

---

BACHELORARBEIT

---

# ADAPTIVE ACOUSTICS

---

Entwurf und Herstellung von adaptiven Akustikpaneelen

durchgeführt am  
Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation  
TU Graz, Österreich

in Zusammenarbeit mit dem Institut für Architektur und Medien  
TU Graz, Österreich

von  
Christian Blöcher und Michael Sattler

Betreuerin:  
Dipl.-Ing. Jamilla Balint

Graz, 18. Oktober 2019



## 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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

20.10.2019

---

Graz, am

*Christian Stalter*

---

(Unterschrift)

*M. Seidl*

---

(Unterschrift)



## Abstract

Ziel dieser Arbeit war es, im Zuge des Seminars *Entwerfen spezialisierter Themen* mit dem Thema *Adaptive Acoustics*, neue Arten von akustisch wirksamen Paneelen zu entwerfen, welche durch mechatronische Steuerung ihre Form und zugleich ihre akustischen Eigenschaften verändern können. Das Seminar ist eine Zusammenarbeit der Studierenden der Studiengänge Architektur und Elektrotechnik-Toningenieur, sowie Mitarbeitern des Instituts für Architektur und Medien und des Instituts für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der TU Graz. Um den Architekturstudenten grundlegende Aspekte der Akustik und Schallausbreitung näherzubringen und somit die Zusammenarbeit der zwei Disziplinen zu erleichtern, wurde außerdem eine Schallreflexionssimulation im CAD-Programm *Rhinoceros 3D* mit Hilfe des Plugins *Grasshopper* entworfen. Diese Simulation soll die verschiedenen Reflexionsarten von Schall abhängig von der Geometrie von Objekten, der Frequenz der Schallquelle sowie die frequenz- und materialabhängige Absorption mittels Schallstrahlenbetrachtung nachvollziehbar visuell darstellen. Ein weiterer Teil der Arbeit behandelt die Messung und den Vergleich der akustischen Eigenschaften der von den Studierenden entworfenen Paneelmodelle und verschiedener Arten von Lochplatten. In weiterer Folge kann so unter Verwendung dieser Paneele bei der Sanierung zweier Hörsäle an der TU Graz eine adaptive Akustik entstehen, die sich, je nach Verwendungszweck des Raumes, den gewünschten Anforderungen an Nachhallzeit, Sprachverständlichkeit und anderen akustischen Gütemaßen so gut wie möglich anpassen kann.

The aim of this thesis was to design new kinds of acoustic panels which are able to change their form and therefore their acoustic characteristics through mechatronical control. This was conceived to be part of the seminar *Design of Specialised Topics* with the topic *Adaptive Acoustics*. During the seminar architecture students and audio-engineering students worked in collaboration with the staff of the Institute of Architecture and Media and the Signal Processing and Speech Communication Laboratory of the University of Technology Graz. In order to assist the architecture students in acquiring a basic understanding of acoustics and sound propagation and thereby facilitate the cooperation between the two disciplines a sound reflection simulation was created using the CAD-program *Rhinoceros 3D* and its plugin *Grasshopper*. This learning tool demonstrates basic acoustic phenomena during sound reflection - such as diffraction, scattering, and frequency-dependent absorption - through ray-tracing techniques. Another part of the thesis consists of the measurement and comparison of the acoustic properties of panel models and different kinds of perforated plates designed by the students. After the construction of the panels is finished they are planned to be installed inside two lecture halls at the University of Technology Graz. The adaptive acoustics will then allow to adjust acoustic characteristics of the room including reverberation time, speech intelligibility and other acoustic quality criteria to fit different kinds of usage.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>7</b>
1.1	Motivation . . . . .	8
1.2	Aufbau der Arbeit . . . . .	8
<b>2</b>	<b>Grundlagen und Theorie</b>	<b>9</b>
2.1	Schallabsorption . . . . .	9
2.1.1	Poröse Absorber . . . . .	10
2.1.2	Plattenschwinger . . . . .	11
2.1.3	Helmholtz-Absorber . . . . .	12
2.2	Schallreflexion . . . . .	13
2.2.1	Spiegelnde Reflexion . . . . .	14
2.2.2	Diffuse Reflexion . . . . .	14
2.2.3	Beugung . . . . .	15
2.3	Nachhallzeit und Hallraummessung . . . . .	15
2.4	Impedanzrohrmessung . . . . .	16
2.5	Raumanforderungen . . . . .	17
<b>3</b>	<b>Grasshopper Reflexions-Simulation</b>	<b>19</b>
3.1	Bestehende Akustiksimulationen in Grasshopper . . . . .	20
3.2	Reflexions-Simulation . . . . .	20
3.2.1	Schallstrahlenbetrachtung . . . . .	22
3.2.2	Simulation der Reflexionen . . . . .	22
3.2.3	Darstellung der Absorption . . . . .	25
<b>4</b>	<b>Vorstellung der Paneelentwürfe</b>	<b>27</b>
4.1	Schnittmuster . . . . .	27
4.2	Wellenpaneel . . . . .	27
4.3	Kastenpaneel . . . . .	28
4.4	Klappenförmiges Muschelpaneel . . . . .	29
4.5	Deckenvorhänge . . . . .	29
4.6	Waben- und Dreiecksstruktur . . . . .	30
4.7	Holzklappen . . . . .	30
4.8	Rahmen . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Messung der Modelle im 1:10 Hallraum und Impedanzrohr</b>	<b>33</b>
5.1	Messung des Absorptionsgrades im 1:10 Hallraum . . . . .	33
5.1.1	Messablauf . . . . .	34
5.1.2	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	34
5.2	Messung des Absorptionsgrades von Lochplattenmustern im Impedanzrohr . . . . .	42
5.2.1	Messaufbau . . . . .	43
5.2.2	Auswertung der Messergebnisse . . . . .	44
<b>6</b>	<b>Fazit</b>	<b>49</b>
<b>A</b>	<b>Anhang zu Kapitel 3</b>	<b>52</b>
<b>B</b>	<b>Anhang zu Kapitel 4</b>	<b>55</b>



# 1

## Einleitung

Die Raumakustik von Hörsälen in Bildungseinrichtungen steht grundsätzlich vor einigen Herausforderungen. Oftmals wird schon beim Bau der Räume nicht an die Konsequenzen von Raumabmessungen, Wandstrukturen und Oberflächenmaterialien und der daraus resultierende Akustik gedacht.

Dies führt speziell in einigen Räumlichkeiten der TU Graz dazu, dass Säle, die grundsätzlich mit den neuesten Technologien für Vorträge und Unterricht ausgestattet sind, äußerst ungerne und selten von DozentInnen benutzt werden, da die Akustik die Kommunikation zwischen Studierenden und Vortragenden erschwert sowie eine mindest notwendige Sprachverständlichkeit einfach nicht gegeben ist.

Ein weiteres Problem stellen die verschiedenen Nutzungszwecke in einem einzigen Raum dar. So sollen zum Beispiel manche Hörsäle vormittags noch für eine Übung genutzt werden, bei welcher die Kommunikation zwischen den Studierenden eine wichtige Rolle spielt. Nachmittags soll dann aber eine Vorlesung stattfinden, bei welcher der/die Vortragende besonders gut verstehbar sein muss und der Geräuschpegel aus dem Auditorium durch die Raumakustik nicht unnötig verstärkt werden soll. Diese Mehrfachnutzung verlangt idealerweise nach verschiedenen akustischen Optimalwerten der Nachhallzeit und der raumakustischen Gütemaße. In vielen Konzertsälen findet man aus ähnlichen Gründen eine variable Raumakustik vor, welche durch die TechnikerInnen vor den Vorstellungen manuell, zum Beispiel durch Drehen von Wänden oder Öffnen von Vorhängen, abgeändert werden kann. Solche Konzepte sind grundsätzlich eine gute Lösung, doch ist es in der Praxis schwierig, Lehrpersonal oder Studierenden vor jeder Lehrveranstaltung zuzumuten, die Raumakustik selbstständig anzupassen.

Wie im ersten Absatz bereits erwähnt, wird von ArchitektInnen oder BaumeisterInnen selten Wert auf die Akustik der zu konstruierenden Räumen gelegt. Während in der Architektur der Fokus bei der Raumplanung auf den optisch-ästhetischen Aspekten und einem daraus resultierenden Wohlbefinden der Personen im Raum liegt, wird leider allzu oft auf den psychologischen Einfluss einer schlechten Raumakustik vergessen. Aus diesem Grund muss dann oftmals im Nachhinein von AkustikerInnen eine Sanierung vorgenommen werden. Die Akustik kann so zwar durch Einbringen zweckmäßiger Materialien im Raum verbessert werden, jedoch sind diese „technischen“ Lösungen ästhetisch alles andere als ansprechend. Dieser Umstand führt wiederum dazu, dass sich ArchitektInnen der Verbesserung der Optimierung der Akustik in den von ihnen mit Sorgfalt entworfenen Räumen verweigern.

## 1.1 Motivation

Eine positive Entwicklung der letzten Jahre ist, dass immer mehr ArchitektInnen Interesse an der Raumakustik zeigen. So wurde vom Institut für Architektur und Medien in Zusammenarbeit mit dem SPSC der TU Graz im Wintersemester 2018/19 ein Seminar angeboten, bei welchem die Architekturstudierenden durch künstlerisches Gestalten neue Strukturen für poröse Absorber entwickelt haben.

Im Sommersemester 2019 sollte nun in Zusammenarbeit mit Elektrotechnik-Toningenieur-Studierenden eine weitere Zusammenarbeit der Disziplinen Architektur und Akustik innerhalb des Seminars *Entwerfen spezialisierter Themen* mit dem Thema *Adaptive Acoustics* durchgeführt werden. Ziel dabei war es, einerseits den Architekturstudierenden grundlegende Prinzipien der Raumakustik näherzubringen, welche sie bei ihren Entwürfen und später auch bei der Ausübung ihres Berufs berücksichtigen sollten. Andererseits sollten Paneele entstehen, welche durch mechatronische Steuerung von Servomotoren mit einem *Arduino* Mikrocontroller ihre Form beziehungsweise Oberflächenstruktur in einer Weise verändern können, sodass sich ihre äquivalente Absorptionsfläche verändert. Dadurch kann durch Anbringung der Paneele im Raum eine Änderung der Nachhallzeit je nach Verwendungszweck realisiert werden. Durch Kopplung der Mikrocontroller an den Belegungsplan des Raums könnte außerdem eine automatische Steuerung der Motoren realisiert werden. Ein Hauptaugenmerk der Zusammenarbeit war es außerdem, die Paneele so zu gestalten, dass sie neben ihrem technischen Nutzen auch als Kunstobjekte zur Aufwertung des Raums betrachtet werden sollten.

## 1.2 Aufbau der Arbeit

Die Bachelorarbeit ist, dem Verlauf des Seminars entsprechend, chronologisch in mehrere Kapitel gegliedert.

### **Kapitel 1: *Einleitung***

In ebendiesem Kapitel wird auf die Thematik *Adaptive Acoustics* näher eingegangen und eine Gliederung der Arbeit geliefert.

### **Kapitel 2: *Grundlagen und Theorie***

Dieses Kapitel gibt einen Überblick über alle im Seminar verwendeten Formeln und Grundlagen der Raumakustik.

### **Kapitel 3. *Grasshopper Reflexions-Simulation***

Das Kapitel beschreibt den ersten Teil des Seminars, in welchem von den Toningenieursstudierenden versucht wurde, eine Simulation der Schallreflexion an geometrischen Objekten mittels des Softwareplugins *Grasshopper* im CAD-Programm *Rhinoceros3D* zu programmieren. Damit sollte ein direktes Antesten der akustischen Wirkung der im Programm entworfenen Modelle möglich gemacht werden.

### **Kapitel 4. *Vorstellung der Paneelentwürfe***

Dieses Kapitel zeigt die von den Studierenden entworfenen Konzepte zu verschiedenen adaptiven Akustikpaneelen.

### **Kapitel 5. *Messung der Modelle im 1:10 Hallraum und Impedanzrohr***

Hier wird dokumentiert, wie die Absorptionsgrade einiger Paneelmodelle in einem Miniaturhallraum bestimmt wurden. Außerdem wurden im Impedanzrohr verschiedene Lochplattenmuster vermessen und die Ergebnisse ausgewertet.

### **Kapitel 6. *Fazit***

Im abschließenden Kapitel werden sowohl die Probleme und Herausforderungen des Seminars beschrieben, als auch die Aussichten zur weiteren Vorgehensweise für die Finalisierung der Paneele diskutiert.

## 2

## Grundlagen und Theorie

Im Folgenden werden zunächst die fundamentalen akustischen Prinzipien der Absorption und Reflexion beschrieben, die die physikalische Grundlage der Überlegungen im Rahmen der Grasshopper Reflexions-Simulation (s. Kapitel 3) und der Funktionsweise der adaptiven Akustikpaneele (s. Kapitel 4) bilden. Außerdem werden die für das Messverfahren von Nachhallzeit und Absorptionsgrad im 1:10 Hallraum (s. Kapitel 5.1) und im Impedanzrohr (s. Kapitel 5.2) essentiellen Zusammenhänge erläutert und für die Dimensionierung der Paneele wichtige Raumparameter erörtert. Soweit nicht explizit anders angegeben, kann bei den folgenden Formeln und Gleichungen davon ausgegangen werden, dass beim Einsetzen für alle Formelzeichen immer die entsprechenden kohärenten Einheiten nach dem SI-System zu verwenden sind (z.B. Energie  $W$  in [J], Volumen  $V$  in [m<sup>3</sup>] oder Druck  $p$  in [Pa]).

## 2.1 Schallabsorption

Um in Räumen die Schallpegel zu senken und dadurch die Lärmbelastung zu verringern sowie die Nachhallzeit an anwendungsbezogene Soll-Werte anzupassen, werden Raumbegrenzungsflächen mit schallabsorbierenden Materialien ausgestaltet.

Treffen Schallwellen mit einer Gesamtschallenergie  $W_{hin}$  auf eine Oberfläche, so wird ein Teil  $W_{refl}$  reflektiert, während der andere Teil  $W_{abs}$  absorbiert wird [4]. Die Absorption setzt sich dabei aus dem Energieverlust  $W_{diss}$  durch Dissipation, wie z.B. Luftreibung im Inneren eines porösen Materials, und dem Energieverlust  $W_t$  durch Transmission zusammen. Aus dem Verhältnis von absorbierter Energie zu eintreffender Energie lässt sich der Absorptionsgrad  $\alpha$  berechnen, dessen Werte zwischen 0 und 1 liegen:

$$\alpha = \frac{W_{abs}}{W_{hin}} = \frac{W_{diss} + W_t}{W_{hin}} \quad (2.1)$$

Der Schallabsorptionsgrad wird in der Regel frequenzabhängig in Terz- oder Oktavbändern angegeben. Aus dem Produkt einer Oberfläche  $S$  mit ihrem Absorptionsgrad  $\alpha$  ergibt sich die äquivalente Absorptionsfläche  $A$ , die die gleiche Absorptionswirkung bei einem Absorptionsgrad  $\alpha = 1$  erzielt:

$$A = \alpha \cdot S \quad [\text{m}^2] \quad (2.2)$$

In der Regel werden Absorber an oder mit einem geringen Abstand parallel zu Raumbegrenzungsflächen angebracht. Durch einen gewissen Abstand lassen sich erhöhte Absorptionsgrade für jene Schallwellen erreichen deren Schnellemaximum sich genau an dem Ort des Absorbers befinden. Da sich ein Schnellemaximum ein Viertel der Wellenlänge von der schallharten Wand entfernt befindet, werden jene Frequenzen besser absorbiert, deren Wellenlänge viermal dem Abstand der Wand zum Absorber entspricht. Alle ganzzahligen Vielfachen dieser Frequenz haben

am selben Ort ebenfalls ein Schnellemaximum. Es gilt:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

$$d = \frac{\lambda}{4} \quad [\text{m}] \quad (2.4)$$

Dabei entspricht  $\lambda$  der Schallwellenlänge  $c$  der Schallgeschwindigkeit,  $f$  der Frequenz und  $d$  dem Abstand von der Wand zum Absorber.

Verwendet man jedoch eine Baffle-Deckenkonstruktion, die aus senkrecht in mehreren Reihen abgehängten Absorptionselementen besteht, lässt sich die äquivalente Absorptionsfläche pro planem Deckenflächenteilstück erhöhen. Der Absorptionsgrad eines Bafflesystems berechnet sich aus dem Absorptionsgrad der Bafflekonstruktion  $\alpha_{Bk}$  und dem der Decke  $\alpha_D$ , wobei der an der Decke reflektierte Schall die Baffles noch einmal durchschreitet, zu [10]:

$$\alpha = \alpha_{Bk} + \alpha_D(1 - \alpha_{Bk}) \quad (2.5)$$

Dabei hängt  $\alpha_{Bk}$  von der Anzahl der Baffleplatten  $n$ , vom Absorptionsgrad der einzelnen Baffleplatten  $\alpha_B$  und (anstatt vom bloßen Abstand  $a$ ) von dem auf die Plattenhöhe  $h$  bezogenen Abstand  $a' = \frac{a}{h}$  der Platten ab:

$$\alpha_{Bk} = 1 - \frac{\sqrt{1 + a'^2} - 1}{a'} - \frac{1}{a'} \sum_{n=1}^{\infty} (1 - \alpha_B)^n \cdot \left( \sqrt{1 + ((n-1)a')^2} + \sqrt{1 + ((n+1)a')^2} - 2\sqrt{1 + (na')^2} \right) \quad (2.6)$$

Technische Schallabsorber lassen sich anhand ihres Funktionsprinzips in zwei Kategorien einteilen: Poröse Absorber (z.B. offenporige Materialien), die für mittlere und hohe Frequenzen stark absorbierend wirken, und Resonanzabsorber (z.B. Plattenschwinger, Helmholtz-Absorber), die auf die schmalbandige Dämpfung tiefer bis mittlerer Frequenzen abgestimmt sind. Eine gleichmäßig absorbierende Wirkung über weite Teile des Hörbereichs lässt sich also nur durch eine Kombination der Prinzipien erzielen.

