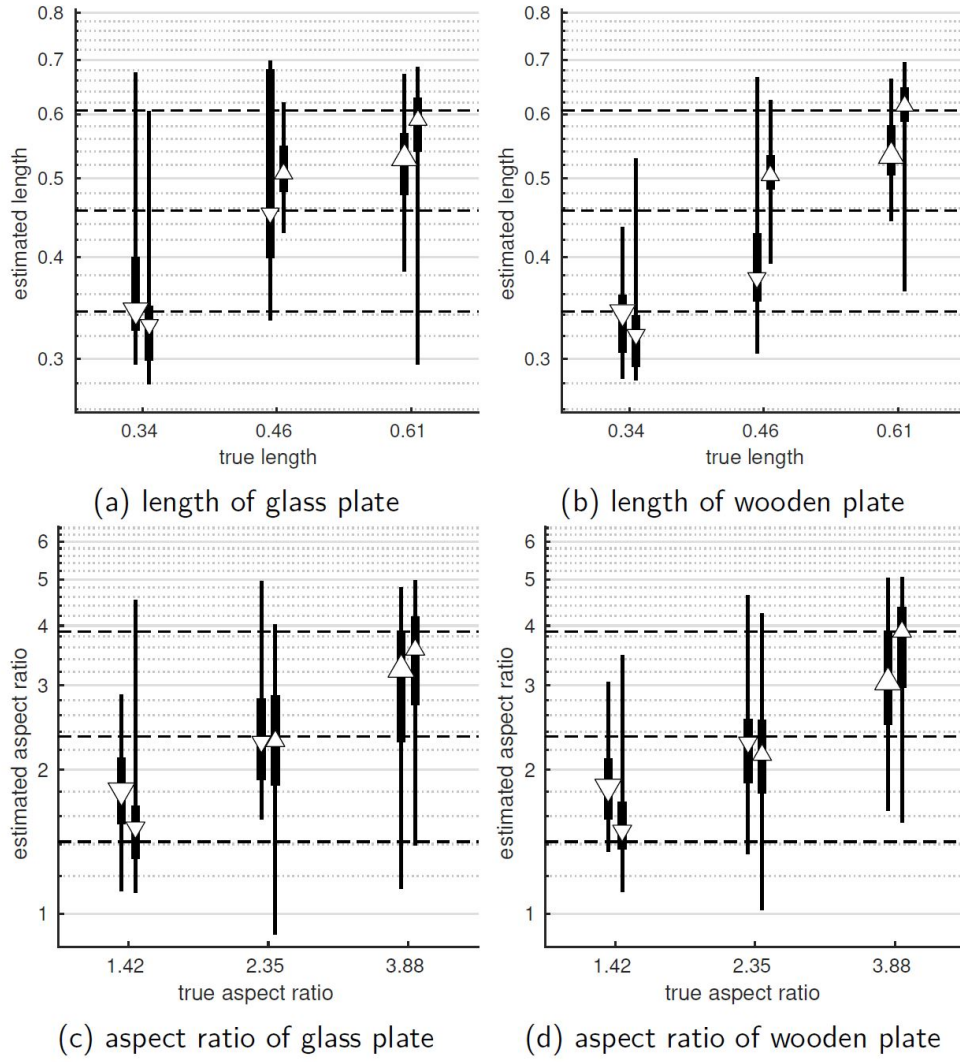


Abbildung 12: Sprungdiagramm

Anzahl der unterscheidbaren Stufen Cohen's D ist ein Maß für die Effektstärke und wurde für Länge und Seitenverhältnis ermittelt. Dazu wurde die Differenz der Mittelwerte μ_A und μ_B durch die gepoolte Standardabweichung s_P dividiert.

$$d = \frac{\mu_A - \mu_B}{s_P} \quad (17)$$

In Abbildung 13 werden die Werte für Cohen's D angegeben. Eine Effektstärke für 0.1 bedeutet einen sehr kleinen Effekt, 2 einen sehr großen Effekt. Werden die Effektstärken beider Stufen addiert und die Summe durch die Schwellwert-Effektstärke d_t dividiert, erhält man die Anzahl an Stufen, welche mit einem gegebenen d_t unterschieden werden können. Addiert man nun die eine Stufe, welche immer gehört werden kann, ergibt sich die Anzahl an unterscheidbaren Stufen mit folgender For-

mel [Groß-Vogt et al., 2020].

$$N = \frac{\sum_{i=1}^2 (d_{i,i+1})}{d_t} + 1 \quad (18)$$

In Abbildung 13 geben die schattierten Bereiche die 95%-Konfidenzintervalle an. Die hervorgehobenen Linien geben die Wahrscheinlichkeit an, beide Parameter - in Abhängigkeit zur Anzahl der unterscheidbaren Stufen - korrekt zu identifizieren. Die Wahrscheinlichkeit Parameter und Richtung richtig zu schätzen, ist bei Holz, wie in der Grafik ersichtlich, höher als bei Glas.

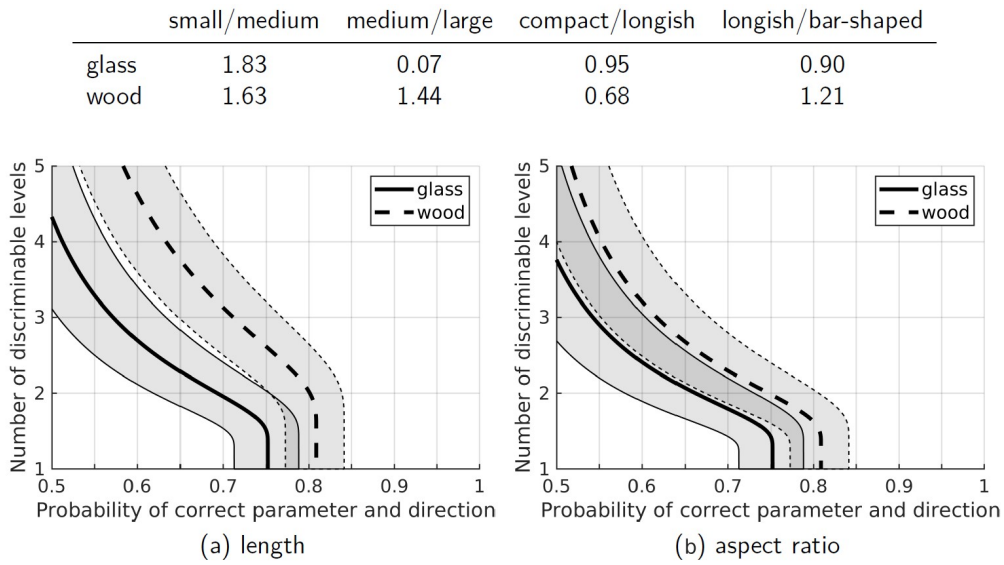


Abbildung 13: Anzahl unterscheidbarer Stufen in Abhängigkeit der Treffsicherheit

3.5 Diskussion

Wie in informellen Hörversuchen getestet, entspricht die wahrgenommene Tonhöhe der Stimuli ungefähr der Grundfrequenz der Mode (3/0). Dies resultiert in einem Frequenzbereich von 438Hz (groß) bis 1372Hz (klein) für Glas und 424Hz (groß) bis 1329Hz (klein) für Holz.