### 2.1.1 Poröse Absorber

Die absorbierende Wirkung offenporiger Materialien resultiert aus der Reibung, die Luftteilchen beim Schwingen innerhalb der porösen Struktur erfahren [4]. Die Porösität  $\sigma$  eines Materials ist das Verhältnis des Porenvolumens  $V_L$  zum betrachteten Gesamtvolumen  $V_{ges}$ :

$$\sigma = \frac{V_L}{V_{ges}} \quad (2.7)$$

Ist nicht das gesamte Luftvolumen an dem Absorptionsvorgang beteiligt, ergibt sich mit dem wirksamen Luftvolumen  $V_W$  der Strukturfaktor  $s > 1$  zu:

$$s = \frac{V_L}{V_W} \quad (2.8)$$

Aus der Druckdifferenz  $\Delta p$  vor und hinter dem porösen Absorber und der Geschwindigkeit der hindurchströmenden Luft  $v$  lässt sich der spezifische Strömungswiderstand  $R_s$  bestimmen:

$$R_s = \frac{\Delta p}{v} \left[ \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right] \quad (2.9)$$

Dieser sollte für eine optimale Absorptionswirkung zwischen  $1 \frac{\text{kPas}}{\text{m}}$  und  $3 \frac{\text{kPas}}{\text{m}}$  liegen, da sich für tiefere Werte eine zu geringe Luftreibung ergibt und ein höherer Strömungswiderstand zu einer Impedanzfehlanpassung für tiefe Frequenzen führt. Als von der Schichtdicke  $t$  entkoppelte Materialkenngröße wird der längenbezogene Strömungswiderstand  $r$  angegeben:

$$r = \frac{R_s}{t} \left[ \frac{\text{Pa} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.10)$$

Die Schichtdicke, ab der ein Absorptionsgrad von  $\alpha \geq 0,8$  erreicht wird, hängt von der Grenzfrequenz  $f_{0,8}$  ab:

$$t = \frac{4000}{f_{0,8}} \quad [\text{cm}] \quad (2.11)$$

Die Absorptionswirkung lässt sich schmalbandig zu tiefen Frequenzen hin erweitern, indem man den porösen Absorber mit einem Wandabstand  $d$  montiert, der genau einem Viertel der Wellenlänge der zusätzlich zu bedämpfenden Frequenz entspricht. Dort befindet sich bei der Reflexion an einer Begrenzungsfläche ein Schnelleximum, wodurch größere Reibungsverluste in den Poren ermöglicht werden. Auch möglichst viele freie Kanten können aufgrund von günstigen Beugungseffekten im diffusen Schallfeld die effektive Absorptionsfläche erhöhen und sogar gemessene Absorptionsgrade von  $\alpha > 1$  ermöglichen.

Werden poröse Absorber mit Lochplatten verkleidet, sinkt der Absorptionsgrad durch die Abdeckung vor allem für hohe Frequenzen. Das Lochflächenverhältnis  $\varepsilon$  beschreibt das Verhältnis der Lochfläche  $S_L$  zur Gesamtfläche  $S_{ges}$  der Platte:

$$\varepsilon = \frac{S_L}{S_{ges}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (2.12)$$

Die Halbwertsfrequenz  $f_{0,5}$  gibt abhängig vom Lochflächenverhältnis  $\varepsilon$  und der effektiven Plattendicke  $t_{eff}$  an, ab welcher Frequenz sich der ursprüngliche Absorptionsgrad des porösen Materials halbiert hat:

$$f_{0,5} = 1500 \cdot \frac{\varepsilon [\%]}{t_{eff} [\text{mm}]} \quad [\text{Hz}] \quad (2.13)$$

Die effektive Plattendicke beinhaltet dabei eine von der Lochform abhängige, beidseitige Mündungskorrektur  $2\Delta t$ .

### 2.1.2 Plattenschwinger

Plattenschwinger sind als Masse-Feder-System aus einer dünnen, frei schwingenden Platte und einem dahinter eingeschlossenen Luftvolumen konzipiert [4]. Sie wandeln in der Nähe ihrer Resonanzfrequenz  $f_0$  Energie der Schallschwingungen in Bewegungsenergie um. Diese berechnet sich

aus der flächenbezogenen Masse  $m'$  der Platte und dem Wandabstand  $d_L$  zu:

$$f_0 = 510 \cdot \frac{1}{\sqrt{m'[\text{kg}/\text{m}^2] \cdot d_L[\text{cm}]}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.14)$$

Damit die Platte schwingen kann, muss eine Mindestfläche von insgesamt ca.  $0,4\text{m}^2$  und Seitenlängen von mindestens  $0,5\text{m}$  frei von etwaigen einbaubedingten Fixierungen, wie z.B. Trägern, sein. Außerdem muss der Wandabstand  $d_L$  deutlich kleiner sein als die Resonanzfrequenz des Systems, damit die eingeschlossene Luft als akustische Feder wirken kann und die Platteneigenfrequenz nicht hervortritt. Er sollte jedoch eine Mindestgröße betragen, um ein breiteres Absorptionsmaximum zu ermöglichen. Es gilt:

$$\frac{\lambda_0}{100} < d_L < \frac{\lambda_0}{12} \quad [\text{m}] \quad (2.15)$$

Der Absorptionsgrad von  $\alpha = 0,3 \dots 0,5$  bei Resonanz halbiert sich bereits mit einer Oktave Abstand, was Plattenschwinger sehr schmalbandig macht. Füllt man den Hohlraum mit porösem Material, wie z.B. Mineralwolle, erhöht sich das Absorptionsmaximum auf  $\alpha = 0,6 \dots 0,8$ .

Will man Resonatoren auf höhere Resonanzfrequenzen abstimmen, verwendet man gelochte bzw. geschlitzte Platten. Bei Lochplattenschwingern wird nun nicht mehr die flächenbezogene Masse  $m'$  der schwingenden Platte betrachtet (s. Gleichung 2.14), sondern der Massenbelag  $m'_L$  der in den Löchern schwingenden Luft, der vom Lochflächenverhältnis  $\varepsilon$  und der mit einer Mündungskorrektur versehenen Plattendicke  $t_{eff}$  abhängt:

$$m'_L = \frac{0,12t_{eff}[\text{mm}]}{\varepsilon[\%]} \quad \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right] \quad (2.16)$$

### 2.1.3 Helmholtz-Absorber

Auch Helmholtz-Absorber basieren auf einem akustischen Resonanzsystem. In einer mit einem Loch versehenen Kiste bildet das eingeschlossene Luftvolumen  $V$  die akustische Feder, während die sich im Loch befindliche Luft die akustische Masse darstellt [4]. Wird das System mit Frequenzen angeregt, deren Wellenlängen kleiner sind als die Absorberabmessungen, entzieht der Absorber dem Schallfeld durch die entstehende Schwingung Energie. Die Resonanzfrequenz  $f_0$ , um die dieser Effekt am stärksten auftritt, kann aus dem Volumen  $V$ , der Halsquerschnittsfläche  $S$  und der mit einer Mündungskorrektur versehenen Halslänge  $t_{eff}$  berechnet werden:

$$f_0 = 170 \sqrt{\frac{S}{V \cdot t_{eff}}} \quad [\text{Hz}] \quad (2.17)$$

Die Dimensionierung kann dabei anhand von Konstruktionsdiagrammen zur einfachen Bestimmung von z.B. Halslänge und Lochanzahl bzw. -durchmesser in Abhängigkeit von der gewünschten Resonanzfrequenz ermittelt werden.

Füllt man den Resonatorhals mit einem Dämmstoff, lässt sich der Absorptionsgrad noch verbessern, wobei ein geeigneter spezifischer Strömungswiderstand  $R_s$  gewährleistet sein muss. Dieser berechnet sich aus der Halsquerschnittsfläche  $S$ , der Resonanzfrequenz  $f_0$  und dem Volumen

$V$  zu:

$$R_s = 2,2 \frac{S[\text{cm}^2]}{f_0 V[\text{dm}^3]} \left[ \frac{\text{kPa} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right] \quad (2.18)$$

Die äquivalente Absorptionsfläche  $A$  bei Resonanz lässt sich aufgrund der bekannten Dimensionierungsparameter (Halsquerschnittsfläche  $S$ , Volumen  $V$  und effektive Halslänge  $t_{eff}$ ) und des Anordnungsfaktors  $k = 1/2/4$  (je nach Montage an Wand/Kante/Ecke) wie folgt abschätzen:

$$A \approx 10^{-2} \cdot \sqrt{\frac{S[\text{cm}^2] \cdot V[\text{dm}^3]}{t_{eff}[\text{cm}]}} \cdot k \quad [\text{m}^2] \quad (2.19)$$

## 2.2 Schallreflexion

Neben den Absorptionseigenschaften sind durch die Größe und Struktur von Schallhindernissen auch deren Reflexionseigenschaften beeinflussbar, wodurch beispielsweise eine gezielte Lenkung des reflektierten Schalls oder ein breit gestreutes Abstrahlverhalten ermöglicht wird. Wird Schall an einer strukturierten Oberfläche reflektiert, unterscheidet man drei Reflexionsphänomene, deren Auftreten von der Wellenlänge  $\lambda$  des Schalls und der kleinsten Abmessung  $b$  der Struktur abhängt (s. Abbildung 2.1 und Tabelle 2.1) [4]:

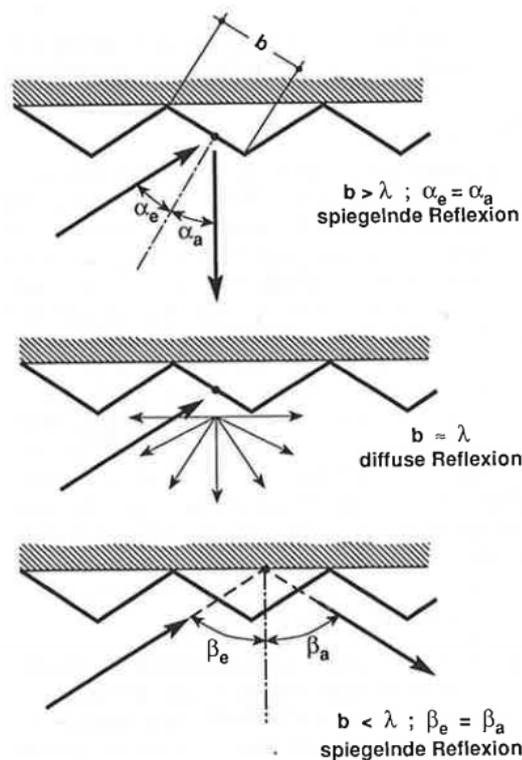


Abbildung 2.1: Darstellung der verschiedenen Reflexionsarten an einer strukturierten Oberfläche in [4]

$\lambda < \frac{b}{5}$	Spiegelnde, geometrisch gerichtete Reflexion an der Struktur
$\frac{b}{5} < \lambda < 5b$	Diffuse, ungerichtete Reflexion
$5b < \lambda$	Beugung der Schallwellen um die Struktur → spiegelnde Reflexion an der Grundfläche

Tabelle 2.1: Verschiedene Reflexionsarten in Abhängigkeit von Strukturabmessung  $b$  und Wellenlänge  $\lambda$ 

### 2.2.1 Spiegelnde Reflexion

Für die spiegelnde - bzw. geometrisch gerichtete - Reflexion an einem Hindernis, das groß gegenüber der Wellenlänge ist, lässt sich der Wellencharakter des Schalls vernachlässigen [4]. Betrachtet man die Schallausbreitung in sogenannten Schallstrahlen, kann analog zur Optik das Reflexionsgesetz (Einfallswinkel = Reflexionswinkel) angewandt werden. Reflektierte Schallstrahlen können mittels Spiegelschallquellen, die durch Spiegelung der ursprünglichen Schallquellen an der Reflexionsebene entstehen, konstruiert werden. Bei gekrümmten Flächen steht eine an die Beugung angelegte Tangente als Lot auf der Verbindungslinie zwischen Ursprungs- und Spiegelschallquelle. Es ergibt sich bei konkaven Flächen eine Schallbündelung, bei konvexen Flächen resultiert dagegen eine Streuung der reflektierten Schallstrahlen. Für eine genauere Betrachtung, ergibt sich unter Einbeziehung der Quell- und Hörabstände  $a_1$  und  $a_2$ , der Breite der Reflexionsfläche  $b$  und des Schalleinfallswinkels  $\alpha$  für die geometrisch gerichtete Reflexionserscheinung eine untere Grenzfrequenz  $f_u$ :

$$f_u \approx 700 \cdot \frac{a_1 a_2}{(b \cos \alpha)^2 (a_1 + a_2)} \quad [\text{Hz}] \quad (2.20)$$

### 2.2.2 Diffuse Reflexion

An einer strukturierten Oberfläche, bei der die Abmessungen der Struktur im Bereich der Wellenlänge liegen, wird Schall diffus gestreut reflektiert. Diffuse Reflexionen lassen sich durch folgende Größen beschreiben [4]:

- **Diffusitätsgrad:** Angabe der Gleichmäßigkeit der Schallstrahlenverteilung in alle Raumrichtungen von 0 (geometrische Reflexion) bis 1 (völlig gleichmäßige Verteilung).
- **Streugrad:** Angabe des Verhältnis von gestreuter Schallenergie ( $\pm 10^\circ$  von geometrischer Reflexion abweichend) zu Gesamtenergie von 0 (geometrische Reflexion) bis 1 (keine Energie in Richtung der geometrischen Reflexion).
- **Richtcharakteristik der Reflexionen:** Angabe des Schalldruckpegels in Abhängigkeit vom Abstrahlwinkel.

Zur Diffusion werden meist rechteckige, dreieckige oder Zylinderförmige Strukturen verwendet. Der praktisch höchste Diffusitätsgrad 0,8 entsteht dabei abhängig von der Strukturperiode  $g$  schmalbandig für  $\lambda \leq g \leq 2\lambda$  mit der Mittenfrequenz  $f_{0,8}$ :

$$f_{0,8} \approx \frac{500}{g} \quad [\text{Hz}] \quad (2.21)$$

Die Tiefe der Struktur  $d$  ergibt sich aus der Strukturbreite  $b$  mit  $\frac{g}{2} \leq b \leq g$  zu  $0,3b \leq d \leq 0,5b$ .

Diffuse Reflexionen lassen sich ebenfalls durch Schroeder-Diffusoren erzeugen. Deren Prinzip der  $\lambda/2$ -Transformation basiert auf einer Abstrahlrichtungsverschiebung durch Interferen-

erscheinungen. Diese entstehen, wenn Schallwellen an benachbarten, verschieden tiefen, quaderförmigen Hohlräumen zueinander phasenverschoben reflektiert werden. Die unterschiedlichen Strukturiefen werden dabei nach der mathematischen *Quadratic-Residue*-Folge bestimmt. Die maximale Hohlraumtiefe  $d_{max}$  ist aus der halben Wellenlänge der tiefsten diffus reflektierten Frequenz  $f_u$  ableitbar. Eine schallstreuende Wirkung kann außerdem durch akustische Impedanzsprünge an einer schachbrettartigen Anordnung aus abwechselnd absorbierenden und reflektierenden Flächen erzielt werden. Eine modifizierte Ausführung davon stellt ein Phasengitter aus in verschiedenen Frequenzbereichen wirksamen Absorbern dar.

### 2.2.3 Beugung

Ist ein Objekt klein gegenüber der Wellenlänge, wird die hinlaufende Welle um das Objekt gebeugt [8]. Das Hindernis ist also für Schall dieser Frequenz nicht sichtbar und eine Schallabschattung ist nicht mehr gegeben. Für eine strukturierte Oberfläche bedeutet das, dass bei relativ zur Wellenlänge kleinen Strukturabmessungen die Struktur nicht wirksam ist. Es erfolgt eine (geometrische gerichtete) Reflexion an der Basisfläche, auf der sich die Struktur befindet.

## 2.3 Nachhallzeit und Hallraummessung

Im Folgenden werden die benötigten Formeln zur Messung der Nachhallzeit und des Absorptionsgrades im Hallraum erläutert. Die Nachhallzeit  $T$ , die als die Dauer des Schallpegelabfalls um 60dB definiert ist [11], kann auf Basis zweier physikalischer Betrachtungen berechnet werden. Die Formel nach Sabine geht von dem Abfall der Energiedichte im Raum aus. Die Nachhallzeit kann so aus dem Raumvolumen  $V$ , der Schallgeschwindigkeit  $c$  und der gesamten, im Raum vorhandenen äquivalenten Absorptionsfläche  $A_{ges}$  bestimmt werden:

$$T_S = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot A_{ges}} \quad [\text{s}] \quad (2.22)$$

Diese Beziehung hat den Nachteil, dass für hohe Absorptionsgrade fälschlicherweise zu hohe Nachhallzeiten entstehen [3]. Dieser Missstand wird in der Nachhallformel nach Eyring, die auf dem mittleren Strahlenschicksal im Raum basiert, behoben. Sie bedient sich anstatt der äquivalenten Absorptionsfläche des mittleren Absorptionsgrads  $\bar{\alpha}_m$  sowie der gesamten Oberfläche des Raumes  $S_{ges}$  und berechnet sich mit:

$$T_E = -\frac{55,3 \cdot V}{c \cdot S_{ges} \cdot \ln(1 - \bar{\alpha}_m)} \quad [\text{s}] \quad (2.23)$$

Aus den Formeln von Eyring und Sabine lässt sich nun der mittlere Absorptionsgrad  $\bar{\alpha}_m$  berechnen:

$$\bar{\alpha}_{m,S} = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot T \cdot S_{ges}} \quad (2.24)$$

$$\bar{\alpha}_{m,E} = 1 - e^{\frac{-55,3 \cdot V}{S_{ges} \cdot c \cdot T}} \quad (2.25)$$

Die Nachhallzeit kann durch eine Messung bestimmt werden. Dabei wird an eine Abklingkurve eine Regressionsgerade in einem Bereich angelegt, in dem ein 60dB-Abfall stattfindet, und die Steigung berechnet. Ist der Signal-Rausch-Abstand so gering, dass kein 60dB-Abfall ermittelt

werden kann, wird die Nachhallzeit im Normalfall aus einem 20dB- bzw. 30dB-Abfall extrapoliert [8]. Den für das Aufzeichnen der Abklingkurve notwendigen stationären Schalldruck im Raum erreicht man, indem man beispielsweise ein Rauschsignal für einige Sekunden abspielt und nach anschließendem Abschalten des Signals den Pegelverlauf mit einem Mikrophon aufzeichnet. Die Messungen müssen dabei über mehrere Messpositionen und Abschaltvorgänge gemittelt werden, um vor allem bei tiefen Frequenzen unterschiedliche Abklingzeiten durch Raummoden auszugleichen [13].

Alternativ kann der Verlauf der Abklingkurve auch über die Rückwärtsintegration der quadrierten Raumimpulsantwort  $h$  berechnet werden:

$$E(t) = \int_t^{\infty} h^2(\tau) d\tau \quad (2.26)$$

Will man in einem Hallraum den Absorptionsgrad eines Absorbers bestimmen, führt man je eine Nachhallzeitmessung im leeren Hallraum und mit eingebrachtem Absorbermaterial durch und ermittelt aus den Abklingkurven  $T_{leer}$  und  $T_{Absorber}$  [16]. Nun lässt sich mit Hilfe der Sabineschen Nachhallformel (s. Gleichung 2.22) der gesuchte Absorptionsgrad  $\alpha_{Absorber}$  gemäß der betreffenden ÖNORM EN ISO 354 bestimmen. Um mögliche Schwankungen der Atmosphäraparameter, wie z.B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit, zu kompensieren, fließt ein Korrekturterm in die Berechnung mit ein, der das Raumvolumen  $V$  und den veränderlichen Luftabsorptionskoeffizienten  $m$  beinhaltet. Außerdem wird für jede Messung die Schallgeschwindigkeit  $c$  bestimmt:

$$\alpha_{Absorber,S} = \frac{55,3 \cdot V}{S_{Absorber}} \cdot \left( \frac{1}{c_{Absorber} T_{Absorber}} - \frac{1}{c_{leer} T_{leer}} \right) - 4V(m_{Absorber} - m_{leer}) \quad (2.27)$$

Sind die Atmosphärendaten konstant, entfällt der Korrekturterm und Gleichung 2.27 vereinfacht sich zu:

$$\alpha_{Absorber,S} = \frac{55,3 \cdot V}{c \cdot S_{Absorber}} \cdot \left( \frac{1}{T_{Absorber}} - \frac{1}{T_{leer}} \right) \quad (2.28)$$

Analog zur beschriebenen Vorgehensweise können auch Messungen in skalierten Modellhallräumen (s. Kapitel 5.1) durchgeführt werden. Diese werden von der ÖNORM EN ISO 354 jedoch nicht erfasst. Ebenfalls nicht in der ÖNORM EN ISO 354 enthalten aber genauso möglich ist die Bestimmung des Absorptionsgrads nach der Formel von Eyring (s. Gleichung 2.23). Auch hier wird von zwischen den Messungen unveränderten Atmosphärenbedingungen ausgegangen und es werden der entsprechende Korrekturterm und möglicherweise voneinander abweichende Schallgeschwindigkeiten nicht berücksichtigt:

$$\alpha_{Absorber,E} = \frac{S_{ges,leer}}{S_{Absorber}} \cdot \left( e^{-\frac{24 \cdot \ln(10) \cdot V}{c \cdot S_{ges,leer} \cdot T_{leer}}} - e^{-\frac{24 \cdot \ln(10) \cdot V}{c \cdot S_{ges,leer} \cdot T_{Absorber}}} \right) \quad (2.29)$$

## 2.4 Impedanzrohrmessung

Der Absorptionsgrad von Materialien bei senkrechtem Schalleinfall kann aus der Überlagerung von ebenen Wellen in einem Impedanzrohr bestimmt werden [15]. Befestigt man an einem Ende eines starren, glatten Rohres einen Lautsprecher und bringt am anderen Ende vor einem schallharten Abschluss eine Absorberprobe ein, ergeben sich bei Anregung mit einem breitbandigen

Messsignal durch die Überlagerung von hinlaufendem und reflektiertem Schall stehende Wellen. Nimmt man an zwei Messpunkten  $x_1$  und  $x_2$  mit Druckmikrofonen die Schalldrücke  $p_1$  und  $p_2$  auf, lässt sich unter Verwendung der Übertragungsfunktionsmethode aus deren Spektren  $\underline{p}_1$  und  $\underline{p}_2$  die Übertragungsfunktion  $\underline{H}_{12} = \frac{\underline{p}_2}{\underline{p}_1}$  zwischen den beiden Mikrofonpositionen aufstellen. Mit dieser lassen sich die hin- und rücklaufenden Wellenteile  $\underline{p}_h$  und  $\underline{p}_r$  beschreiben, aus denen der (komplexe) Schallreflexionsfaktor  $\underline{r}$  am Rohrende berechnet werden kann. Dabei entspricht unter der Berücksichtigung von Reibungsverlusten im Rohr  $\underline{k}_0 = k'_0 - jk''_0$  einer komplexen Wellenzahl:

$$\underline{r} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_h} = \frac{\underline{H}_{12} - e^{-jk_0(x_1-x_2)}}{e^{jk_0(x_1-x_2)} - \underline{H}_{12}} \cdot e^{2jk_0x_1} \quad (2.30)$$

Der gesuchte Absorptionsgrad  $\alpha$  der Probe ergibt sich dann zu:

$$\alpha = 1 - |\underline{r}|^2 \quad (2.31)$$

So kann der Absorptionsgrad für alle Frequenzen bestimmt werden, die im Spektrum des Messsignals enthalten sind.

Es sind jedoch geometriebedingte Grenzfrequenzen für den Messbereich zu beachten. Die obere Grenzfrequenz  $f_{oG}$  ergibt sich zum einen durch den Rohrdurchmesser  $d_R$  zum Verhindern der Wellenausbreitung entlang des Radius. Zum anderen muss der Abstand der Messpunkte  $d_M$  deutlich geringer als die kleinste Wellenlänge sein, um nicht den gleichen Schalldruck bei beiden Messpunkten abzutasten:

$$f_{oG} = \min\left(\frac{0,58 \cdot c}{d_R}; \frac{0,45 \cdot c}{d_M}\right) \quad [\text{Hz}] \quad (2.32)$$

Die untere Grenzfrequenz  $f_{uG}$  beruht auf dem Phasenfehler zwischen den beiden Drucksonden bei der Messung, weswegen ein Mindestphasenunterschied zwischen den Messpunkten vorhanden sein muss:

$$f_{uG} = \frac{c}{20d_M} \quad [\text{Hz}] \quad (2.33)$$

Der Messbereich lässt sich demnach durch zusammengesetzte Teilmessungen mit einer Variation des Messpunktabstands oder mit mehr als zwei fest montierten Mikrofonen gezielt erweitern.

## 2.5 Raumanforderungen

Um eine adaptive Akustik realisieren zu können, muss man sich zuerst bewusst machen, für welche Anwendungszwecke die jeweiligen Räumlichkeiten genutzt werden sollen. Denn je nach Nutzungsart ergeben sich unterschiedliche Soll-Nachhallzeiten.

Für die Nutzung als Seminarraum, in dem auch Gruppenarbeiten, bei denen viele Personen gleichzeitig reden, möglich sein sollen, ergibt sich die Soll-Nachhallzeit für Kommunikation für das Raumvolumen  $V$  zu[14]:

$$T_{Komm} = \left(0,32 \cdot \lg \frac{V}{[\text{m}^3]} - 0,17\right) \quad [\text{s}] \quad (2.34)$$

Wird ein Raum jedoch vorrangig für Vorträge konzipiert, ergibt sich entsprechend der Vorgaben für Sprach-Anwendung eine etwas längere Soll-Nachhallzeit:

$$T_{Sprache} = \left( 0,37 \cdot \lg \frac{V}{[\text{m}^3]} - 0,14 \right) \quad [\text{s}] \quad (2.35)$$

Wenn die adaptiv zu gestaltenden Räume bereits die Soll-Nachhallzeit für Sprache überschreiten, müssen zusätzlich zu adaptiv hinzuschaltbaren Absorptionsflächen auch fest installierte, immer wirksame Absorber angebracht werden. Mittels der Sabineschen Nachhallformel (s. Gleichung 2.22) lässt sich die fest einzubringende äquivalente Absorptionsfläche berechnen:

$$A_{fest} = \frac{55,3 \cdot V}{c} \cdot \left( \frac{1}{T_{Sprache}} - \frac{1}{T_{ist}} \right) \quad [\text{m}^2] \quad (2.36)$$

Analog dazu kann die als adaptiv zu gestaltende äquivalente Absorptionsfläche bestimmt werden, die zusätzlich zur Anpassung der Nachhallzeit für den Anwendungszweck Kommunikation eingebracht werden muss:

$$A_{adaptiv} = \frac{55,3 \cdot V}{c} \cdot \left( \frac{1}{T_{Komm}} - \frac{1}{T_{Sprache}} \right) \quad [\text{m}^2] \quad (2.37)$$

## 3

## Grasshopper Reflexions-Simulation

Zu Beginn des Seminars *Entwerfen spezialisierter Themen* mit dem Thema *Adaptive Acoustics* wurden alle TeilnehmerInnen in das *computer-aided-design*(CAD)-Programm *Rhino3D*, kurz *Rhino3D*, eingeführt. Dieses Programm erlaubt es, präzise 3D-Modelle von geometrischen Objekten, z.B. auch Absorbern und Diffusoren, zu gestalten. Mit Hilfe des Plugins *Grasshopper* ist es möglich, anstatt mit der grafischen Benutzeroberfläche (GUI) in *Rhino3D* verschiedene Befehle durch eine datenstromorientierte Programmiersprache, ähnlich wie Patches in der Audio-programmiersprache *Pure Data*, auszuführen. *Grasshopper* ermöglicht es relativ leicht, komplexe geometrische Strukturen zu entwerfen, ohne diese in der GUI mühevoll „zeichnen“ zu müssen, sowie die Objektparameter einfach zu modifizieren (s. Abbildungen 3.1 und 3.2).

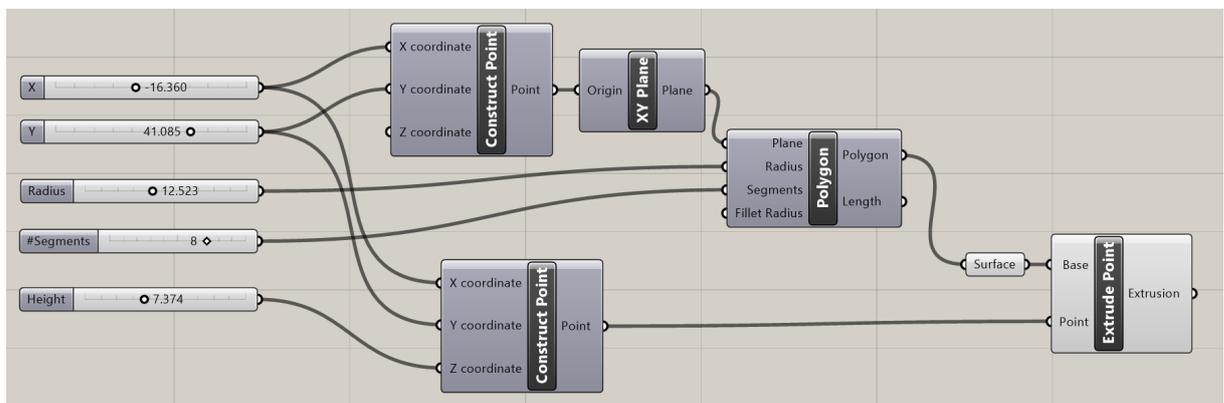


Abbildung 3.1: Parametrisierbare Definition einer Pyramide in Grasshopper

Es ist mit den in *Grasshopper* vorhandenen geometrischen Werkzeugen, der Listenverwaltung und den Logikbausteinen ebenfalls leicht möglich, mittels Linien, welche auf ein beliebiges Objekt treffen, Schallreflexionen grafisch darzustellen.

Um den KollegInnen des Studienganges Architektur die akustische Wirksamkeit ihrer entworfenen 3D-Modelle zu veranschaulichen, wurde nun ein Cluster in *Grasshopper* entwickelt, welcher eine vereinfachte Simulation der Reflexion von Schall an verschiedenen Objekten abhängig von ihren Dimensionen, ihrer Oberflächenstruktur, den verwendeten Materialien und der Frequenz der Schallquelle darstellen soll. Unter Rückbezug auf die in Kapitel 2.2 besprochenen akustischen Grundlagen wird die Umsetzung in *Grasshopper* in diesem Kapitel der Arbeit erläutert.

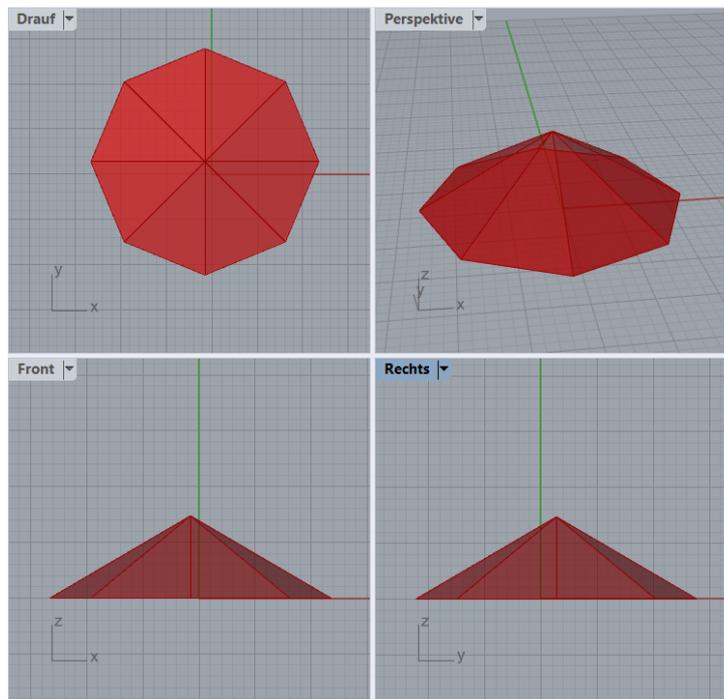


Abbildung 3.2: Darstellung der Pyramide in Rhino3D

### 3.1 Bestehende Akustiksimulationen in Grasshopper

In der Akustik wird *Grasshopper* hauptsächlich verwendet, um eine Brücke zwischen der geometrischen akustischen Planung und dem visuell-gestalterischen Ansatz von KünstlerInnen und ArchitektInnen zu schaffen [12]. Der Vorteil liegt dabei an der einfachen Parametrisierbarkeit von als mathematische Funktionen definierten Flächen (NURBS-Geometrie) [2] und dem sofortigen, bildlichen Feedback der Änderungen [12]. So lassen sich beispielsweise aus gegebenen Sender- und Empfängerpunkten algorithmisch geformte Reflektoren entwerfen, die sich z.B. in der Philharmonie de Paris in das architektonische Gesamtkonzept einfügen. Der akustische Mehrwert konnte dort durch eine Raytracing-Simulation in der bestehenden Akustik-Software *Odeon* bestätigt werden.

Es gibt mit *Pachyderm* auch eine sich in Entwicklung befindende open-source Plug-In-Bibliothek für *Grasshopper*, die eine akustische Raytracing-Analyse unmittelbar möglich machen soll [6]. Es können sowohl mittels Schallstrahlenbetrachtung in geschlossenen *Rhino3D*-Geometrien als auch durch die Auswertung von aus .wav-Dateien eingelesenen Impulsantworten Abklingkurven erzeugt werden. Aus diesen lassen sich wiederum gängige raumakustische Gütemaße errechnen. Zusätzlich sind auch einfache signalverarbeitungstheoretische Komponenten, wie Bandfilter und eine Möglichkeit zur Fouriertransformation, implementiert.

### 3.2 Reflexions-Simulation

Im Gegensatz zu den oben beschriebenen, bereits bestehenden Akustik-Anwendungen in *Grasshopper*, die sich hauptsächlich an Fachleute richten, war hier die Motivation, ein Learning-Tool zu erstellen, das auch für Personen mit wenig akustischem Know-How geeignet ist. Ein grundlegendes Verständnis für Absorptions- und Reflexionserscheinungen von Schall an geometrischen Objekten soll geschaffen werden, indem alle Parameter in Echtzeit verändert werden können und die akustischen Vorgänge möglichst gut visualisiert werden. Dazu wurde die Komplexität der Simulation bewusst auf eine weitestgehende Implementierung der in Kapitel 2.1 und 2.2

vorgestellten Prinzipien reduziert. Vernachlässigt wurden beispielsweise Kantenbeugungseffekte, Reflexionen höherer Ordnung, Diffusitäts- und Streugrad, die Abhängigkeit des Absorptionsgrads vom Schalleinfallswinkel, eine etwaige Richtwirkung der Quelle, die distanzabhängige Schallenergieabnahme und die Dissipation durch die Luft bei der Schallausbreitung.

Das Learning-Tool ist in *Grasshopper* als sogenannter Cluster, ein neuer Programmierbaustein, der selber aus *Grasshopper*-Code besteht, implementiert (s. Abbildung 3.3). Dieser benötigt mehrere Eingabeparameter:

- $S_x$ : x-Koordinate der Schallquelle (in [mm])
- $S_y$ : y-Koordinate der Schallquelle (in [mm])
- $S_z$ : z-Koordinate der Schallquelle (in [mm])
- $f$ : Frequenz der Schallquelle als Dropdown-Menü in Oktavbändern von 125Hz bis 4kHz (entsprechend der Frequenzbänder, für die Absorptionsgrade typischerweise angegeben werden)
- *Auflösung*: Dichte der angezeigten Schallstrahlen, die von der Quelle ausgehen, als Dropdown-Menü in drei Stufen *niedrig*, *mittel* und *hoch*.
- *Basis*: b Grundflächen (auf denen sich eine Struktur befinden kann) als Tree {b}
- *Basis-Material*: Jeweiliges Material aus Dropdown-Menü mit Beispielmaterialien als Tree {b} zur Bestimmung der Absorptionseigenschaften
- *Struktur*: Alle s Oberflächen auf der jeweiligen b-ten Grundfläche als Tree {b,s}
- *Struktur-Material*: Material aus einem Dropdown-Menü mit Beispielmaterialien für die jeweilige Oberfläche als Tree {b,s}

Ein Tree {b,s} ist dabei in der Listenverwaltung in *Grasshopper* eine Struktur mit b Elementen, die wiederum jeweils s Elemente enthalten, und hilft hier, die jeweiligen Strukturgeometrien den richtigen Basisflächen zuzuordnen.

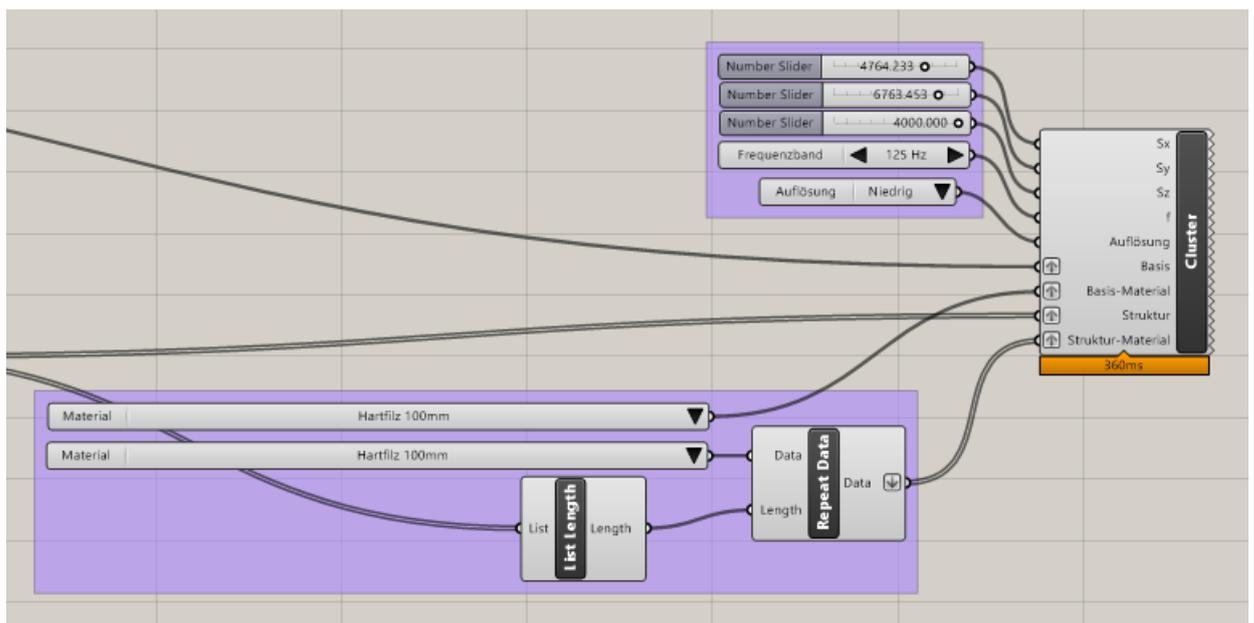


Abbildung 3.3: Einbindung des Clusters (hier ohne eine explizite Geometrie)

Im Folgenden wird beschrieben, wie die Eingabeparameter verarbeitet werden, um in der *Rhino3D*-Ansicht die Darstellung der hinlaufenden und reflektierten Schallstrahlen als Linien und die Absorption durch deren Farbverläufen zu erhalten.