Wenn der Abstand der Resonanzfrequenzen zueinander größer als 10% wird, werden sie laut [Thurlow and Bernstein, 1957] als separate Tonhöhen wahrgenommen. Nach [Viemeister and Fantini, 1987] liegt die Wahrnehmungsschwelle für die Unterscheidung von Frequenzverhältnissen bei 1.2% (gemessen bei einem Basisverhältnis von 1.25). In unserem Fall liegt das Basisverhältnis (zwischen kompakt und stabförmig) bei 2.74. Der Frequenzbereich des Seitenverhältnisses würde somit $\log_{1.012}(2.74) = 84.5$ mal der JND entsprechen.

Die Modendichte D stellt eine Möglichkeit dar, die Seitenverhältnisse zu unterscheiden. Diese ist definiert als die Gesamtanzahl der Teiltöne, dividiert durch die Differenz aus höchstem und niedrigstem Teilton. Laut [Stoelinga and Lutfi, 2011] ist die JND durch $\Delta D = 0.3D$ für niedrige bis mittlere Modendichten gegeben. In Tabelle 2 und 3 werden die Modendichten für die jeweiligen Extreme der Plattenparameter aufgelistet.

D[Glas]	kompakt	stabförmig
klein	0.00344	0.00148
groß	0.00927	0.00407

Tabelle 2: Modendichten Glas

D[Holz]	kompakt	stabförmig
klein	0.00536	0.00228
groß	0.01166	0.00599

Tabelle 3: Modendichten Holz

Ein weiteres Merkmal zur Unterscheidung von Seitenverhältnissen sind Frequenzverhältnisse. Das effektive Seitenverhältnis entspricht dem ursprünglichen Seitenverhältnis, multipliziert mit dem Orthotropiefaktor Ω . Dieser entspricht 1 für isotrope Materialien wie Glas und 2 für das Material Holz.

Der Schalldruckpegel der Abstrahlung der Platte fällt unter der Grenzfrequenz f_c um circa -20dB pro Dekade ab (Formel f_c siehe Kap.2). f_c ist unabhängig von Länge und Seitenverhältnis und entspricht 1162Hz für Glas und 1763Hz für Holz. Da die tiefsten Resonanzfrequenzen der Plattenmoden darunterliegen, wurden sie herausgefiltert und waren nicht hörbar. Demzufolge war es für die Probanden kaum möglich,

die eigentlichen Intervallverhältnisse der einzelnen Moden herauszuhören, um das Seitenverhältnis der unbekannten Platte zu bestimmen. Dadurch könnte man sich die etwas besseren Ergebnisse für die Parametererkennung für Holz erklären, da die verwirrenden Frequenzen fehlten.

Wie in Abbildung 13 ersichtlich, können in Anwendungen zwei Parameterstufen zum Einsatz kommen. Mit zwei Stufen kann beim Material Glas mit einer Treffergenauigkeit von ungefähr 70% für Länge und 65% für Seitenverhältnis gerechnet werden. Für das Material Holz ergeben sich, für zwei Stufen, Genauigkeiten von ungefähr 80% für Länge und 75% für das Seitenverhältnis.

Wie in Tabelle 4 zu sehen, ergeben sich für manche Parameterkombinationen ähnliche Flächen. Beispielsweise entspricht die Fläche von (mittel/kompakt) in etwa der Fläche von (groß/länglich). Dies stellt das am häufigsten verwechselte Plattenpaar dar. Dieser Zusammenhang kann ebenfalls bei den in Tabelle 1 aufgelisteten Plattenpaaren beobachtet werden.

Fläche[m ²]	klein	mittel	groß
kompakt	0.083	0.147	0.260
länglich	0.052	0.089	0.157
stabförmig	0.030	0.054	0.095

Tabelle 4: Plattenflächen

4 Experiment 2: Identifikation von Material und Geometrie rechteckiger Platten anhand des Klangs

Im Unterschied zum 1. Hörversuch gilt es im 2. Versuch die Wahrnehmung bzw. Unterscheidbarkeit von Material und Seitenverhältnis von rechteckigen Platten - anhand von Hörbeispielen statt interaktivem Perkutieren - zu untersuchen. Der Versuch wurde als Online-Hörversuch durchgeführt und unter Verwendung der JavaScript Bibliothek jsPsych in HTML und CSS web-tauglich implementiert.

4.1 Versuchsaufbau als Online-Experiment

Das Online-Experiment wurde als plattformunabhängige Website in JavaScript, HTML und CSS programmiert. Die einzigen Hilfsmittel, welche die Probanden benötigten, waren ein internetfähiges Gerät und Kopfhörer. Genutzt wurde die JavaScript Bibliothek jsPsych, mit der der Hörversuch modulweise programmiert wurde. Gehostet wurde der Online-Versuch auf der Hosting-Plattform cognition.run, welche den Probanden einen Link zur Teilnahme des Versuchs zur Verfügung stellte. Die generierten Daten wurden auf dem Server von cognition.run bis zur Auswertung zwischengespeichert.

4.2 Ablauf und Versuchspersonen

Um die Probanden auf den eigentlichen Hörversuch vorzubereiten, wurden zuerst die Plattenparameter einzeln vorgestellt und im Anschluss eine Trainingsmatrix zur Verfügung gestellt, bei der alle möglichen klanglichen Varianten miteinander verglichen werden konnten. In der Vorbereitungsphase gab es kein Zeitlimit. Es wurden die drei Plattenparameter Material, Geometrie und Dämpfung untersucht. Beim Parameter Material wurde zudem zwischen Nichtmetall und Metall unterschieden.