### 3.2.1 Schallstrahlenbetrachtung

Die zum Objekt hinlaufenden Schallstrahlen sind als Verbindungslinien zwischen einem Quellpunkt, der aus den übergebenen kartesischen Koordinaten  $\{S_x, S_y, S_z\}$  generiert wird, und den Gitternetzen, durch die alle übergebenen Flächen angenähert werden, dargestellt. Als Strahlenendpunkt wird dabei jeweils der Mittelpunkt einer Parzelle gewählt, um zu verhindern, dass an Flächennähten mehrere Strahlen für denselben Endpunkt simuliert werden. Um die Berechnungszeit bei dieser Schallstrahlendarstellung zu verringern und somit eine lückenlose Echtzeit-Parametrisierbarkeit zu gewährleisten, wird außerdem die Anzahl der Gitterpunkte pro übergebenem Flächenstück abhängig von dessen Flächeninhalt und der gewählten Auflösungsstufe begrenzt. Auf jede Fläche treffen so mindestens 9 und maximal 225 Schallstrahlen, es ist jedoch auch auf der niedrigsten Detailstufe eine für nahezu alle Formen - ausgenommen sehr kleine geschlossene Oberflächen wie z.B. Kegelmäntel oder Kugeln - so große Strahldichte gegeben, dass sich die Reflexionserscheinungen an den jeweiligen Flächen jederzeit nachvollziehen lassen. Wird ein Zielpunkt von einem Hindernis verdeckt, wird der jeweilige Schallstrahl ausgeblendet und mit Hilfe der Listenverwaltung in *Grasshopper* von weiteren Reflexionsbetrachtungen ausgenommen. Dieser Ansatz der Schallstrahlenberechnung unterscheidet sich von herkömmlichen Raytracing-Modellen, bei denen die Schallstrahlen von einem fixen Quellpunkt aus gleichverteilt über einen gewählten Abstrahlwinkel generiert werden [7]. Viel mehr werden hier Dichte und Anzahl der erzeugten Strahlen von der zu untersuchenden Geometrie bestimmt.

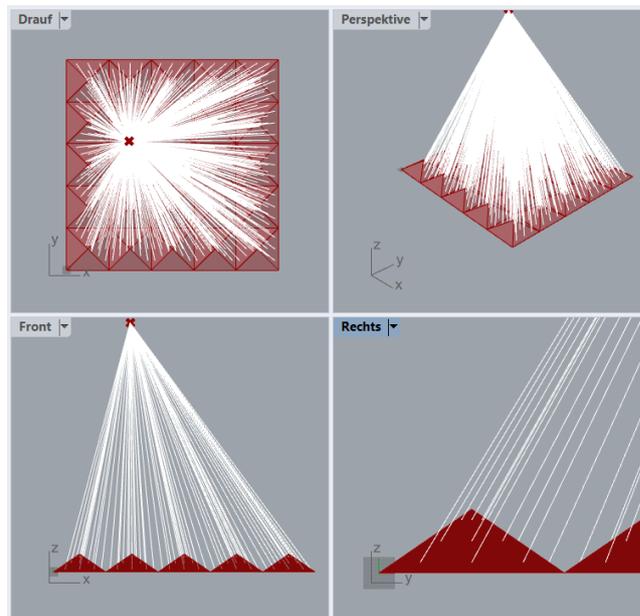


Abbildung 3.4: Hinlaufende Schallstrahlen

### 3.2.2 Simulation der Reflexionen

Um entscheiden zu können, welche Reflexionserscheinung bei der übergebenen Oktavbandmitfrequenz  $f$  überhaupt simuliert werden muss, ist zuerst ein Schaltwerk erforderlich, das die kleinsten Abmessungen der übergebenen Basis- und Strukturflächen prüft. Zuerst werden die

Abmessungen der Basisfläche bestimmt. Sind sie kleiner als die Wellenlänge der gewählten Frequenz, werden alle Schallwellen um das Objekt herum gebeugt; es ist akustisch nicht wirksam. Die kleinste Abmessung von ebenen Flächen kann ermittelt werden, indem man die Differenzen ihrer Eckpunktkoordinaten (Vertices) in von *Grasshopper* über die Fläche gelegten, relativen Koordinatennetzen vergleicht.

Die Abmessungen aller beliebigen Strukturgeometrien, die sich auf den Basisflächen befinden, herauszufinden oder zumindest anzunähern, gestaltet sich etwas komplizierter. Mit Hilfe der Annäherung durch Gitternetze und der schon für die Abmessungen der Basisflächen verwendeten relativen Koordinatensysteme lassen sich der größte Abstand der Strukturfläche von der Grundfläche in relativer z-Richtung und die jeweiligen Struktur-Abmessungen innerhalb der relativen x-y-Ebene bestimmen. Nun kann unter Berücksichtigung einer Korrektur für nicht planare Flächen und bewegliche Teile, die sich mit der Basisebene überlappen, die gewünschte Strukturabmessung als Hypothense über den Satz von Pythagoras angenähert werden.

Nach den in Kapitel 2.2 angeführten Grenzen werden schließlich die Geometriedaten von Basis- und Strukturflächen einem von drei Programmabschnitten zugeteilt, in denen Beugung, diffuse Reflexionen und geometrisch gerichtete Reflexionen berechnet werden.

### Beugung

Falls die Basisfläche klein im Vergleich zur gewählten Wellenlänge ist, tritt gar keine Reflexion auf. Die hinlaufenden Schallstrahlen werden einfach durch das Objekt hindurch verlängert.

Wenn hingegen die Strukturabmessungen klein gegenüber der Wellenlänge sind, die Grundfläche aber eine ausreichende Größe besitzt, werden die hinlaufenden Schallstrahlen bis zu ihrem Schnittpunkt mit der Basisebene verlängert und der Ausbreitungsvektor jeweils an der Basisebene gespiegelt, was einer geometrisch gerichteten Reflexion an der Grundfläche mit gleichem Einfallswinkel entspricht (s. Abbildung 3.5).

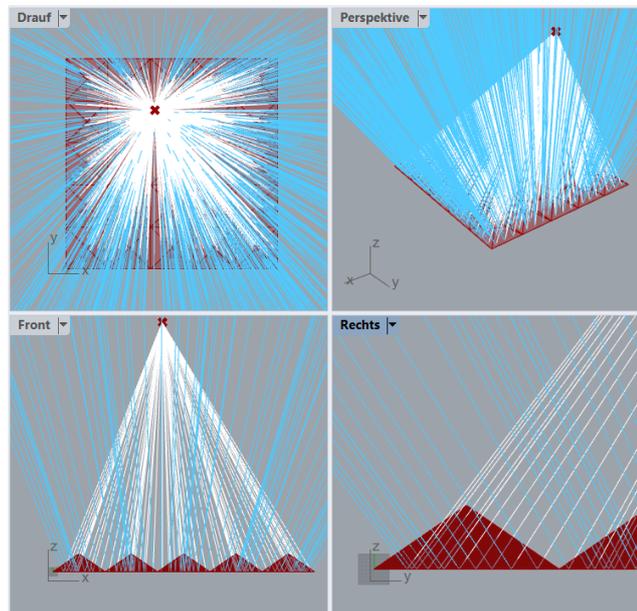


Abbildung 3.5: Beugung um die Struktur und geometrische Reflexion an der Grundfläche

### Diffuse Reflexion

Für die Simulation von diffusen Reflexionen werden abhängig von der gewählten Auflösungsstufe für jeden Endpunkt der hinlaufenden Schallstrahlen 2 bis 4 Vektoren mit zufälligen Richtungs-

komponenten erzeugt. Aus dieser Liste an Zufallsvektoren werden im nächsten Schritt mittels Skalarprodukt und XNOR-Verknüpfung diejenigen aussortiert, die durch die Basisebene hindurchlaufen würden und deren auf die Grundfläche bezogene z-Komponente also nicht das gleiche Vorzeichen einer hypothetischen geometrischen Reflexion am selben Punkt besitzt. Aus den verbliebenen Vektoren werden Linien erzeugt, die die diffus reflektierten Schallstrahlen darstellen (s. Abbildung 3.6). Wie eingangs beschrieben wurde eine Implementierung des Diffusitätgrades als zu komplex erachtet und verworfen. Er ist aber noch intern mit einem Schieberegler, mit dem sich winkelabhängig graduell alle erzeugten Vektoren bis zur reinen geometrischen Reflexion ausblenden lassen, zumindest rudimentär steuerbar.

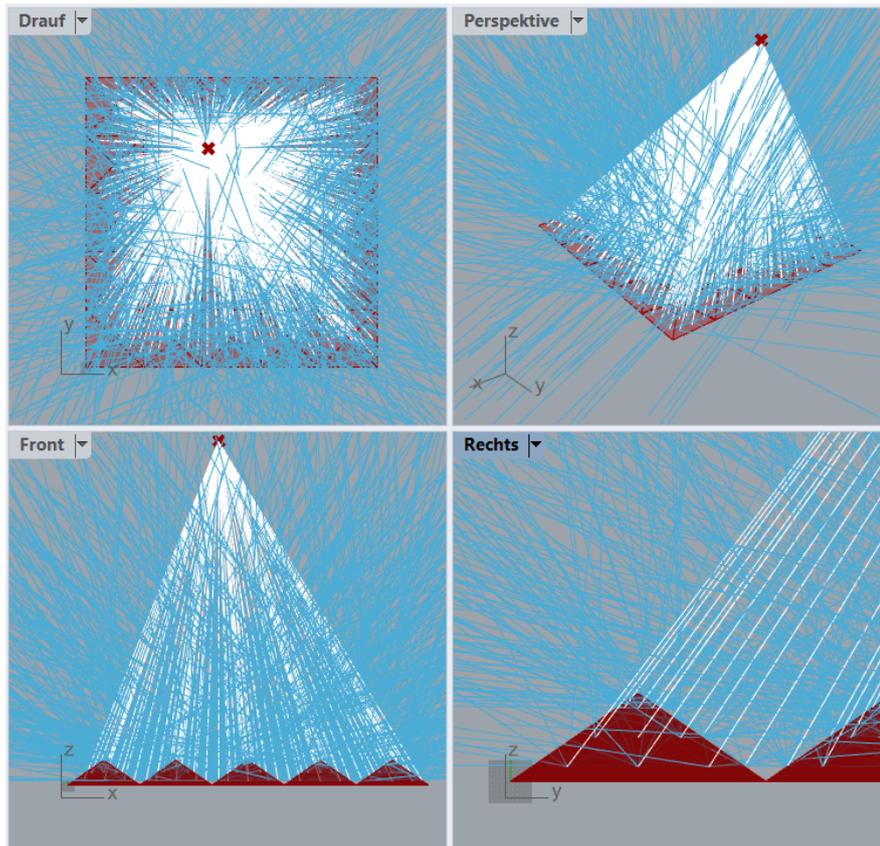


Abbildung 3.6: Diffuse Reflexion an der Struktur

### Geometrisch gerichtete Reflexion

Analog zur geometrischen Reflexion an der Grundfläche im Beugungsfall werden hier die Ausbreitungsvektoren an den Ebenen, die durch die Gitternetzannäherung erzeugt werden, gespiegelt. Zusätzlich werden ähnlich dem Verfahren bei der diffusen Reflexion mittels Skalarprodukt und XOR-Verknüpfung alle Vektoren aussortiert, deren z-Komponente bezogen auf die Basisebene das gleiche Vorzeichen zu der des hingehenden Schallstrahls hat. Auch hier werden die verbliebenen Vektoren in Linien umgesetzt, die die geometrisch gerichteten Reflexionen darstellen (s. Abbildung 3.7).

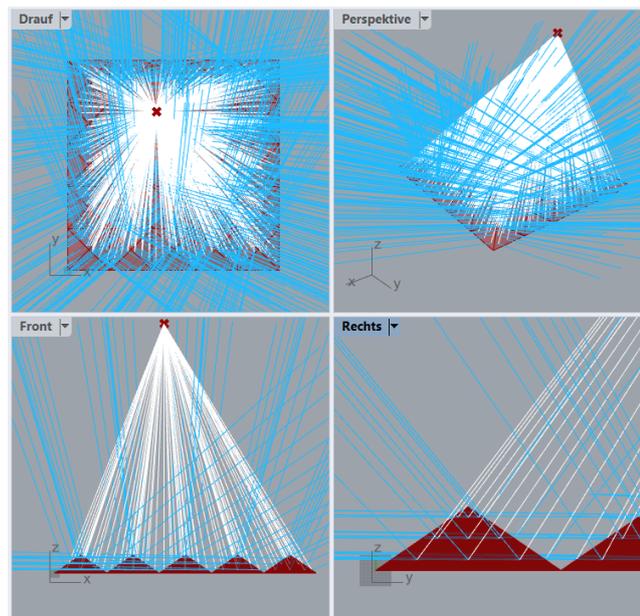


Abbildung 3.7: Geometrisch gerichtete Reflexion an der Struktur

### 3.2.3 Darstellung der Absorption

Für jede Basisfläche und jede Oberflächenstruktur muss als Eingabeparameter des Simulationsclusters aus einem Dropdownmenü ein Material ausgewählt werden. In dieser Liste befinden sich beispielhaft zwölf verschiedene Materialarten mit unterschiedlichen Absorptionseigenschaften, darunter Holz, Hartfilz oder Glaswollmatten. Innerhalb der Reflexions-Simulation sind jeder Materialkennung oktavbandabhängig von 125Hz bis 4kHz die entsprechenden Absorptionsgrade zugeordnet, von denen wiederum der für die übergebene Frequenz  $f$  gültige Wert ausgewählt wird. Die zu den Absorptionsgraden proportionale Schallenergieabnahme nach Eintreffen der Schallstrahlen auf den Oberflächen wird dann durch eine Änderung der Farbsättigung der in *Rhino3D* angezeigten Linien visualisiert. Die Schallstrahlen, die von der Punktquelle im Raum ausgehen, sind dabei immer weiß gefärbt, während nach dem Eintreffen auf bzw. Durchlaufen von Oberflächen, also nach der eigentlichen Schallabsorption, die Schallstrahlen umso dunkler und blauer erscheinen, je höher der Absorptionsgrad der Objekte ist (s. Abbildung 3.8). Hierbei wurde die Schallenergieabnahme mit der Entfernung von der Quelle sowie die zusätzliche Absorption der Luft bei hohen Frequenzen bewusst nicht dargestellt, da nach einigen versuchten Implementierungen festgestellt wurde, dass die Energieabnahme durch das Absorbermaterial nur sehr schlecht zu erkennen war. Besitzt ein Material einen Absorptionsgrad von 1, werden die entstandenen Reflexionen ausgeblendet, um anzuzeigen, dass keine Schallenergie mehr vorhanden ist. Im Falle der diffusen Reflexion, bei der pro eingehendem Schallstrahl mehrere ausgehende Teilstrahlen erzeugt werden, wird zusätzlich die Helligkeit der Linien entsprechend angepasst. Die 'geteilte' Schallenergie drückt sich in dunkelblauerer Linien aus, ohne, dass auf den ursprünglichen Absorptionsgrad Einfluss genommen wird.



Abbildung 3.8: Farbskala der dargestellten Schallstrahlen



## 4

## Vorstellung der Paneelentwürfe

Nachdem die Architekturstudierenden mit den Grundlagen der Akustik vertraut gemacht wurden, war nun die Aufgabe, Ideen für verschiedene Arten von adaptiven Akustikpaneelen zu sammeln. Innerhalb weniger Wochen wurden im Seminar von den Studierenden diverse Konzepte vorgestellt und schließlich einige Modelle entworfen, welche in diesem Kapitel kurz beschrieben werden sollen. Im Anhang zu Kapitel 4 finden sich außerdem einige von den Studierenden zusammengefassten Modellbeschreibungen.

### 4.1 Schnittmuster

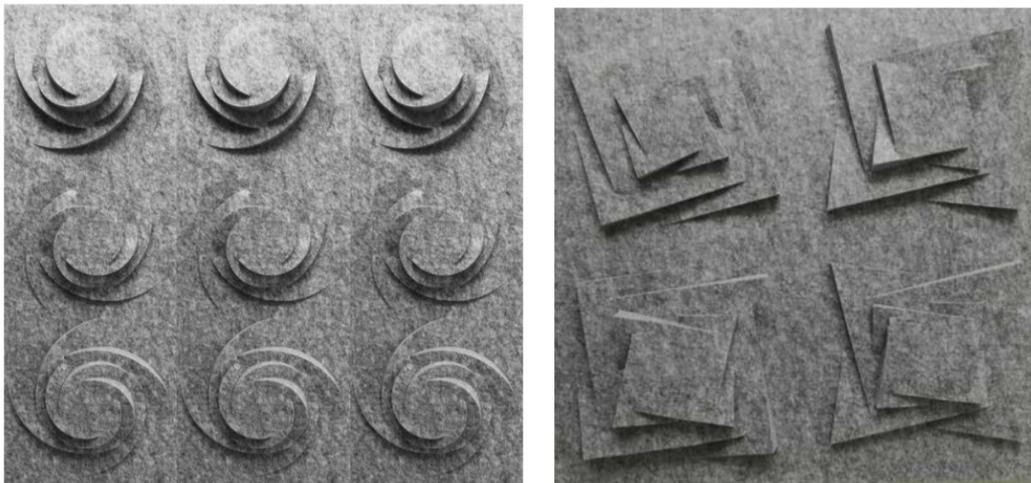


Abbildung 4.1: Zwei Muster in Filz geschnitten aus [1]

Bei den Schnittmustern handelt es sich um eine Weiterführung einiger Ideen aus dem Seminar *Entwerfen spezialisierter Themen* vom Wintersemester 2018/19. Dabei sollten auf planen Filzflächen verschiedene Schnittmuster, ebenfalls aus aus dünnem Filz angebracht werden. Eine Vorrichtung sollte die Höhe der Schnitte verändern und somit ein adaptives Paneel geschaffen werden. Die Schnitte wurden durch einen Lasercutter in den Filz eingebrannt. Entwickelt wurde die Idee von Uyanga Boldbaatar.

### 4.2 Wellenpaneel

Dieser Entwurf soll durch seine Form an Schallwellen erinnern. Ausgangsmaterial war Filz. Eine adaptive Akustik wird dadurch erzielt, dass sich die einzelnen wellenförmigen Filzbalken durch mechanische Steuerung öffnen lassen sollen und somit zusätzlich absorbierende Oberfläche frei wird. Im unteren Bild ist ein Modell zu sehen bei dem die einzelnen wellenförmigen Filzbalken aus

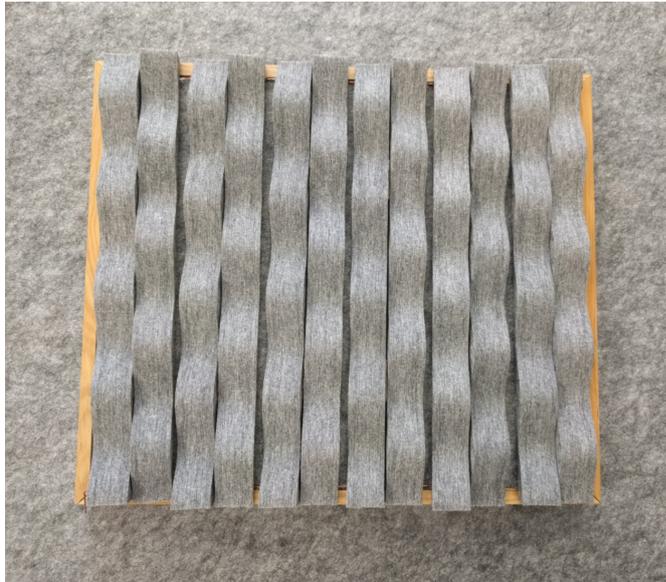


Abbildung 4.2: Wellenmodell

optischen Gründen versetzt zueinander angebracht wurden. Der Studentin, welche das Modell entworfen hat, wurde geraten zumindest nur jeden zweiten Balken versetzt zu befestigen um beim Öffnen des Paneels mehr frei werdende Oberfläche zu gewinnen und somit den Unterschied der Absorptionsgrade im geöffneten und geschlossenen Zustand zu erhöhen. Diese Idee wurde von Anna Katrin Ebenführer ausgearbeitet.

### 4.3 Kastenpaneel

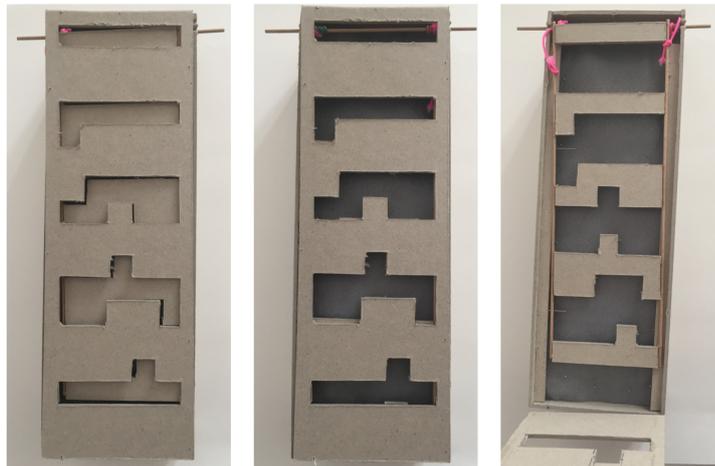


Abbildung 4.3: Modell des Kastenpaneels im geschlossen und offenen Zustand und ohne Frontplatte (v.l.n.r.)

Dieses Paneel stellt im geschlossenen Zustand einen Kasten mit schallharten Oberflächen dar. Im offenen Zustand werden einzelne Fenster in verschiedenen Formen geöffnet um das sich im Kasten befindliche absorbierende Material freizugeben. Durch einen aufwändigeren Mechanismus könnten sich außerdem die einzelnen Fenster unabhängig voneinander öffnen. Somit könnte gezielt eine anwendungsspezifische Akustik im Raum erreicht werden. Diese Idee wurde von David Broser entwickelt.

## 4.4 Klappenförmiges Muschelpaneel



Abbildung 4.4: Modell des Muschelpaneels

Ein weiterer Entwurf basiert auf der Idee, durch eine Seilkonstruktion einzelne, nebeneinander liegende Balken, die an der Decke befestigt werden, verschieden weit aufzuklappen. Die aus Filz bestehenden Balken werden an der Außenseite mit einem Holzfunier verkleidet. Wird das Paneel nun geöffnet, kommt der Filz zum Vorschein und der Absorptionsgrad des Paneels wird erhöht. Durch die verschieden weit geöffneten Klappen entsteht eine an eine Muschel erinnernde Struktur. Durch Positionierung an der Decke eines Hörsaals mit der Öffnung zur Rückwand zeigend könnte beispielsweise der Lärmpegel aus dem Auditorium reduziert werden, während der von Vortragenden ausgehende Schall durch das Furnier in den Raum zurückgelenkt wird. Philipp Kipke hat diese Idee entwickelt.

## 4.5 Deckenvorhänge

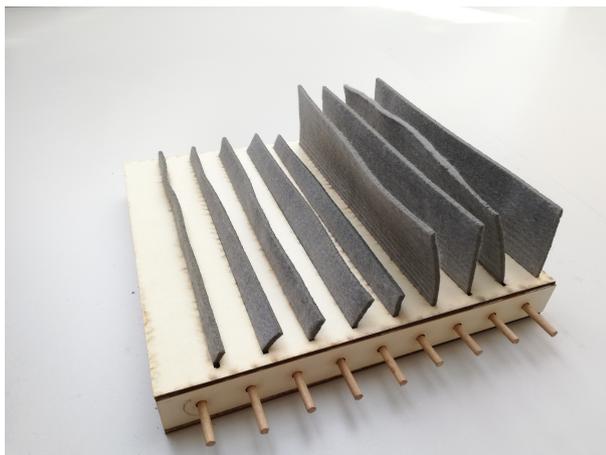


Abbildung 4.5: Modell des Deckenvorhang-Paneels

Der Grundgedanke dieses Paneels ist es, durch eine elektromechanische Konstruktion sich in dem geschlossenen Paneel befindliche, aufgerollte Filzstreifen durch Schlitze von der Decke hinunterzulassen. Bei etwa 3mm dicken, dicht beieinanderliegende Filzstreifen sollte sich so ein sehr hoher Absorptionsgrad ausbilden. Im geschlossenen Zustand sollten die Filzstreifen entwe-

der vollständig im aus Holz bestehenden Gehäuse verschwinden oder bis auf eine bestimmte Höhe aufgewickelt werden. Durch verschieden lange Streifen könnte außerdem ein im Seitenriss betrachtetes wellenförmiges Muster entstehen. Die Idee dazu stammt von Wulfric Clackson.

## 4.6 Waben- und Dreiecksstruktur

Bei diesem simplen, jedoch sehr effektiven Entwurf war die Absicht, eine adaptive Akustik durch Aufbiegen einer eingeschnittenen Filzplatte zu erreichen. Die Filzplatte fungiert dabei als poröser Absorber. Durch das Aufbiegen, das durch einen Mechanismus hinter der Platte geschehen sollte, wird durch die Schlitzbildung mehr Oberfläche frei. Dadurch erhöht sich auch die äquivalente Absorptionsfläche des Paneels und die Nachhallzeit wird gesenkt. Ein Vorteil dieses Modells ist, dass sich durch Überkleben einzelner Schnittflächen der Absorptionsgrad im geschlossenen Zustand gezielt reduzieren lässt und somit ein großer Unterschied zum Absorptionsgrad im geöffneten Zustand erreicht werden kann. Durch die schräg zur Hinterwand gelegenen, frei werdenden Flächen kann die Absorption für schrägen Schalleinfall erhöht werden. Auch Beugungseffekte an den bei der Öffnung entstehenden Kanten vergrößern den Absorptionsgrad. In ästhetischer Hinsicht sind der Grundidee kaum Grenzen gesetzt, da das Filzmaterial mit verschiedensten Schnittmustern versehen werden kann. Diese Idee wurde von Kilian Hoffmann erarbeitet.

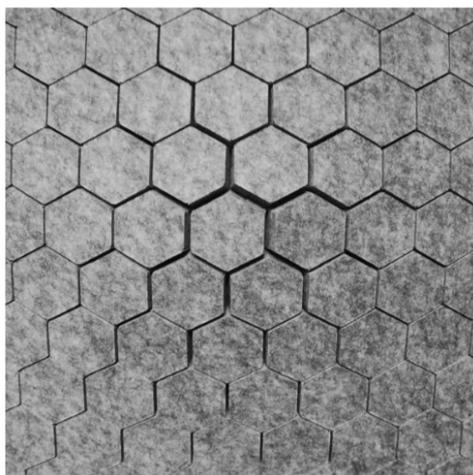


Abbildung 4.6: Wabenstruktur in Filzplatte geschnitten aus [1]

## 4.7 Holzklappen

Dieser Modellentwurf setzt das Prinzip einer adaptiven Akustik durch Öffnen und Schließen von an der Decke befestigten Klappen um. Das Paneel besteht aus beliebig vielen aneinandergereihten Klappen; das Öffnen wird durch Hebel hinter dem Paneel erreicht, die durch Servomotoren bewegt werden. Jene Klappen sind auf der Außenseite mit schallhartem Furnier beklebt. Auf der Innenseite befindet sich schallabsorbierendes Filzmaterial. Auch hinter den Klappen kommt bei Öffnung des Paneels Filz zum Vorschein. Dadurch wirkt das Paneel im geschlossenen Zustand nur minimal schallabsorbierend. Im geöffneten Zustand kommt jedoch sehr viel zusätzlich absorbierende Oberfläche hinzu, was zu sehr großen Absorptionsgradunterschieden der beiden Modi führt. Außerdem fungieren die geöffneten, senkrecht zur Decke stehenden Klappen als Baffles (s. Kapitel 2.1), womit sich die äquivalente Absorptionsfläche zusätzlich erhöht.

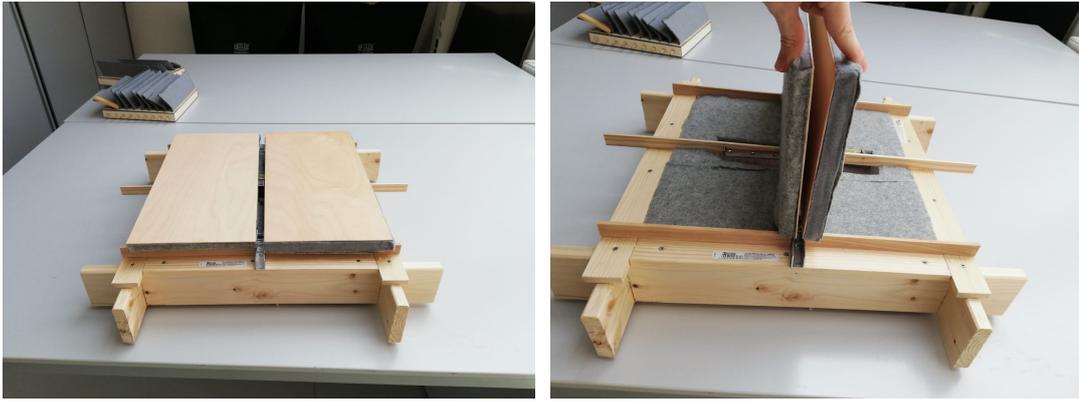


Abbildung 4.7: Prototyp des Holzklappenpaneels

Um auch im geschlossenen Zustand höhere Absorptionsgrade zu erreichen, könnte nur ein Teil der Klappen adaptiv gestaltet werden und einige Module permanent geöffnet bleiben. Die Idee zu diesem Modell stammt von David Broser.

## 4.8 Rahmen



Abbildung 4.8: Leere und mit Absorbern bestückte Rahmen

Im Gegensatz zu den anderen Entwürfen wird bei dieser Modellidee eine adaptive Akustik nicht durch elektromechanische Steuerung, sondern durch manuellen Ein- und Ausbau einzelner Absorbermodule erreicht. So lässt sich die Nachhallzeit steuern, indem man einfach so viele Paneele entfernt oder hinzufügt, bis die gewünschte äquivalente Absorptionsfläche im Raum erreicht ist. Primär soll es den Architekturstudierenden in zukünftigen Seminaren aber dienen, ihre entworfenen Absorber im Paneel zu platzieren und in den Rahmen auszustellen. Diese Idee wurde von Viktoriya Yeretska ausgearbeitet.



## 5

## Messung der Modelle im 1:10 Hallraum und Impedanzrohr

Nach der Entwurfsphase wurden von den Architektur-Studierenden einige Modelle in einem materialsparenden, verkleinerten Maßstab gebaut und den Toningenieur-Studierenden zur Messung der Absorptionseigenschaften zur Verfügung gestellt.

In der Industrie kommen zur Messung des Absorptionsgrades von Absorberelementen zwei Verfahren zum Einsatz. Einerseits die Messung im Impedanzrohr, durch welche sich der Absorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall berechnen lässt. Für die Messung von Absorbiermaterial im Impedanzrohr sind exakt dimensionierte, runde Stücke mit 10cm Durchmesser nötig, welche dann in das Rohr geschoben werden können. So wurden auch einige von den Studierenden entworfene Lochplatten vermessen.

Da die meisten Modelle der Studierenden jedoch nicht einfach in die gewünschte Form gebracht werden konnten, ohne dass man die Mechanik zerstört, entschied man sich die zweite bewährte Methode zur Absorptionsgradmessung zu benutzen, die Messung in einem Hallraum. Diese hat auch den Vorteil, dass das Messergebnis dem Absorptionsgrad für isotropen Schalleinfall entspricht und somit besser die akustische Wirkung von Absorbern in einem Hörsaal widerspiegelt. Für die Absorptionsgradmessung der von den Architektur-Studierenden angefertigten Modelle wurde ein von Martin Müller für ein Toningenieursprojekt gebauter Hallraum im Maßstab 1:10 benutzt[9].

### 5.1 Messung des Absorptionsgrades im 1:10 Hallraum



Abbildung 5.1: Der 1:10 Hallraum mit Kugeldiffusoren und Ultraschalllautsprecher

Die Motivation des Kollegen Müller, einen Hallraum im Maßstab 1:10 zu bauen, war primär, um mit geringerem Aufwand verschiedene Hallräume in kleinerem Maßstab zu modellieren und deren akustische Eigenschaften miteinander zu vergleichen. In unserem Fall aber wurde der Raum als praktische Lösung zur Absorptionsgradmessung der Paneelmodelle der Architekturstudierenden verwendet.

Dabei müssen auch die vom Messlautsprecher emittierten Schallwellen skaliert werden. Somit wird der typische Messbereich von 100Hz bis 5kHz teilweise in den Ultraschallbereich von 1kHz bis 50kHz verschoben. Dies erfordert außerdem ein Messsystem, welches hochfrequenten Schall aufnehmen und wiedergeben kann. Hierbei kam ein speziell angefertigter Kugelstrahler und ein Messmikrofon für Ultraschall zum Einsatz.

Eine nach ÖNORM EN ISO 354 [16] durchgeführte hinunterskalierte Messung von Absorbermaterialien würde korrekterweise verlangen, deren Porenstruktur zu verkleinern. Dies stellt sich in der Praxis leider als nicht durchführbar dar. Die gemessenen Absorptionsgrade gewisser Absorber im Modellhallraum haben jedoch vergleichbare Ergebnisse mit Messungen in normal großen Hallräumen ergeben. Aus diesem Grund entschied man sich, die Modelle trotz einer gewissen Ungenauigkeit darin zu vermessen, um vor allem einen Vergleich der Absorptionseigenschaften im geschlossenen und offenen Zustand durchzuführen.

### 5.1.1 Messablauf

Durch eine spezielle für den Modellhallraum erstellte Messsoftware konnte eine der ÖNORM EN ISO 354 [16] nachempfundene Messung durchgeführt werden. Diese verlangt es, die gemessenen Absorptionsgrade über zwei Lautsprecher- und sechs Mikrofonpositionen zu mitteln. Außerdem mussten für ein ausreichend diffuses Schallfeld Kugeldiffusoren in den Raum eingebracht werden. Aufgrund des geringen Signal-Rausch-Abstands des Messsystems konnte keine Aufzeichnung des Schalldruckpegelabfalls bis auf -65dB erfolgen. Wie in der Raumakustik üblich wurde daher der Pegelabfall von -5dB bis -25dB aufgezeichnet und die Abklingkurve auf -65dB extrapoliert.

Sowohl Messwiederholungen als auch die Berechnungen erfolgten automatisch durch die Messsoftware, wodurch unter anderem die Absorptionsgrade nach der Formel von Sabine ermittelt wurden (siehe Gleichung 2.28). Obwohl die Software es auch ermöglicht, den Absorptionsgrad nach Eyring zu berechnen (siehe Gleichung 2.29), wurde bewusst die Berechnung nach Sabine gewählt um sich möglichst nahe an der ÖNORM EN ISO 354 zu orientieren.

Als Anregungssignal wurde ein Pseudozufallsrauschen gewählt, das pro Messposition fünf mal ein- und ausgeschaltet wurde. Am Ende eines Messdurchganges konnte vom Programm eine Grafik mit den frequenzabhängigen Absorptionsgraden erstellt werden, welche die Basis für die Messauswertungen bilden.

### 5.1.2 Auswertung der Messergebnisse

Im folgenden Kapitel wird ein Überblick über die vermessenen Modelle und ihre Absorptionseigenschaften gegeben. Sie wurden dabei jeweils in ihren geschlossenen und geöffneten Zuständen gemessen und die Absorptionsgrade verglichen. Schließlich wurden auch die Modelle untereinander verglichen, um zu entscheiden, welche unter ihnen sich für eine Realisierung eignen.

Die Balkendiagramme zeigen die frequenzabhängigen Absorptionsgrade in Terzbändern von 1kHz bis 50kHz. Die Absorptionsgrade der einzelnen Bänder wurden so interpretiert, dass sie jeweils den um den Faktor 10 hinunterskalierten und sich somit im Hörbereich befindlichen Terzbändern entsprechen.

## Wellenmodell

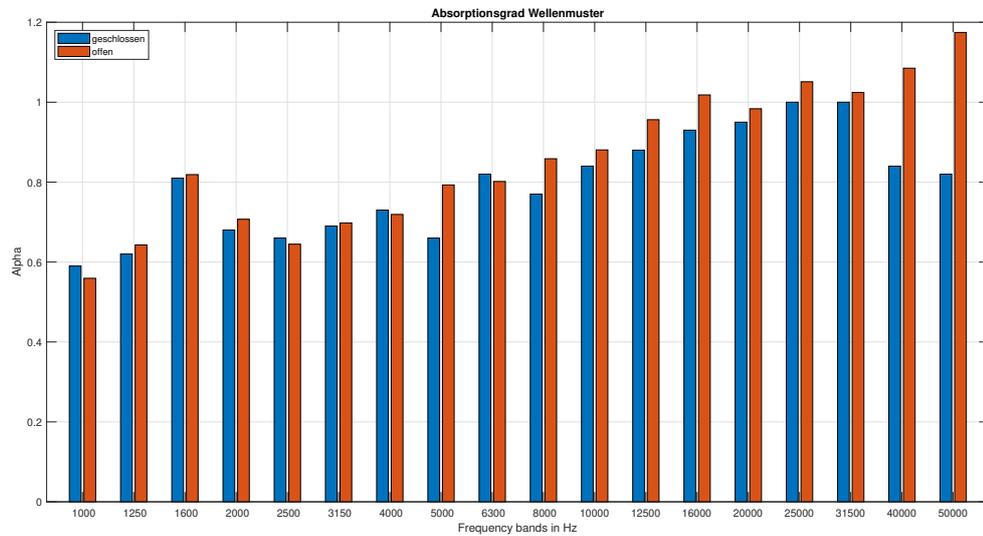


Abbildung 5.2: Absorptionsgrade des Wellenmodells

Das Wellenmodell weist über alle Frequenzbänder einen guten Absorptionsgrad auf, wobei er zu den hohen Frequenzen für den offenen Zustand einen Absorptionsgrad von 1 überschreitet. Leider entsteht durch die Öffnung des Modells kaum ein Unterschied der Absorption. Dies hat vermutlich mit der geringen zusätzlichen Oberfläche im geöffneten Zustand und der Anordnung zu tun. Diesem Problem könnte jedoch leicht Abhilfe geschaffen werden, indem beim Klappmechanismus anstelle von zwei versetzten Wellen zwei deckungsgleiche Teile verwendet werden.