Der Hörversuch wurde in zwei Blöcke unterteilt. Bei einem Block wurden stark gedämpfte Klänge abgespielt, bei dem anderen Klänge mit schwacher Dämpfung. Die Reihenfolge der Blöcke wurde pro Teilnehmer randomisiert. Die Trainingsmatrix wurde vor jedem Block passend noch einmal in schwach und stark gedämpfter Version angeboten. Es wurden in randomisierter Reihenfolge pro Block jeweils 36 Klänge abgespielt, wobei jeder Klang zweimal vorkam. Den Probanden wurde ein Replay-Knopf zur Verfügung gestellt, um das gehörte Sample beliebig oft wiederholen zu können. Nach einer groben Unterscheidung zwischen Nichtmetall und Metall, galt es das dazugehörige Material und dessen Seitenverhältnis herauszufinden. Der Gesamtfortschritt des Versuchs wurde den Probanden mit einem Balken am oberen Bildschirmende angezeigt.

Als Versuchspersonen dienten beliebige Hörer. Der Versuch wurde in sozialen Medien und Nachrichtengruppen ausgeschrieben. Es nahmen hauptsächlich Studenten der TU-Graz teil. Es wurde keine Unterscheidung zwischen Geschlechtern getroffen. Zu Beginn des Hörversuchs wurde abgefragt, ob der Hörer sein eigenes Gehör als geschult bezeichnen würde oder nicht.

4.2.1 Grafische Benutzeroberfläche

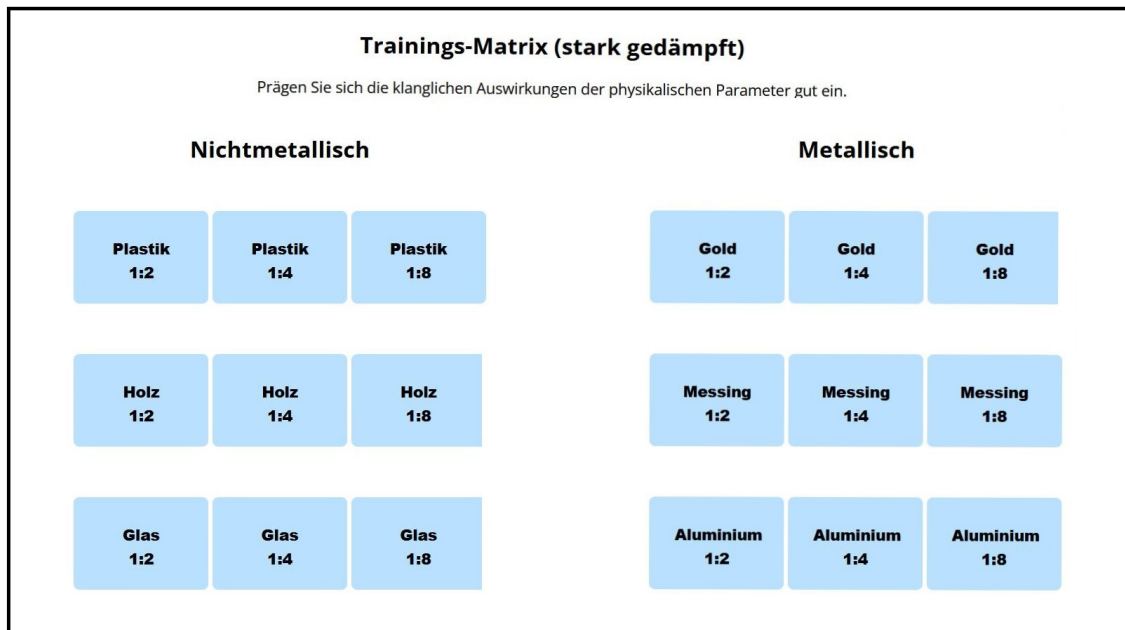


Abbildung 14: Trainings-Matrix


Replay

Nichtmetall oder Metall:

☐ Nichtmetall

☐ Metall

Material: (Nichtmetall / Metall)

☐ Plastik / Gold

☐ Holz / Messing

☐ Glas / Aluminium

Geometrie:

☐ kompakt (2:1)

☐ länglich (4:1)

☐ stabförmig (8:1)

Abbildung 15: Fragebogen Online-Hörversuch

4.3 Auswahl und Erstellung der Stimuli in Matlab

Die Stimuli für den Online-Hörversuch wurden im Rahmen der Dissertation von Marian Weger in der Software Matlab generiert und zur Verfügung gestellt. [Weger]

4.3.1 Plattenparameter Experiment 2

Aufgrund der Ergebnisse des ersten Experiments wurden folgende Parameter für den zweiten Versuch ausgewählt:

- Material
 - Nichtmetall
 - * Plastik
 - * Holz
 - * Glas
 - Metall
 - * Gold
 - * Messing
 - * Aluminium

- Geometrie
 - kompakt (2:1)
 - länglich (4:1)
 - stabförmig (8:1)
- Dämpfung
 - stark gedämpft
 - schwach gedämpft

4.4 Ergebnisse

Individuelle Ergebnisse der Teilnehmer Abbildung 16 zeigt die individuelle Performance der Versuchsteilnehmer für Metallizität, Material und Seitenverhältnis. Es wurde der Mittelwert der jeweiligen Parameter-Accuracy gebildet. Von diesem ausgehend wurde mit $\pm$ der doppelten Standardabweichung in beide Richtungen ein Rechteck aufgespannt, um etwaige Ausreißer zu identifizieren. Da kein Proband gravierend außerhalb der doppelten Standardabweichung lag, wurden alle Probanden als valide gewertet.

Die Gesamt-ACC ergibt sich aus dem Mittelwert der gewichteten einzelnen ACC's der jeweiligen Parameter und beträgt 0.541.