Abbildung 5.3: Wellenmodell im geschlossenen Zustand

## Kastenmodell

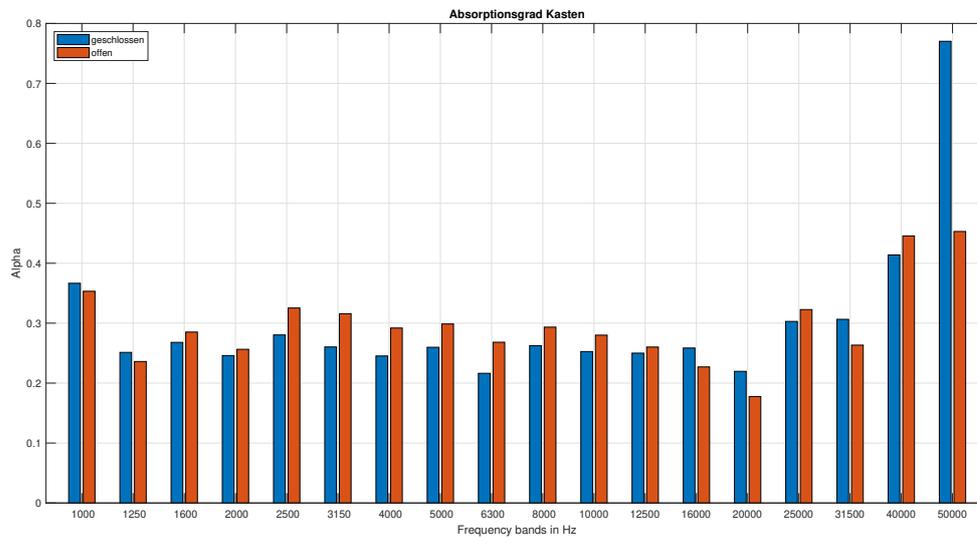


Abbildung 5.4: Absorptionsgrade des Kastenmodells

Dieses Modell zeigt sowohl im geschlossenen als auch im offenen Zustand geringe Absorptionsgrade auf. Auch unterscheiden sich die beiden Messungen wenig. Auffällig ist jedoch der vergleichsweise hohe Absorptionsgrad von etwa 0,75 bei 50kHz im geschlossenen Zustand. Hierbei könnte der Kasten als Helmholtz-Resonator wirken oder es handelt sich um einen Messfehler. Ein Grund für die allgemein geringe Absorption könnten außerdem die benutzten Materialien sein.

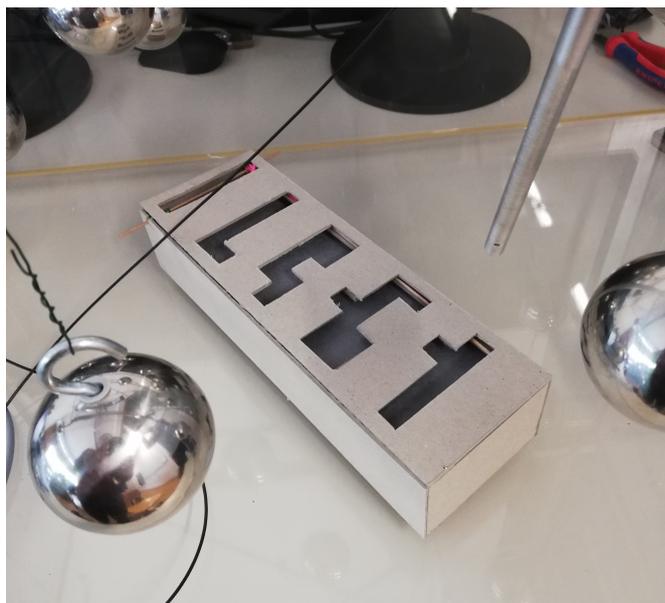


Abbildung 5.5: Kastenmodell im Miniaturhallraum

## Muschelmodell

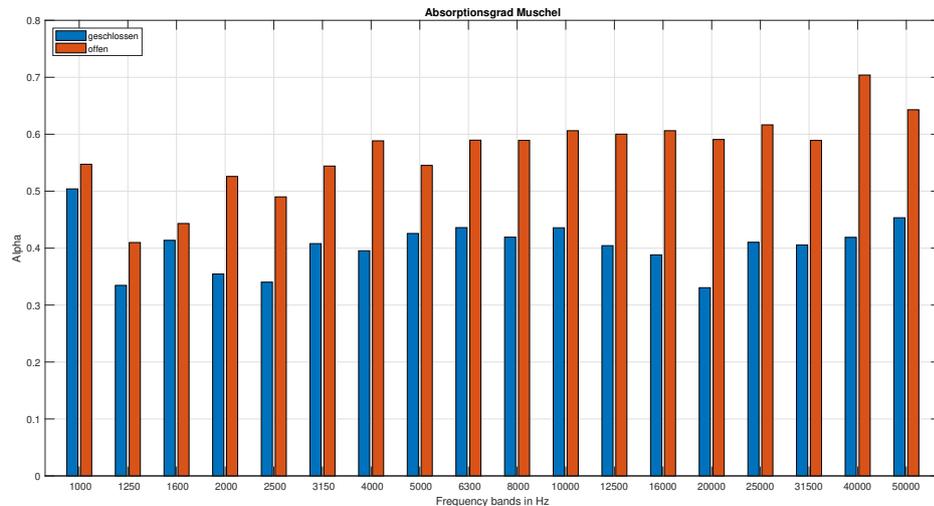


Abbildung 5.6: Absorptionsgrade des Muschelmodells

Betrachtet man die Unterschiede der Absorptionsgrade des Muschelmodells für den geschlossenen und geöffneten Fall erscheinen die Messergebnisse zufriedenstellend. Hier konnte man Unterschiede von bis zu 0,3 erreichen. Im geöffneten Zustand erreicht man einen Absorptionsgrad von bis zu 0,7. Bei den Messergebnissen muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Seitenflächen des Modells nicht mit Holz abgedeckt waren. Dies wäre für die finale Realisierung allerdings vorgesehen. Während der Messung wurden die Seitenflächen provisorisch mit Gaffer-Tape zugeklebt. Da eine Holzabdeckung den Schall besser reflektiert als das behelfsmäßig befestigte Klebeband, kann von noch höheren Absorptionsgradunterschieden im offenen und geschlossenen Zustand ausgegangen werden. Jedoch würde der Absorptionsgrad für beide Fälle im Allgemeinen sinken, da mehr von dem schallabsorbierenden Filz verdeckt wird.



Abbildung 5.7: Muschelmodell im offenen Zustand

## Rasterschnitte

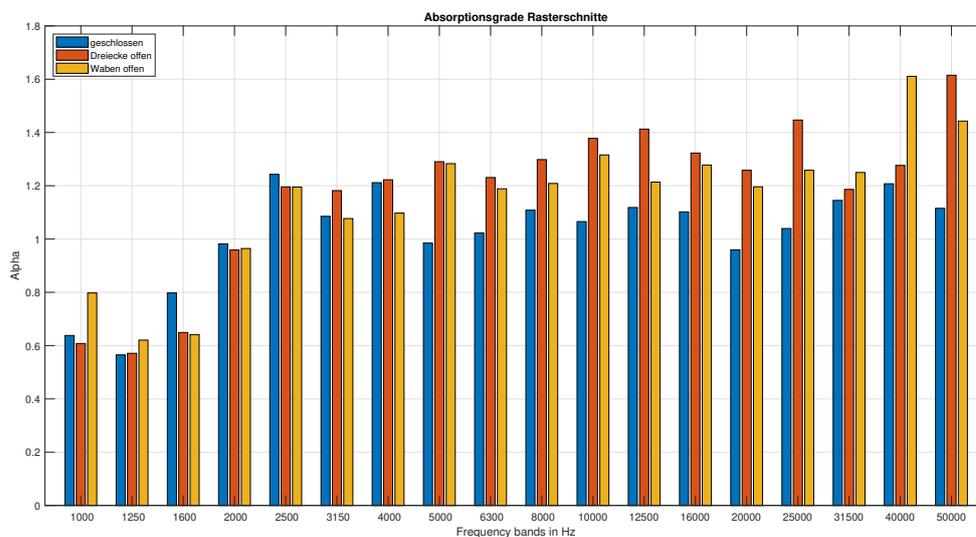


Abbildung 5.8: Absorptionsgrade der Rasterschnitte

Bei den Rasterschnitten handelt es sich um Filzmaterial welches auf der eine Seite eine wabenförmige und auf der anderen Seite eine Dreiecksstruktur aufweist. Zuerst wurde der Filz flach aufgelegt und vermessen, dann jeweils wabenförmige und Dreiecksstruktur gewölbt vermessen. Wie man an dem Balkendiagramm erkennen kann, weist das Modell in allen Frequenzen ein sehr gutes Absorptionsverhalten auf, was darauf zurückzuführen ist, dass nur das gut absorbierende Filzmaterial verwendet wurde. Deutliche Unterschiede zwischen geöffnetem und geschlossenem Zustand treten vor allem ab 5kHz auf. Vergleicht man die Waben- und Dreiecksstruktur, sieht man, dass in jedem Terzband jeweils eine der beiden bessere Absorptionsgrade aufweist. Die Präferenz für eine der beiden Strukturen in akustischer Hinsicht hängt also davon ab, in welchen Frequenzbereichen im Raum besonders viel Schallenergie absorbiert werden soll.



Abbildung 5.9: Waben und Dreiecksmuster im Miniaturhallraum

## Schnittmuster

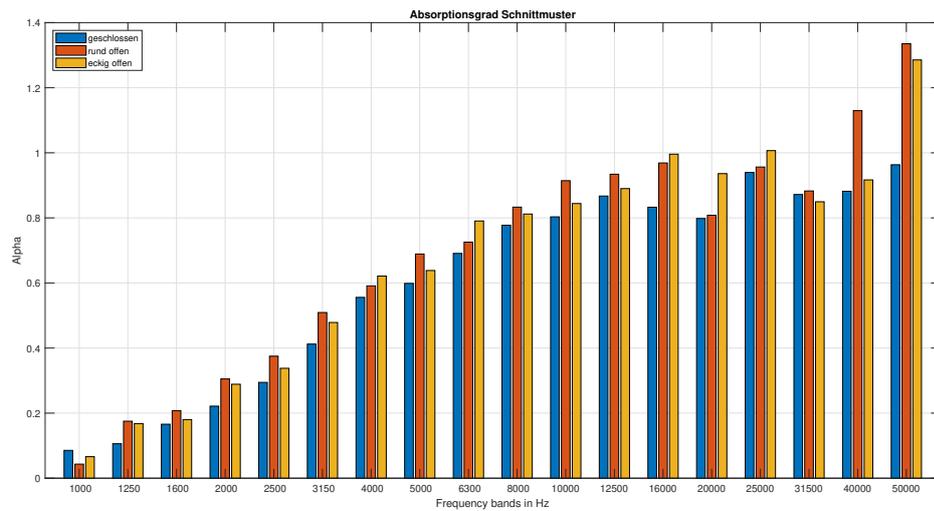


Abbildung 5.10: Absorptionsgrade der Schnittmuster

Als Modell wurden zwei verschiedene Schnittmuster angefertigt. Aufgrund ihrer Dicke ist es wenig verwunderlich, dass die Absorptionsgradmessung sehr geringe Werte bei tiefen Frequenzen ergibt. Ein merklicher Unterschied zwischen geschlossenem und offenem Zustand zeigt sich erst ab 10kHz. Erst bei 40kHz sind größere Differenzen zwischen geschlossenem Zustand und den beiden Mustern im offenen Zustand zu erkennen.

Auch bei dieser Messung ist es schwierig, sich aufgrund von höherer Absorption für eines der beiden Muster zu entscheiden, da auf die Akustik des Raumes Rücksicht genommen werden sollte. Um eine allgemein höhere Absorption für den tieferen Frequenzbereich zu erreichen, wurde vorgeschlagen, etwa 2cm dicken Filz hinter den Mustern anzubringen. Fraglich ist jedoch, ob der Unterschied der Absorptionsgrade in den höheren Frequenzen ausreicht, um beim Hörer den Eindruck einer veränderten Akustik auszulösen. Für Verbesserung der Akustik in Räumen für Kommunikation und Sprache ist eine Dämpfung der Höhen jedenfalls irrelevant.



Abbildung 5.11: Schnittmuster im offenen Zustand

## Filzstreifenmodell

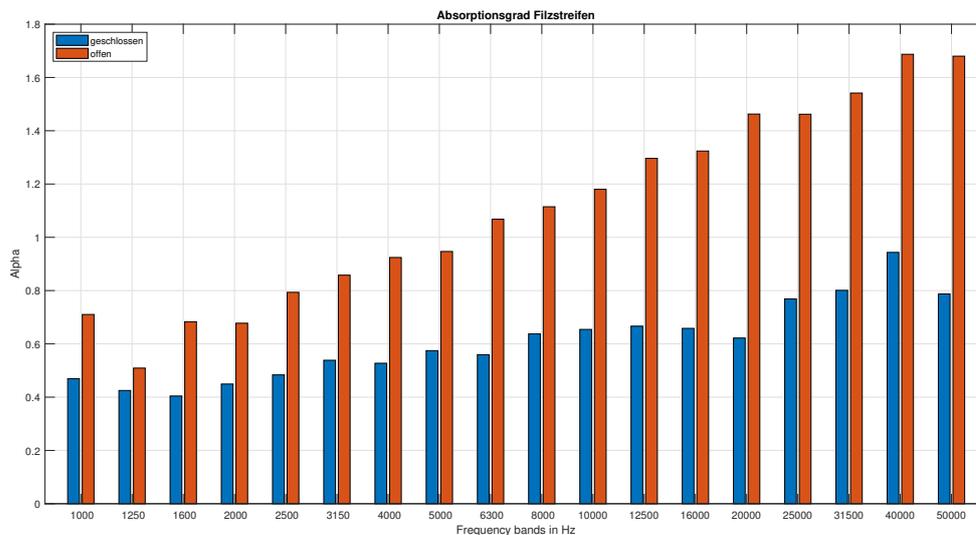


Abbildung 5.12: Absorptionsgrade des Filzstreifenmodells

Das Filzstreifenmodell weist im geschlossen Zustand moderate Absorptionsgrade auf, welche mit höheren Frequenzen ansteigen. Rollt man nun die Filzstreifen aus, erreicht man Absorptionsgraderhöhungen von 0,1 bis 0,9.

Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Dicke der einzelnen Filzstreifen im Modell mit etwa 2mm nicht um den Faktor 10 hochskaliert werden kann, da 2cm dicke Filzstreifen sich kaum auf einer Stange aufrollen lassen. Der Absorptionsgrad würde demnach im Realfall für Frequenzen unter 1kHz deutlich sinken.

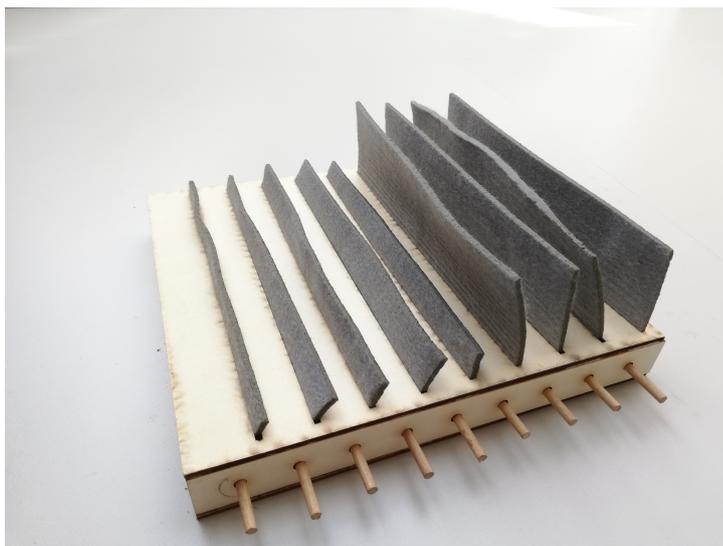


Abbildung 5.13: Filzstreifenmodell im halb geöffneten Zustand

## Absorptionseigenschaften der Modelle im Vergleich

In diesem Abschnitt werden die Modelle nochmals untereinander, jeweils für geschlossenen und geöffneten Zustand, verglichen.

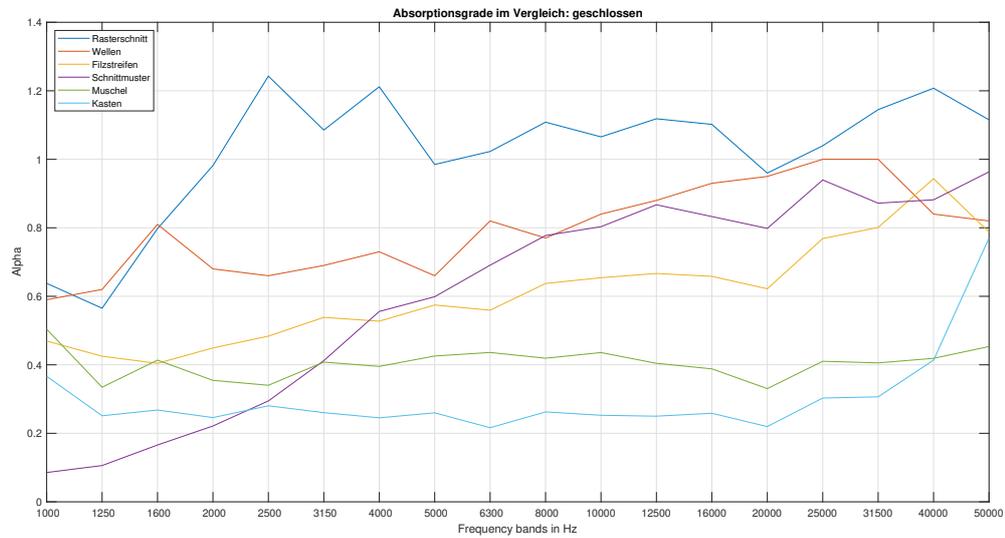


Abbildung 5.14: Absorptionsgrade im geschlossenen Zustand

Das Diagramm für die Absorptionsgrade der Modelle im geschlossenem Zustand zeigt die Rasterschnitte, welche im geschlossenen Zustand etwa den Absorptionsgraden des Filzmaterials entspricht, mit den besten Ergebnissen.

Muschel- und Kastenmodell besitzen einen vergleichsweise konstanten jedoch niedrigen Frequenzgang des Absorptionsgrades.

Das Wellen- und das Filzstreifenmodell schneidet im Vergleich im Mittelfeld ab, wobei bei beiden ein Anstieg des Absorptionsgrades zu hohen Frequenzen hin erkennbar ist.

Die Schnittmuster zeigen aufgrund ihrer Dicke erst ab dem mittleren Frequenzbereich Absorptionsgrade über 0,5.

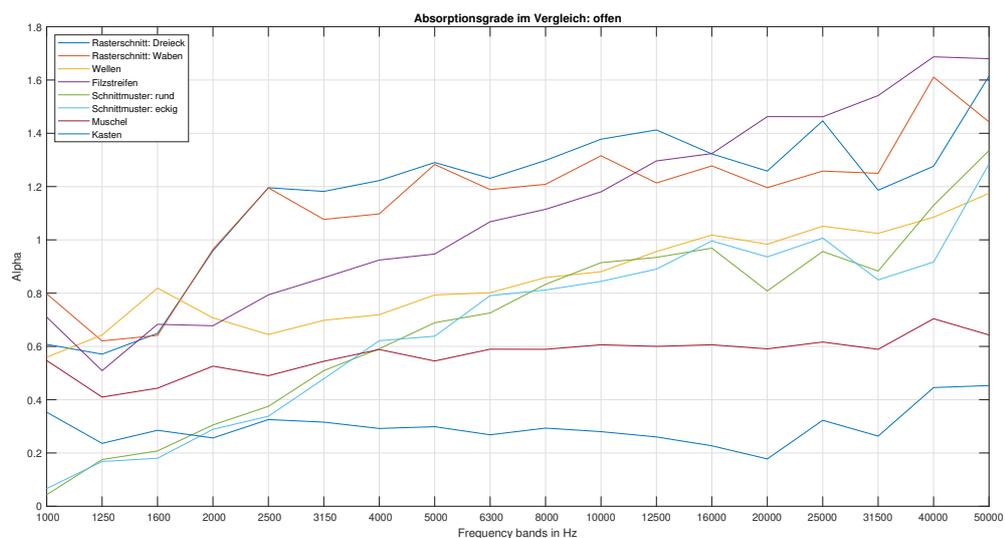


Abbildung 5.15: Absorptionsgrade im offenen Zustand

Im Diagramm für die Absorptionsgrade im offenen Zustand kann man erkennen, dass die Rasterschnitte die höchsten Werte erzielen, was wenig überraschend ist, da nur gut absorbierender Filz als Material verwendet wurde. Auch das Filzstreifenmodell kann, vor allem im hohen Frequenzbereich mit den Rasterschnitten konkurrieren.

Das Wellenmodell liefert für tiefe Frequenzen, speziell bei 1600Hz vergleichsweise hohe Absorptionsgrade und schlägt sich auch für steigende Frequenzen gut. Der Frequenzgang der beiden Schnittmuster steigt am drastischsten an.

Am linearsten verhält sich das Muschelmodell mit Absorptionsgrade um die 0,6, wobei das Kastenmodell zumindest für tiefe und mittlere Frequenzen mit Werten von etwa 0,3 einigermaßen konstant bleibt. Die zwei letzten Modelle schneiden im Vergleich am schlechtesten ab.

## 5.2 Messung des Absorptionsgrades von Lochplattenmustern im Impedanzrohr

Eine weitere Frage, die im Seminar gestellt wurde, war, ob man die klassischen, zylinderförmigen Löcher von Lochplatten durch Verändern der Lochform nicht ästhetisch ansprechender gestalten könne. Aus der Sicht der Toningenieur war es nun interessant herauszufinden, welchen Einfluss auf den Absorptionsgrad eine solche Strukturveränderung mit sich bringt.

Deswegen wurden von den Architekturstudierenden sechs runde Platten mit jeweils 10cm Durchmesser und verschiedenen Lochformen angefertigt, welche dann mittels der Trennungsmethode im Impedanzrohr vermessen wurden.

Die theoretischen Grundlagen zur Messung des Absorptionsgrades im Impedanzrohr wurden in Kapitel 2.4 erklärt.



Zylindrische Lochform



Zylindrische, leicht abgerundete Lochform



Zylindrische, stärker abgerundete Lochform



Zylindrische Lochform mit abgerundeter, unstetiger Öffnung



Konische Lochform



Konische Lochform mit Abstufungen

Abbildung 5.16: Zu vermessende Lochplatten mit verschiedenen Mustern

### 5.2.1 Messaufbau

Um den Absorptionsgrad der Lochplatten im Impedanzrohr zu messen, bedarf es neben mindestens zwei Messmikrofonen auch einer Schallquelle. Dafür wurde ein Messlautsprecher benutzt, welcher an einen Verstärker angeschlossen war. Das Signal, mit dem der Lautsprecher betrieben wurde und durch das sich eine Stehwelle im Rohr ausbilden sollte, war dabei ein von einer Messsoftware am PC generiertes Rauschsignal. Dieses wurde durch ein *RME Fireface* Audiointerface digital/analog-gewandelt und weiter an den Verstärker und den Lautsprecher geschickt.

Das Audiosignal der drei Messmikrofone wurde durch das *RME Fireface* analog/digital-gewandelt und an die Messsoftware geroutet, welche bei jedem Messvorgang automatisch alle relevanten Berechnungen durchführt.

Durch Öffnen des Impedanzrohres konnten die Lochplatten eingebracht werden. Außerdem konnte die Rohrlänge und somit der Abstand zum Rohrabschluss hinter den Messobjekten variiert werden, um weiteres absorbierendes Material ins Rohr einzubringen.

Da der Frequenzbereich, bei dem eine Absorptionsgradmessung im Impedanzrohr überhaupt möglich ist, vom Abstand der zwei Mikrofone abhängig ist (s. Kapitel 2.4), wurden zur Messbereichserweiterung drei Mikrofone benutzt. Die Software ermittelt dann einmal für tiefe und höhere Frequenzen den Absorptionsgrad und kombiniert die Ergebnisse zu einem Graphen.

Nun wurden die sechs Lochplatten in verschiedenen Anordnungen vermessen. In der Praxis werden Lochplatten meist mit einem gewissen Wandabstand in den Raum eingebracht und/oder hinter den Lochplatten poröse Absorber angebracht (s. Kapitel 2.1). Um praxisnähere Aussagen über die Absorptionsgrade der Lochplatten treffen zu können, wurde deshalb in einigen Messungen 20cm dicke Schafswolle hinter die Lochplatten gelegt. Außerdem wurden Messungen der Lochplatten mit einem gewissen Abstand zum Rohrabschluss durchgeführt.

Ein weiterer Versuch bestand darin, den Einfluss von einem über die Lochplatten aufgetragenen Stück Stoff zu messen. Dadurch könnte man die Optik der Lochplattenmuster verdecken, falls diese dem ästhetischen Raumkonzept nicht entsprechen, und gleichzeitig die Absorptionseigenschaften des Paneels merklich verbessern.

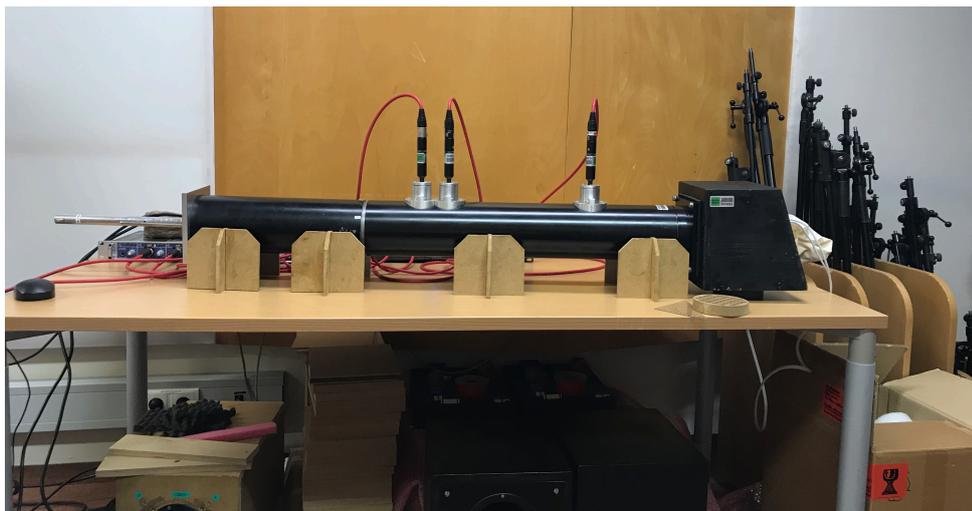


Abbildung 5.17: Messaufbau mit drei Mikrofonen, Lautsprecher und Impedanzrohr



Wandabstand von 10cm müsste die erste Resonanzüberhöhung eigentlich schon bei etwa 125Hz zu sehen sein (s. Kapitel 2.1). Das ist im Diagramm jedoch schwer ersichtlich. Die harmonischen Vielfachen dieser Frequenz zeigen aber deutliche Maxima auf. Dadurch werden Absorptionsgrade bis zu 0,75 erreicht. Das Ergebnis ist als hellblauer Graph (05B & 06B) in obigem Diagramm abgebildet.

Nun wurde hinter der Lochplatte das Filzstück aus der ersten Messung angebracht. Es zeigt sich im Vergleich zu Messung 1 eine Erhöhung des Absorptionsgrades zu den tiefen Frequenzen hin und eine Abschwächung der Absorption zu den höheren Frequenzen hin. Erstere ist der Kombination beider Materialien zuzuschreiben. Zweitere ist darauf zurückzuführen, dass die Schallwellen sich bei hohen Frequenzen nicht mehr um die Lochplatte beugen und deren schallharte Oberfläche weniger absorbiert. Das Ergebnis ist als türkiser Graph (07B & 08B) in obigem Diagramm abgebildet.

Als alternatives Material wurde 10cm dicke Schafswolle hinter die Lochplatte gelegt. Das Diagramm zeigt hierbei höhere Werte bei tiefen Frequenzen und zu hohen Frequenzen ähnliche Werte wie Messung 07B & 08B. Das Ergebnis ist als gelbgrüner Graph (09B & 10B) in obigem Diagramm abgebildet.

Nun wurde zusätzlich ein Stück Stoff über die Lochplatte geklebt. Dadurch konnte eine weitere Erhöhung des Absorptionsgrad gegen tiefe Frequenzen hin erreicht werden. Jedoch fällt der Absorptionsgrad darüber im Vergleich zu Messung 09B & 10B deutlich ab. Das Ergebnis ist als oranger Graph (11B & 12B) in obigem Diagramm abgebildet.

Nun wurde die Schafswolle entfernt. Im Vergleich zu Messung 05B & 06B erreicht man fast über den gesamten messbaren Frequenzbereich eine Absorptionsgraderhöhung. Das Ergebnis ist als roter Graph (13B & 14B) in obigem Diagramm abgebildet.

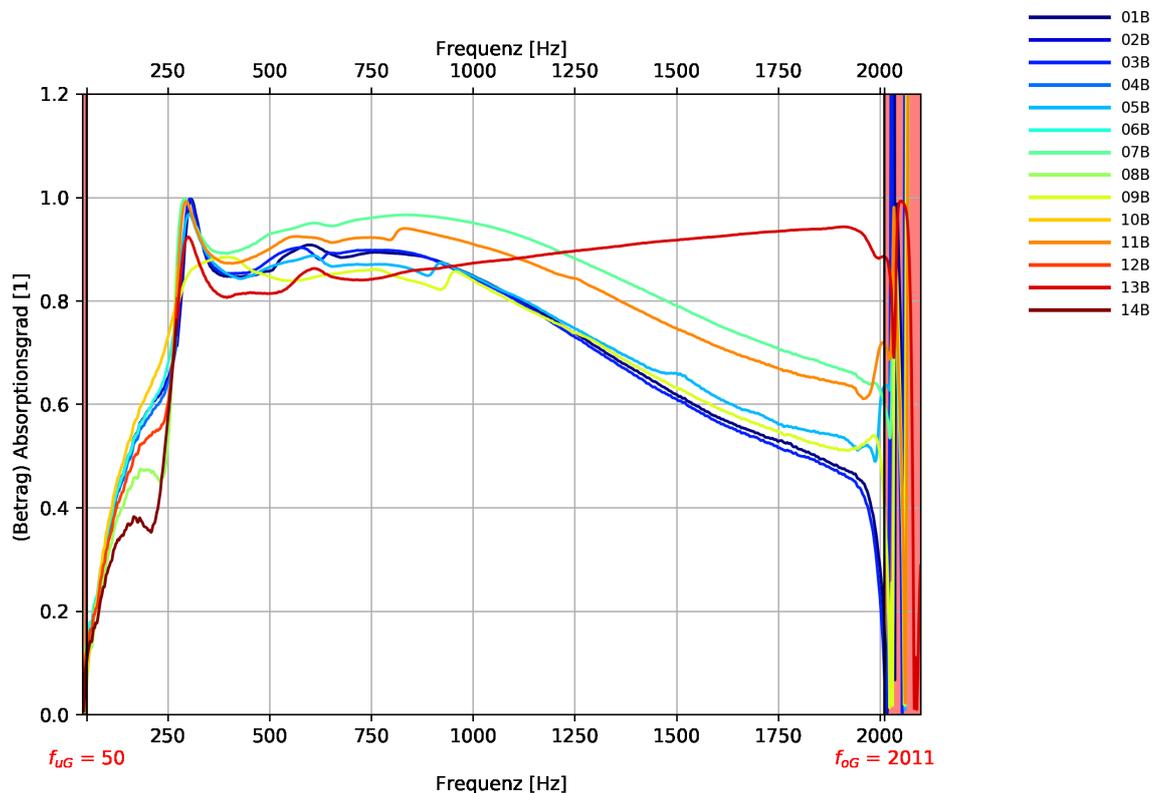


Abbildung 5.19: Darstellung der Absorptionsgrade in verschiedenen Anordnungen

01B & 02B	Lochplatte leicht abgerundet, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
03B & 04B	Lochplatte stärker abgerundet, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
05B & 06B	Lochplatte unstetig abgerundet, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
07B & 08B	Lochplatte konisch, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
09B & 10B	Lochplatte normal, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
11B & 12B	Lochplatte Stufenform, dahinter Schafswolle 120mm Dicke, 0mm Wandabstand
13B & 14B	Schafswolle 100mm Dicke, 0mm Wandabstand

Tabelle 5.2: Legende zu Abbildung 5.19

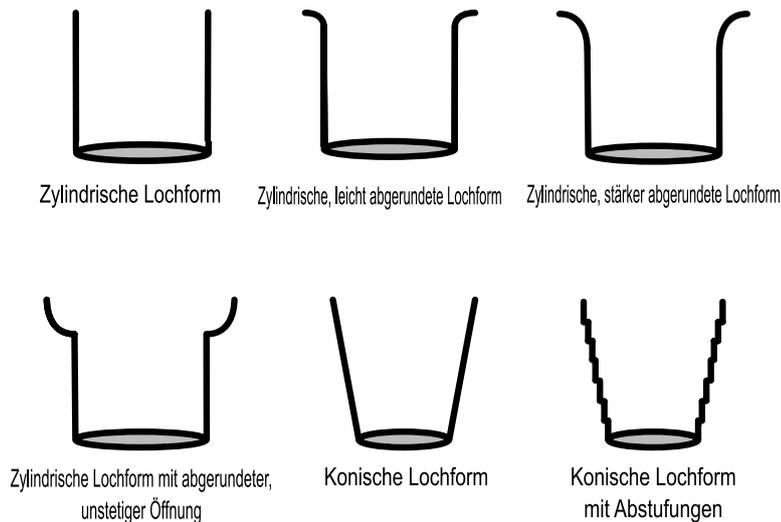


Abbildung 5.20: Skizze der verschiedenen Locharten im Querschnitt

In Diagramm 5.19 wurden vor allem die sechs verschiedenen Lochplattenmuster (s. Abb. 5.20) miteinander verglichen.

Zunächst wurde die Lochplatte mit leicht abgerundeter Öffnung vermessen. Dahinter wurde 10cm dicke Schafswolle anberacht. Wie bei allen Messergebnissen ist eine Absorptionsgraderhöhung bei etwa 300Hz zu erkennen. Das Ergebnis ist als dunkelblauer Graph (01B & 02B) in obigem Diagramm abgebildet.

Nun wurde die Lochplatte mit stärker abgerundeter Öffnung vermessen. Der Frequenzgang ist nahezu ident mit Messung 01B & 02B. Das Ergebnis ist als blauer Graph (03B & 04B) in obigem Diagramm abgebildet.

Auch das Lochplattenmodell mit unstetiger Abrundung weist kaum Unterschiede zu den beiden vorigen Messungen auf. Das Ergebnis ist als hellblauer Graph (05B & 06B) in obigem Diagramm abgebildet.

Der Absorptionsgrad der Lochplatte mit konischen Löchern weist zu hohen Frequenzen eine leichte Erhöhung von bis zu 0,2 auf. Das Ergebnis ist als türkiser Graph (07B & 08B) in obigem Diagramm abgebildet.

Nun wurde nochmals die normale Lochplatte mit zylindrischen Löchern zum Vergleich gemessen. Sie weist einen ähnlichen jedoch für mittlere Frequenzen etwas niedrigeren Absorptionsgrad auf. Das Ergebnis ist als gelbgrüner Graph (09B & 10B) in obigem Diagramm abgebildet.

Der Frequenzgang des Absorptionsgrades der Lochplatte mit stufenförmiger Öffnung ist mit Messung 07B & 08B vergleichbar. Das Ergebnis ist als oranger Graph (11B & 12B) in obigem Diagramm abgebildet.

Zum Schluss wurde noch die Schafswolle ohne die Lochplatten davor vermessen. Es ist eine deutliche Erhöhung des Absorptionsgrades zu hohen Frequenzen hin erkennbar. Das Ergebnis ist als

roter Graph (13B & 14B) in obigem Diagramm abgebildet.

Zusammenfassend kann man sagen, dass verschiedene Lochformen vorwiegend bei Frequenzen ab etwa 1kHz einen Einfluss auf den Absorptionsgrad haben. Der maximale Unterschied beträgt dabei etwa  $\Delta\alpha = 0,2$ . Das Lochplattenmodell mit den konischen Löchern geht dabei als Favorit hervor, da es im Vergleich zur Schafswolle ohne Lochplatte zu den tiefen und mittleren Frequenzen eine Absorptionsgraderhöhung und zu höheren Frequenzen hin die geringste Abschwächung erzielt. Das könnte daran liegen, dass bei konisch gebohrten Löchern - vergleichbar mit einem Konushorn für Lautsprecher - die akustische Impedanz zu hohen Frequenzen hin besser angepasst ist.



  
Fazit

Abschließend lässt sich die Arbeit in drei Themenschwerpunkte unterteilen.