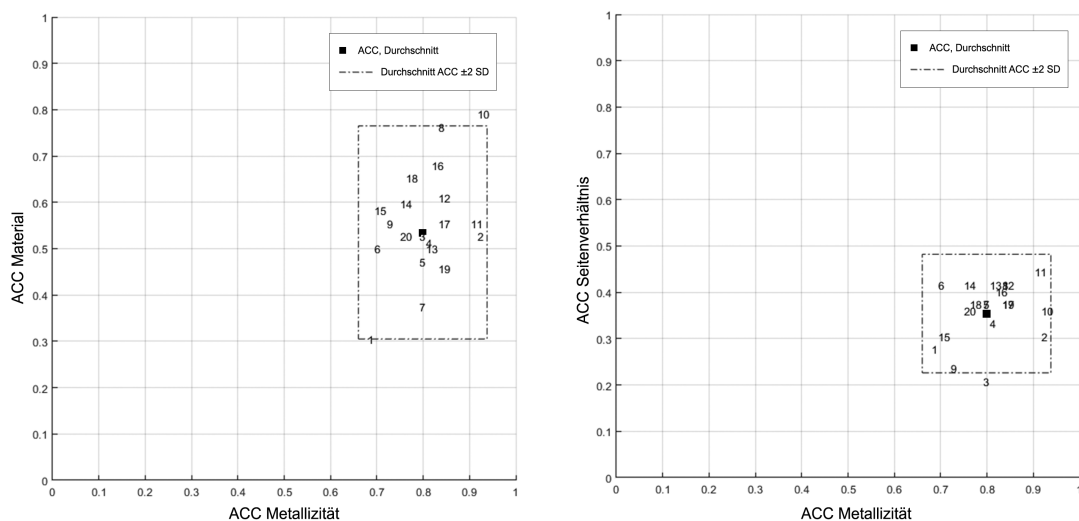


Abbildung 16: Ergebnisse der Teilnehmer, Material und Metallizität, Seitenverhältnis und Metallizität

Unterscheidung Metallizität Der erste Schritt für die Probanden war es, den gehörten Klang auf Nichtmetall oder Metall zu unterscheiden. Die Antworten für jeden vorgespielten Klang wurden in die Wahrheitsmatrix eingetragen. Tabelle 5 zeigt die Wahrheitsmatrix für die Metallizität der stark gedämpften Klänge. Tabelle 6 zeigt die Wahrheitsmatrix für die Metallizität der schwach gedämpften Klänge. In Tabelle 7 sieht man die kombinierte Wahrheitsmatrix der Metallizität für starke und schwache Dämpfung. Unter den Tabellen wird die jeweilige ACC und der Matthew's Korrelationskoeffizient (MCC) der Wahrheitsmatrix angeführt.

		geschätzt	
		Nichtmetall	Metall
wahr	Nichtmetall	293	67
	Metall	98	262

$$\text{ACC} = 0.771, \text{MCC} = 0.544$$

Tabelle 5: Wahrheitsmatrix für Metallizität, stark gedämpft

		geschätzt	
		Nichtmetall	Metall
wahr	Nichtmetall	299	61
	Metall	67	293

$$\text{ACC} = 0.822, \text{MCC} = 0.645$$

Tabelle 6: Wahrheitsmatrix für Metallizität, schwach gedämpft

		geschätzt	
		Nichtmetall	Metall
wahr	Nichtmetall	592	128
	Metall	165	555

$$\text{ACC} = 0.797, \text{MCC} = 0.594$$

Tabelle 7: Wahrheitsmatrix für Metallizität, stark und schwach gedämpft

Unterscheidung Material Bei der Unterscheidung der Materialien schnitten die Nichtmetalle ($\text{ACC} = 0.610$, $\text{MCC} = 0.479$) deutlich besser ab als die metallischen Materialien ($\text{ACC} = 0.362$, $\text{MCC} = 0.147$). In der Gruppe der Nichtmetalle wurde Glas am häufigsten gewählt, in der Gruppe der Metalle Aluminium.

Tabelle 8 und 9 zeigen die Wahrheitsmatrizen für die Materialien der Gruppen Nichtmetall und Metall. Stark und schwach gedämpfte Klänge wurden nicht separat angeführt, da sich die Ergebnisse nur geringfügig unterschieden. In Tabelle 10 ist die

6x6 Wahrheitsmatrix aller Materialien angeführt. Die häufigsten Verwechslungspaare waren Gold/Messing ($P = 0.344$), Aluminium/Glas ($P = 0.302$) sowie Holz/Plastik ($P = 0.263$).

		geschätzt		
		Plastik	Holz	Glas
wahr	Plastik	134	65	12
	Holz	61	141	23
	Glas	25	17	114

$$ACC = 0.610, MCC = 0.479$$

Tabelle 8: Wahrheitsmatrix Material, Nichtmetall, stark und schwach gedämpft

		geschätzt		
		Gold	Messing	Aluminium
wahr	Gold	101	89	35
	Messing	76	85	51
	Aluminium	16	43	59

$$ACC = 0.362, MCC = 0.147$$

Tabelle 9: Wahrheitsmatrix Material, Metall, stark und schwach gedämpft

		geschätzt					
		Plastik	Holz	Glas	Gold	Messing	Aluminium
wahr	Plastik	134	65	12	8	4	17
	Holz	61	141	23	4	2	9
	Glas	25	17	114	19	18	47
	Gold	6	1	8	101	89	35
	Messing	5	1	22	76	85	51
	Aluminium	10	14	98	16	43	59

Tabelle 10: Wahrheitsmatrix für alle Materialien, stark und schwach gedämpft

Unterscheidung Seitenverhältnis Die ACC aller Seitenverhältnisse beträgt 0.360, der dazugehörige MCC 0.040. Es wurden beide Dämpfungen gemeinsam betrachtet, da sich die Ergebnisse kaum unterschieden. Am häufigsten miteinander verwechselt wurden die Dimensionen länglich und stabförmig ($P = 0.430$), gefolgt von kompakt mit stabförmig ($P = 0.277$).

		geschätzt		
		kompakt	länglich	stabförmig
wahr	kompakt	229	90	161
	länglich	153	117	210
	stabförmig	105	203	172

$$\text{ACC} = 0.360, \text{MCC} = 0.040$$

Tabelle 11: Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis, stark und schwach gedämpft

Tabellen 12, 13 und 14 zeigen die Wahrheitsmatrizen für die Seitenverhältnisse der einzelnen Materialpaare Plastik/Gold, Holz/Messing und Glas/Aluminium.

		geschätzt		
		kompakt	länglich	stabförmig
wahr	kompakt	90	24	46
	länglich	65	27	68
	stabförmig	48	48	64

$$\text{ACC} = 0.377, \text{MCC} = 0.067$$

Tabelle 12: Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis, Plastik/Gold, stark und schwach gedämpft, gepooled über Teilnehmer

		geschätzt		
		kompakt	länglich	stabförmig
wahr	kompakt	78	35	47
	länglich	41	43	76
	stabförmig	27	70	63

$$\text{ACC} = 0.383, \text{MCC} = 0.075$$

Tabelle 13: Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis, Holz/Messing, stark und schwach gedämpft, gepooled über Teilnehmer

		geschätzt		
		kompakt	länglich	stabförmig
wahr	kompakt	61	31	68
	länglich	47	47	66
	stabförmig	30	85	45

$$\text{ACC} = 0.319, \text{MCC} = -0.022$$

Tabelle 14: Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis, Glas/Aluminium, stark und schwach gedämpft, gepooled über Teilnehmer

Plattenverwechslungen Tabelle 15 zeigt die absoluten Plattenverwechslungen der 15 häufigsten Verwechslungspaare. Als Verwechslung wird hier das Vertauschen einer Platte mit Parametern X mit einer Platte mit den Parametern Y und umgekehrt bezeichnet. Die Verwechslungswahrscheinlichkeit P ergibt sich aus der Anzahl der stattgefundenen Verwechslungen, dividiert durch die Summe der Abfragen dieser Platten. Am häufigsten wurden die Platten Holz/länglich und Holz/stabförmig ($P = 0.331$), gefolgt von Glas/länglich und Glas/stabförmig ($P = 0.306$) verwechselt. Am dritthäufigsten war die Verwechslung zwischen Glas/länglich und Aluminium/-stabförmig ($P = 0.213$).

Kombination	P
Holz/länglich - Holz/stabförmig	0.331
Glas/länglich - Glas/stabförmig	0.306
Glas/länglich - Aluminium/stabförmig	0.213
Plastik/länglich - Plastik/stabförmig	0.206
Messing/länglich - Messing/stabförmig	0.175
Plastik/kompakt - Plastik/länglich	0.169
Gold/stabförmig - Messing/stabförmig	0.163
Gold/kompakt - Messing/kompakt	0.156
Aluminium/länglich - Aluminium/stabförmig	0.156
Plastik/kompakt - Plastik/stabförmig	0.150
Plastik/stabförmig - Holz/länglich	0.150
Glas/kompakt - Aluminium/kompakt	0.150
Messing/kompakt - Aluminium/kompakt	0.144
Gold/kompakt - Gold/stabförmig	0.144
Messing/kompakt - Gold/länglich	0.138

Tabelle 15: Absolute Plattenverwechslungen

ACC bei starker und schwacher Dämpfung Die Unterschiede der erreichten ACC zwischen stark und schwach gedämpften Platten fielen gering aus, wobei die ACC bei schwach gedämpften Platten immer geringfügig besser ausfiel. Die Differenzen der ACC's waren für Metallizität $\Delta ACC = 0.051$, für Material $\Delta ACC = 0.044$ und für Seitenverhältnis $\Delta ACC = 0.033$.

4.5 Diskussion

Einer der simpelsten Zusammenhänge könnte jener zwischen ACC und der Anzahl der Klangwiederholungen sowie der durchschnittlichen Dauer der Versuchstrials pro Proband sein.

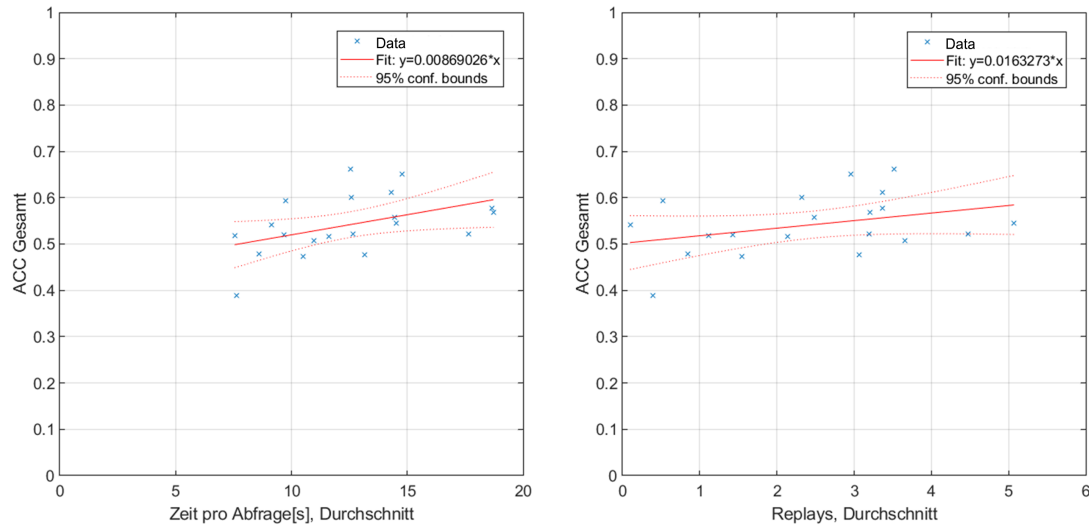


Abbildung 17: Ergebnisse der Teilnehmer, Gesamt-ACC vs. Zeit und Replays

Abbildung 17 zeigt in der linken Grafik die Ergebnisse der ACC der einzelnen Teilnehmer, wenn diese mit der Durchschnittszeit des Teilnehmers pro Versuchsdurchgang geplottet werden. In der rechten Grafik sieht man die ACC mit der Anzahl der Wiederholungen des Versuchsklanges geplottet, die der Proband im Durchschnitt benötigte. Man würde vermuten, dass die Probanden sowohl mit steigender Versuchsdauer sowie öfteren Klangwiederholungen geringfügig bessere Ergebnisse erzielen würden. Bei beiden Untersuchungen ließ sich jedoch kein Zusammenhang feststellen.

Verwechslung der Materialien Ein Grund für die häufigen Verwechslungen der Materialien Gold/Messing könnte sein, dass viele der Probanden im Alltag kaum oder gar nicht mit dem Klang von echten Gold- oder Messingplatten konfrontiert werden. Die Materialpaare (Plastik/Gold, Holz/Messing und Glas/Aluminium) unterscheiden sich untereinander in erster Linie in der Grundfrequenz. Innerhalb eines Materialpaars besitzen die Materialien die gleiche Grundfrequenz. Besser gelang den Probanden, eine Unterscheidung zwischen Aluminium und den anderen metallischen Materialien, da sie mit dem Klang von Aluminium wahrscheinlich vertrauter waren.

Das am zweithäufigsten verwechselte Materialpaar war Glas/Aluminium. Dies lässt

sich durch die Klangsynthese erklären, bei welcher für die beiden Materialien dieselben Frequenzverhältnisse genutzt wurden. Der Unterschied der Klänge liegt lediglich in der Dämpfung, wobei bei dem Metall Aluminium die thermoelastische und bei dem Nichtmetall Glas die viskoelastische Dämpfung überwiegt. Da die Modenfrequenzen der beiden Materialien, aufgrund der eher geringen Dichte im hochfrequenten Bereich liegen, wird es den Probanden zusätzlich erschwert, den für die Unterscheidung wichtigen Dämpfungsverlauf hören zu können. Es fallen nur wenige Obertöne (bzw. höhere Modenfrequenzen) bei Materialien mit geringer Dichte in den hörbaren Bereich unter 20kHz.

Verwechslung der Seitenverhältnisse Es wird angenommen, dass in erster Linie die Modendichte als charakteristisches Merkmal zur Unterscheidung der Seitenverhältnisse von den Probanden herangezogen wurde. Bei höheren Grundfrequenzen von Materialien, bedingt durch ihre niedrigere Dichte, war die Unterscheidung nahezu nicht möglich. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass die Modendichte im hörbaren Frequenzbereich so gering war, dass die Unterscheidung der Seitenverhältnisse bei Platten aus Materialien mit hoher Grundfrequenz, nicht mehr erkennbar war. Lag die Grundfrequenz generell in tieferen Frequenzbereichen, wie etwa bei den Materialpaaren Plastik/Gold und Holz/Messing, war die Abschätzung des Seitenverhältnisses zumindest begrenzt möglich.

Geschulte vs. ungeschulte Hörer Es könnte angenommen werden, dass die Hörer, die sich selbst als geschult bezeichneten, bessere Ergebnisse erzielen würden als die Hörer, die sich als ungeschult bezeichneten. In der Auswertung der Ergebnisse zeigte sich nur ein geringer Unterschied in der gesamten gewichteten ACC (geschult $ACC = 0.607$, ungeschult $ACC = 0.571$). Das könnte man auf die, vor dem eigentlichen Versuch stattgefundenen Trainings, zurückführen, bei denen allen Probanden die gleichen Möglichkeiten zur Verfügung standen, sich auf den Versuch vorzubereiten und mit den Klängen vertrauter zu werden. Bei der Unterscheidung der Materialien jedoch lag der Unterschied der ACC zwischen geschulten ($ACC = 0.579$) und ungeschulten ($ACC = 0.491$) Hörern bei 8.9%. Ein plausibler Grund für den Unterschied der ACC zwischen geschulten und ungeschulten Hörern wäre, dass die geschulten Hörer eine bessere Fähigkeit zur Schätzung der absoluten Tonhöhe besitzen, welche zum Erkennen des Materials relevant ist.

Konsistenz der Probanden Die Konsistenz der Probanden wird durch den Matthews's Korrelationskoeffizienten impliziert betrachtet, dessen Ergebnis sich immer zwischen -1 und 1 befinden muss. 0 würde zufällige Antworten bedeuten und -1

würde auf eine konsistent gegensätzliche Entscheidung der Probanden hindeuten. In Abbildung 18 ist aufgrund des linearen Zusammenhangs von ACC und MCC ersichtlich, dass die Probanden, wenn sie konsistent antworten, auch konsistent richtig antworten, da der MCC bei konsistent falschen Antworten negativ sein müsste.

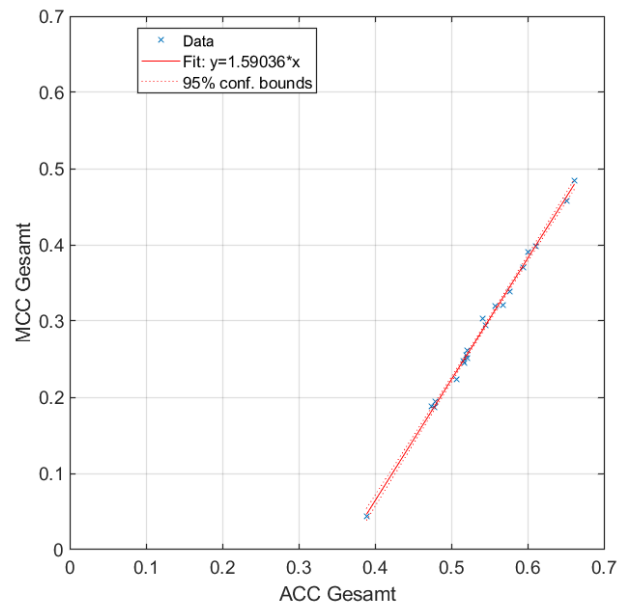


Abbildung 18: Ergebnisse der Teilnehmer, ACC vs MCC

Eine mögliche Fehlerquelle für das Experiment könnten die benutzten Kopfhörer der Probanden sein, allerdings sollten selbst günstige Kopfhörer in der Lage sein, die für den Versuch benötigten Frequenzen abzubilden.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

In dieser Arbeit wird untersucht, wie viel Information man akustisch aus einer rechteckigen Platte entnehmen kann, um diese für diverse Anwendungen nutzen zu können. Dafür wurden zwei aufeinander folgende Experimente durchgeführt, um die Unterscheidungsgenauigkeit der klanglichen Parameter Fläche, Metallizität, Material und Seitenverhältnis im Genaueren zu untersuchen.

Aus dem ersten Experiment wird ersichtlich, dass die Probanden bei der Unterscheidung der Länge (entsprechend der Fläche) und dem Seitenverhältnis nicht feiner als in jeweils zwei Stufen auflösen können. Bei der Unterscheidung des Seitenverhältnisses ist dies ebenfalls in Experiment 2 erkennbar.

In Experiment 1 wird der Parameter Länge bei Holz im Sinne einer Hysterese über- bzw. unterschätzt. Dies kann folgende Gründe haben: Eine absolute Schätzung für klangliche Parameter ist meist schwieriger zu treffen, als die Tendenz der Veränderung des Klangs. Deshalb wird die Richtung der Änderung meist richtig geschätzt, das genaue Ausmaß hingegen ist für die Hörer schwieriger zu identifizieren. Dies ist bei frei einstellbaren Parametern jedoch zu erwarten.

Die gleichzeitige Verwendung der Materialien Messing und Gold - in Anwendung einer Sonifikation - erscheinen ungünstig zu sein, da es häufig zu Verwechslungen kommt. Ebenfalls sind sich Aluminium und Glas in ihren Materialparametern sehr ähnlich, sodass sie, bei im Alltag üblichen Plattengrößen und -dicken, schlecht voneinander unterscheidbar sind. Dahingegen können die im Experiment untersuchten Materialien der Gruppe der Nichtmetalle deutlich besser voneinander differenziert werden und können somit in der Sonifikation gemeinsam Anwendung finden.

Da sich die Ergebnisse der geschulten sowie ungeschulten Hörer kaum unterscheiden, könnte davon ausgegangen werden, dass Sonifikation, so wie sie im zweiten Experiment verwendet wurde, für Hörer unabhängig ihrer Gehörschulung geeignet ist. Das dürfte insbesondere dann zutreffen, wenn ein ausführliches Vortraining stattfindet. Diese Vermutung müsste in einem weiteren Experiment untersucht werden, in dem man eine Gruppe von Probanden im Vorhinein ein Training durchführen lässt und die andere Gruppe direkt mit dem Hörversuch startet.

Um die Forschungsfrage zu beantworten, wird die Fähigkeit, die Parameter zu unterscheiden, in Bit dargestellt. Dabei stellt die Unterscheidung zwischen Nichtmetall und Metall (viskoelastischer und thermoelastischer Dämpfungsverlauf), die Unterscheidung zwischen zwei Seitenverhältnissen (hohe und niedrige Modendichte) und die Unterscheidung zwischen zwei Materialien (hohe und niedrige Grundfrequenz), jeweils ein Bit dar. Man kann also sagen, dass in jedem Parameter circa 1 Bit Infor-

mation steckt. Mit den Parametern, die im zweiten Experiment verwendet wurden, kommt man somit auf eine Anzahl von 3 Bits, entsprechend $2^3 = 8$ verschiedenen Möglichkeiten. Dies würde mit dem von George A. Miller beschriebenen Phänomen übereinstimmen, welches besagt, dass Menschen die Fähigkeit haben, ungefähr sieben (plus oder minus zwei) Informationen gleichzeitig zu verarbeiten und somit auch zuordnen zu können. Miller [1956]

Rechteckige Platten sind also für Anwendungen geeignet, für die man ungefähr 3 Bit Information kodieren möchte. Für das in der Einleitung erwähnte Piepen beim rückwärts Einparken wären die Klopfgeräusche zwar den im Alltag vorkommenden Geräuschen näher, aber nur bedingt geeignet, da sie mehr Information als nötig beinhalten und somit dem Anwender zu viel Spielraum für Interpretation geben würden.

Möglicherweise fänden sich im medizinischen Bereich Anwendungen, für die mit Klopfgeräuschen mehrere Bit Information kodiert werden können. Zum Einen sind Mediziner mit der Praktik der Perkussion und den damit verbundenen Klängen bereits vertraut. Zum Anderen ist in komplizierten Situationen - wie beispielsweise bei medizinischen Eingriffen - die restliche Sensorik (taktil und visuell) bereits voll ausgelastet. Ein Beispiel für Sonifikation in der Medizin wäre die Monitorisierung der Herzfrequenz bei Operationen. Es könnten aber auch komplexere akustische Klopfgeräusche zur Anwendung kommen, um abstrakte digitale Informationen - zusätzlich zur visuellen Darstellung - intuitiv erfassen zu können.

Eine weitere zukünftige Arbeit könnte darin bestehen, andere Geometrien wie etwa Hohlkörper zu modellieren und im Anschluss zu untersuchen. Dazu stellt sich die Frage, ob das physikalische Modell, welches in dieser Arbeit zur Anwendung kommt, ebenfalls für dreidimensionale Objekte anwendbar wäre. Interessant wäre, die Veränderung des Klangs darzustellen, wenn das Volumen des Hohlraumes mit verschiedenen Inhalten wie etwa Luft oder Flüssigkeiten gefüllt wird. Dies würde, vor allem im medizinischen Kontext, sinnvoll erscheinen, da der menschliche Körper aus einer Vielzahl von Hohlsystemen mit verschiedenen Inhalten besteht.

Wie sich zeigt, lassen sich mit Sonifikation durch Perkussion eine Fülle von Anwendungen realisieren. Diverse Möglichkeiten für weitere Forschung werden damit eröffnet.

Abbildungsverzeichnis

1	Schematische Darstellung von Schwingungsmoden	8
2	Schematische Darstellung von Schwingungsmoden einer quadratischen Platte	8
3	Behringer BCF-2000	16
4	Grafische Benutzeroberfläche passives Training Experiment 1	17
5	Grafische Benutzeroberfläche aktives Training Experiment 1	17
6	Grafische Benutzeroberfläche Experiment 1	18
7	Versuchsplatz Experiment 1	18
8	Ergebnis einzelner Probanden	20
9	Wahrheitsmatrix Parameterdimensionen	21
10	Wahrheitsmatrix Länge	22
11	Wahrheitsmatrix Seitenverhältnis	22
12	Sprungdiagramm	23
13	Anzahl unterscheidbarer Stufen in Abhängigkeit der Treffsicherheit .	24
14	Trainings-Matrix	28
15	Fragebogen Online-Hörversuch	29
16	Ergebnisse der Teilnehmer	30
17	ACC vs Replays und Zeit	35
18	ACC vs MCC	37
19	Klopfmuster Experiment 1	43

Literaturverzeichnis

- Antoine Chaigne and Vincent Doutaut. Numerical simulations of xylophones. i. time-domain modeling of the vibrating bars. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 101(1):539–557, 1997.
- Antoine Chaigne and Christophe Lambourg. Time-domain simulation of damped impacted plates. i. theory and experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 109(4):1422–1432, 2001.
- Antoine Chaigne, J. Kergomard, and Murray Campbell. *Acoustics of musical instruments*. Modern Acoustics and Signal Processing. ASA Press : Springer, New York, New York, 2016. ISBN 978-1-4939-3677-9. OCLC: ocn957693294.
- Lothar Cremer, M. Heckl, and B. A. T. Petersson. *Structure-borne sound: structural vibrations and sound radiation at audio frequencies*. Springer, Berlin ; New York, 3rd ed edition, 2005. ISBN 978-3-540-22696-3. OCLC: ocm57541302.
- Katharina Groß-Vogt, Marian Weger, Matthias Frank, and Robert Höldrich. Peripheral sonification by means of virtual room acoustics. *Computer Music Journal*, 44(1):71–88, 2020.
- Robert A. Lutfi and Christophe N. J. Stoelinga. Sensory constraints on auditory identification of the material and geometric properties of struck bars. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 127(1):350–360, January 2010. ISSN 0001-4966. doi: 10.1121/1.3263606. URL <http://asa.scitation.org/doi/10.1121/1.3263606>.
- Stephen McAdams, Vincent Roussarie, Antoine Chaigne, and Bruno L Giordano. The psychomechanics of simulated sound sources: Material properties of impacted thin platesa). *J. Acoust. Soc. Am.*, 128(3):13, 2010.
- ME McIntyre and J Woodhouse. On measuring the elastic and damping constants of orthotropic sheet materials. *Acta Metallurgica*, 36(6):1397–1416, 1988.
- George A Miller. The magical number seven, plus or minus two: Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 63(2):81, 1956.
- A Putra. Sound radiation from rectangular baffled and unbaffled plates. *Applied Acoustics*, page 13, 2010.
- Thomas D. Rossing, editor. *Springer handbook of acoustics*. Springer, New York, N.Y, 2007. ISBN 978-0-387-30446-5 978-0-387-33633-6. OCLC: ocm78989001.
- Christophe NJ Stoelinga and Robert A Lutfi. Discrimination of the spectral density of multitone complexes. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 130(5):2882–2890, 2011.
- WR Thurlow and S Bernstein. Simultaneous two-tone pitch discrimination. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 29(4):515–519, 1957.

- Philippe Troccaz, Roland Woodcock, and Frédéric Laville. Acoustic radiation due to the inelastic impact of a sphere on a rectangular plate. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 108(5):2197–2202, 2000.
- Neal F Viemeister and Deborah A Fantini. Discrimination of frequency ratios. *Auditory processing of complex sounds*, pages 47–56, 1987.
- GB Warburton. The vibration of rectangular plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 168(1):371–384, 1954.
- Marian Weger. *Plausible Auditory Augmentation of Physical Interaction*. unveröffentlichtes Manuskript, Kunstuniversität Graz, Graz.
- Lionel Zoghaib and Pierre-Olivier Mattei. Damping analysis of a free aluminum plate. *Journal of Vibration and Control*, 21(11):2083–2098, 2015.

Anhang

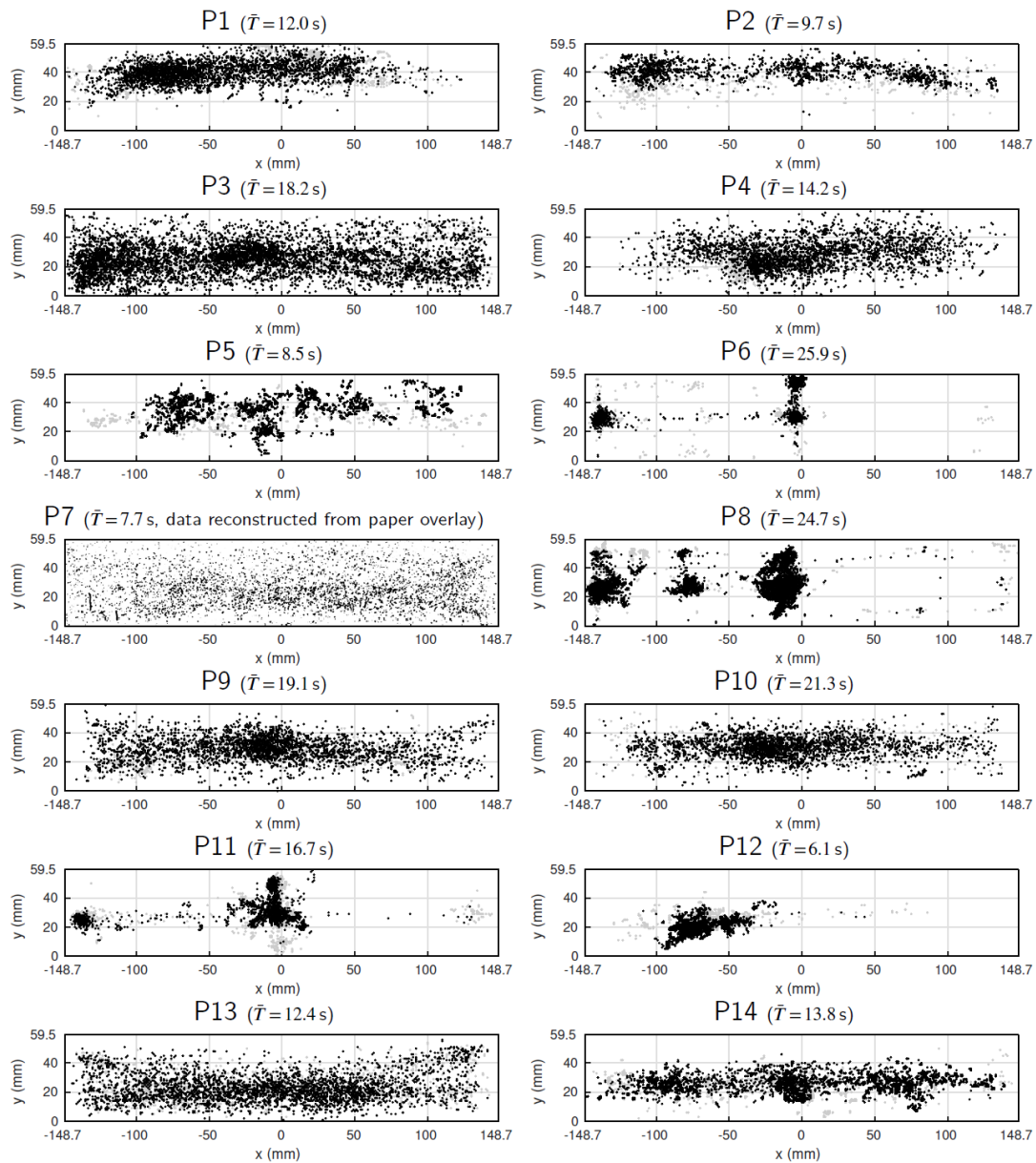


Abbildung 19: Klopfmuster der Probanden, Experiment 1

Link zum Quellcode, dem programmierten Plugin und den verwendeten Klängen des Online-Experiments in jsPsych:

<https://git.iem.at/s1473220/online-experiment-zum-informationsgehalt-rechteckiger-platten.git>