1. **Die Erstellung einer Akustiksimulation mittels *Grasshopper* und *Rhinoceros3D*,** um eine geeignete grafische Repräsentation von geometrischer Raumakustik als Lern- und Experimentiermittel insbesondere für ArchitektInnen zu schaffen. Die finalisierte Simulation wurde allen Studierenden und Mitwirkenden des Seminars schließlich als *Grasshopper-Cluster* zur Verfügung gestellt. In dieser wurden grundlegende akustische Prinzipien implementiert, die jedoch noch viel Freiraum für weitere Verbesserungen lassen. Vor allem die Erweiterung um komplexere Funktionalitäten, welche der tatsächlichen Schallausbreitung entsprechen, wie z.B. Reflexionen höherer Ordnung oder eine Abhängigkeit des Absorptionsgrads vom Schalleinfallswinkel, wäre wünschenswert. Jedoch drängt sich hierbei die Frage auf, wie sinnvoll eine Weiterführung dieses Projekts in *Rhinoceros3D* ist, da das Programm grundsätzlich nicht für eine Echtzeit-Berechnung von akustischen Vorgängen konzipiert ist und somit eine deutliche Verlangsamung bei der Berechnung der Schallstrahlen und 3D-Objekte die Folge ist. Eine Lösung dieses Problems wäre der Umstieg auf eine *Low-Level Programmiersprache*, was aber eine erhebliche Steigerung des Arbeitsaufwands bei der Entwicklung mit sich brächte.
2. **Der Entwurf verschiedener adaptiver und statischer Absorbermodelle.** Hier wurde während des Seminars versucht, die Architekturstudierenden von der Entwicklung der Entwürfe bis zur Konstruktion erster Prototypen in akustischen Angelegenheiten zu beraten und Anregungen zur Verbesserung der Funktionsweise zu geben. Diese Zusammenarbeit war aus der Perspektive von Elektrotechnik-Toningenieur-Studierenden eine komplett neue Erfahrung, da sich die Herangehensweisen der Architekturstudierenden an Probleme und der kreative Schaffensprozess deutlich unterscheiden. Das Seminar war somit auch ein Beitrag zum Dialog dieser zwei eng verbundenen Disziplinen, weil erreicht wurde, eine produktive Kollaboration zwischen AkustikerInnen und ArchitektInnen zu schaffen.
3. **Das Prüfen der Entwürfe auf ihre akustischen Eigenschaften.** Durch Messungen im 1:10 Modellhallraum konnten, nach der Erstellung der Modelle, erste Entscheidungen getroffen werden, welche Prototypen schließlich in Originalgröße gebaut werden sollten. Einige Modelle, die sich in den Messungen durch gute Absorptionsgrade kennzeichneten, konnten als Prototyp nicht fertiggestellt werden, da entweder die Konstruktion eines gut funktionierenden Steuermechanismus nicht gelang oder sich diese bereits in der Planung als zu komplex herausstellte. Beispiele dafür sind das Muschelmodell oder das Streifenmodell. Der Vergleich der Absorptionsgrade verschiedener Lochmuster könnte als Grundlage einer Schaffung von ästhetisch ansprechenderen Lochplattenabsorbern dienen, da sich beispielsweise bei einer konischen Lochform auch bessere Absorptionsgrade im Vergleich zu einem zylindrischen Loch erzielen lassen.

Nachdem alle von den Studierenden gebauten Paneele fertiggestellt sind, ist geplant, diese in zwei Lehrsälen der TU Graz anzubringen. Leider war es uns im Rahmen dieser Arbeit nicht mehr möglich, auch noch diesen finalen Schritt zu realisieren. Es würde sich jedoch weiterführend

anbieten, einerseits eine Absorptionsgradmessung aller Paneele in einem Hallraum durchzuführen und mit den Ergebnissen des 1:10 Modellhallraums zu vergleichen. Andererseits wäre es von Interesse, einen Vergleich zwischen den Nachhallzeiten der Lehrsäle mit und ohne Paneele, sowie zwischen den Nachhallzeiten mit geöffneten und geschlossenen Paneelen durchzuführen. Die Messdaten zu den leeren Sälen sind bereits vorhanden und finden sich in der Bachelorarbeit von Frischmann, Hofer und Schiller[5]. Auch eine Koppelung der Paneelsteuerung an die Raumbelegungspläne wäre eine komplexe, weiterführende (Arduino-)Programmieraufgabe, die möglicherweise in zukünftigen Projekten verwirklicht werden kann.

---

# Literaturverzeichnis

- [1] *ARCHITECTURAL/acoustics/EXT*. Interspeech Conference Graz, Austria, 2019
- [2] BASSUET, A. ; RIFE, D. ; DELLATORRE, L. : Computational and Optimization Design in Geometric Acoustics. In: *Building Acoustics* 1, Nr. 1, 2014
- [3] EYRING, C. F.: Reverberation Time In “Dead” Rooms. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 1, Nr. 2A, 1930
- [4] FASOLD, W. ; VERES, E. : *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Huss-Medien, 2003
- [5] FRISCHMANN, C. ; HOFER, R. ; SCHILLER, K. : *Akustische Bestandsaufnahme der TU-Hörsäle Inffeldgasse*. Bachelorarbeit, Technische Universität Graz, 2019
- [6] HARTEN, A. van d.: *Pachyderm Acoustical Simulation: An Open Source Acoustics Simulation Laboratory*. <http://www.perspectivesketch.com/pachyderm/index.php/pachyderm>, 2015
- [7] KROKSTAD, A. ; STROM, S. ; SØRSDAL, S. : Calculating the Acoustical Room Response by the Use of a Ray Tracing Technique. In: *Journal of Sound and Vibration* 8, Nr. 1, 1968
- [8] MÖSER, M. : *Technische Akustik*. Springer, 2015
- [9] MÜLLER, M. : *Entwurf und Konstruktion eines Modell-Hallraumes im Maßstab 1:10*. Toningenieursprojekt, Technische Universität Graz, 2016
- [10] PROBST, W. : Die Schallabsorption von Kulissendecken. In: *Lärmbekämpfung* 3, Nr. 2, 2008
- [11] SABINE, W. C.: *Collected Papers On Acoustics*. Harvard University Press, 1922
- [12] SCELO, T. : Integration of Acoustics in Parametric Architectural Design. In: *Acoustics Australia* 43, Nr. 1, 2015
- [13] SCHROEDER, M. R.: New Method of Measuring Reverberation Time. In: *The Journal of the Acoustical Society of America* 37, Nr. 3, 1965
- [14] ÖNORM B 8115-3: *Schallschutz und Raumakustik im Hochbau - Teil 3: Raumakustik*. Austrian Standards, 2005
- [15] ÖNORM EN ISO 10534-2: *Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren - Teil 2: Verfahren mit Übertragungsfunktion*. Austrian Standards, 2002
- [16] ÖNORM EN ISO 354: *Akustik - Messung der Schallabsorption in Hallräumen*. Austrian Standards, 2003



## Anhang zu Kapitel 3

### Dateienverzeichnis: Grasshopper Reflexions-Simulation

In dem dieser Arbeit beigefügten Ordner `.\Grasshopper_ Reflexions_Simulation\` befinden sich die im Rahmen dieser Arbeit (s. Kapitel 3) erstellte Grasshopper Reflexions-Simulation, sowie Vorlagen und Beispiele zur leichten Verwendung dieser. Es sind folgende Dateien vorhanden.

Dateiname	Beschreibung
Reflexions_Sim_ReadMe.pdf	pdf-Datei mit grundlegenden Informationen zur Simulation, ihrer Verwendung und Troubleshooting
Reflexions_Sim.ghcluster	ghcluster-Datei des Simulationskerns
Vorlage.gh	gh-Datei mit rudimentär eingebundenem Simulations-Cluster
Drehbares_Rechteck.gh	gh-Datei mit Definition eines rotierbaren Rechtecks mit vollständig eingebundenem Simulations-Cluster
Pyramiden_Array.gh	gh-Datei mit Definition eines Arrays aus Pyramiden mit vollständig eingebundenem Simulations-Cluster
Aufklappbare_Pyramide.gh	gh-Datei mit Definition einer aufklappbaren Pyramide mit vollständig eingebundenem Simulations-Cluster

# Grasshopper Reflexions-Simulation

Dieses Learning-Tool soll die verschiedenen akustischen Reflexionsarten sowie die Schallabsorption an geometrischen Strukturen veranschaulichen. Je nach Frequenz und Ort der Schallquelle ändert sich das Absorptions- und Reflexionsverhalten, was sich in der Richtung der reflektierten Schallstrahlen und der Verfärbung ebendieser zeigt. Umso dunkelblauer der reflektierte Schallstrahl dargestellt wird, umso weniger Schallenergie ist nach der Reflexion vorhanden, bzw. umso mehr Schall wird absorbiert. Bei vollständiger Absorption sind keine reflektierten Strahlen sichtbar.

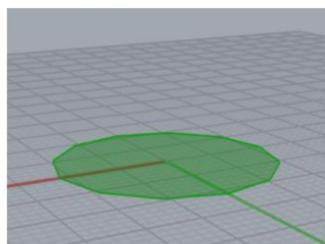


Bei dieser Simulation handelt es sich lediglich um eine Vereinfachung der realen, relativ komplexen physikalischen Begebenheiten. So werden zum Beispiel runde Oberflächen durch ein Gitternetz angenähert. Außerdem wird der Einfluss des Einfallswinkels auf die Schallabsorption vernachlässigt.

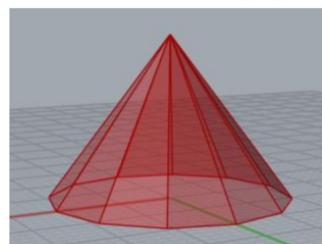
In diesem Ordner befindet sich der Grasshopper-Cluster *Reflexions\_Sim.ghcluster*, der per drag-and-drop in jede andere Grasshopper-Datei eingefügt und dort als normales Bauteil verwendet werden kann.

Die einzelnen Eingänge des Clusters sind dabei wie folgt definiert:

- **Sx:** x-Koordinate der Schallquelle in [mm]
- **Sy:** y-Koordinate der Schallquelle in [mm]
- **Sz:** z-Koordinate der Schallquelle in [mm]
- **f:** Frequenz der Schallquelle als Dropdown-Menü in Oktavbändern von 125Hz bis 4kHz
- **Auflösung:** Dichte der angezeigten Schallstrahlen, die von der Quelle ausgehen, als Dropdown-Menü in drei Stufen: *niedrig*, *mittel* und *hoch*
- **Basis:**  $b$  Grundflächen als **Tree**  $\{b\}$
- **Basis-Material:** Jeweiliges Material aus Dropdown-Menü als **Tree**  $\{b\}$  zur Bestimmung der Absorptionseigenschaften
- **Struktur:** Alle  $s$  Oberflächen auf der jeweiligen  $b$ -ten Grundfläche als **Tree**  $\{b,s\}$
- **Struktur-Material:** Material aus dem Dropdown-Menü für die jeweilige Oberfläche als **Tree**  $\{b,s\}$



Bsp: Basisfläche

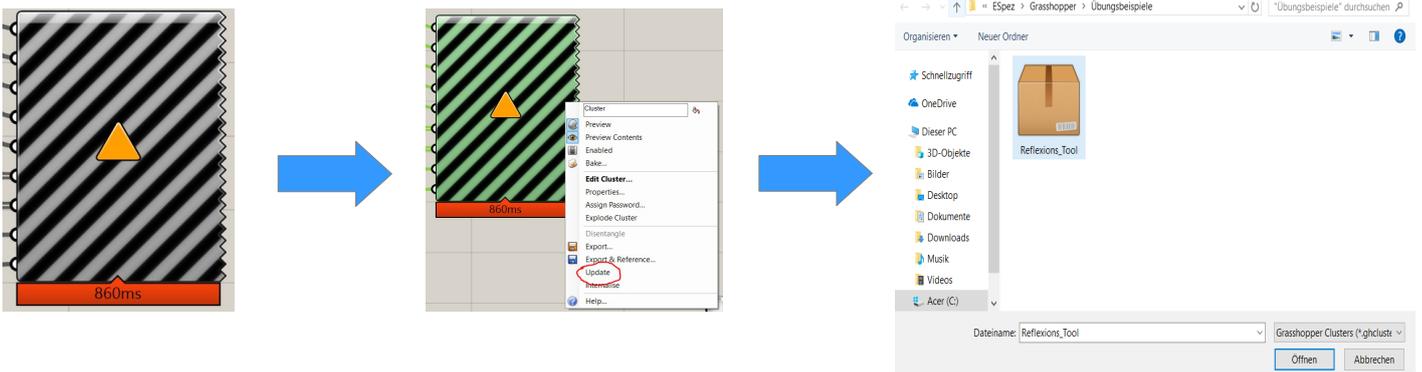


Bsp: Oberflächen

Ebenfalls in diesem Order befindet sich das Grasshopper-File *Vorlage.gh*, in dem der Cluster *Reflexions-Sim* mit einigen schon verbundenen Standardeingängen vorliegt. Auch innerhalb der drei beigelegten Beispieldateien *Drehbares\_Rechteck.gh*, *Pyramiden\_Array.gh* und *Aufklappbare\_Pyramide.gh* soll das richtige Verbinden der Eingänge verdeutlicht und die Reflexionsdarstellung anhand von einfach parametrisierbaren statischen und dynamischen Objekten demonstriert werden.

### Hilfe bei bekannten Fehlern:

- Bei der Verwendung von Grasshopper tritt manchmal ein Fehler auf, bei dem Flächen im Rhino3D-Vorschaufenster nicht mehr dargestellt werden. In diesem Fall muss das Programm neu gestartet werden.
- Ist der Reflexions-Sim-Cluster quergestreift mit gelbem Dreieck, muss dieser mittels Rechtsklick auf den Cluster und Auswählen des Punktes *update* aktualisiert werden. Im daraufhin geöffneten Kontextfenster muss *Reflexions\_Sim.ghcluster* als Referenz gewählt werden.



# B

## Anhang zu Kapitel 4

- Abgabe zum Seminar von Benjamin Holtz
- Abgabe zum Seminar von Viktoriya Yeretska
- Abgabe zum Seminar von Anna Katrin Ebenführer
- Abgabe zum Seminar von David Broser
- Abgabe zum Seminar von Wulfric Clackson



Faltschiebeläden

Mechanismus der auch für Akustik-Paneele denkbar ist.

Ansprechende optik.

Funktional.

[Link](#)

quelle: Baunetzwelt.com



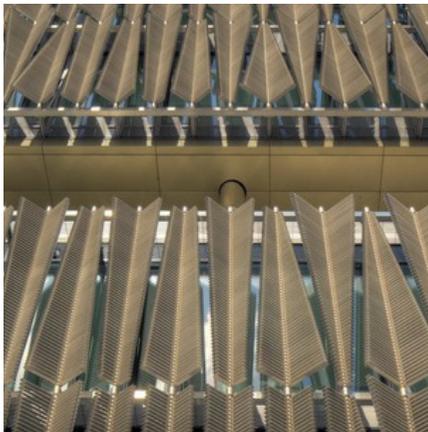
Modulare Struktur

Grundgerüst, dass sich zusammen schieben lassen könnte, in verschiedenen Richtungen.

Grundgerüst ist als Tragkonstruktion verschiedener Paneele denkbar.

[Link](#)

quelle: interaction design.com



Rotierbarer Sonnenschutz

Innovativer Mechanismus.

Interessante Formen sind möglich.

[Link](#)

quelle: Frener-Reiter Fassaden.com

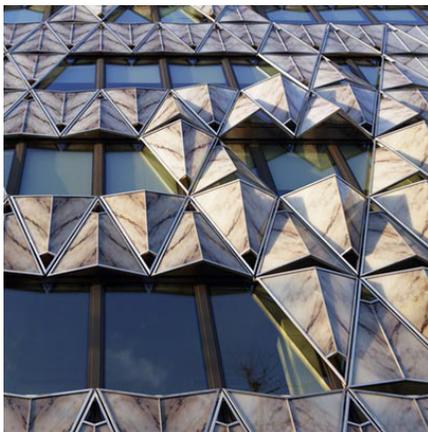


Zentralverschluss Kamera

Anwendung auf Akustik Elemente übertragbar?

[Link](#)

quelle: puchner.org



Origami Fassade

Falt Mechanismus.

Innovative Formen.

Funktional.

[Link](#)

quelle: Manuelle Gautrand.com



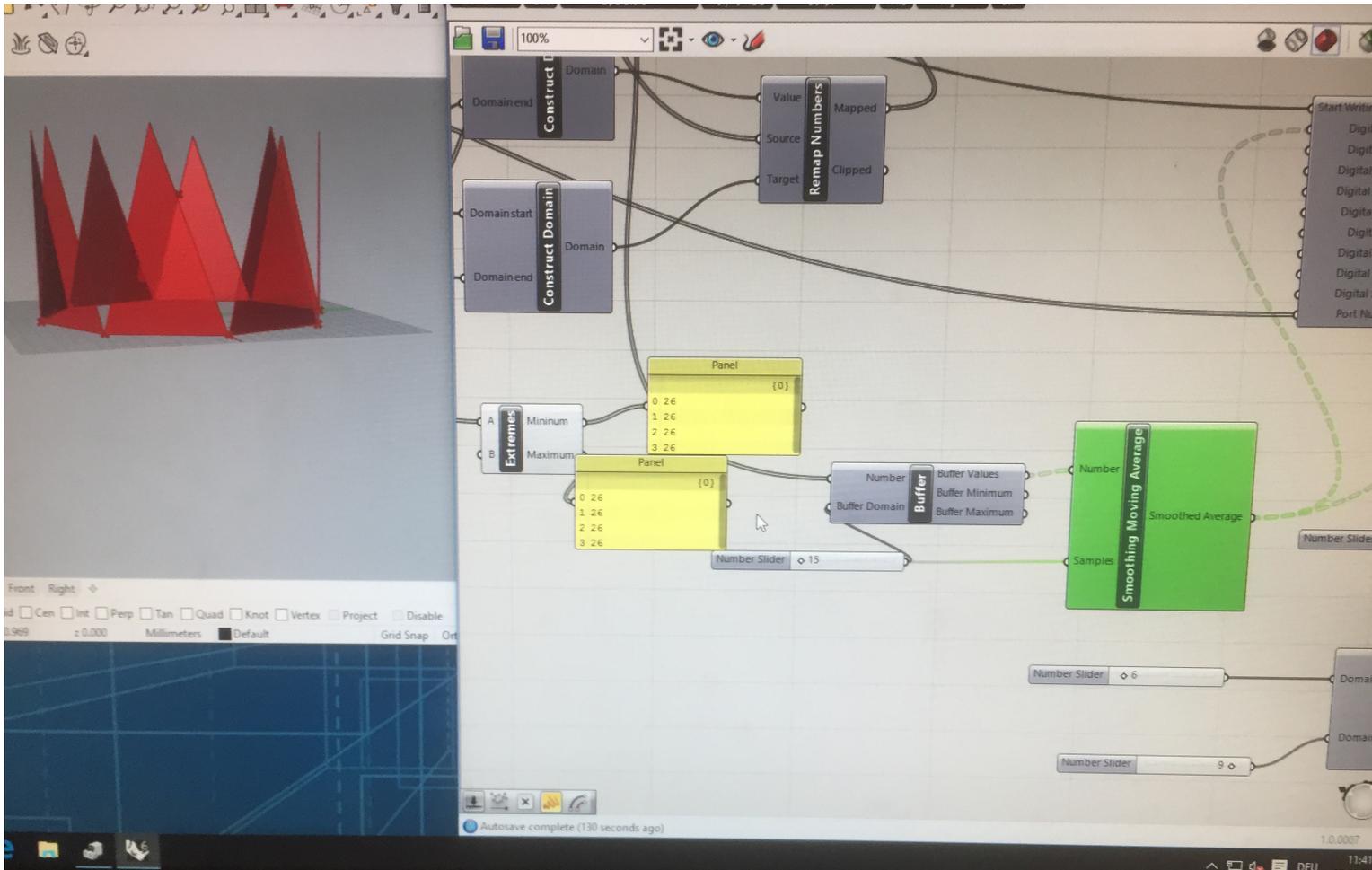
Origami Faltsructuren

Innovative Formen.

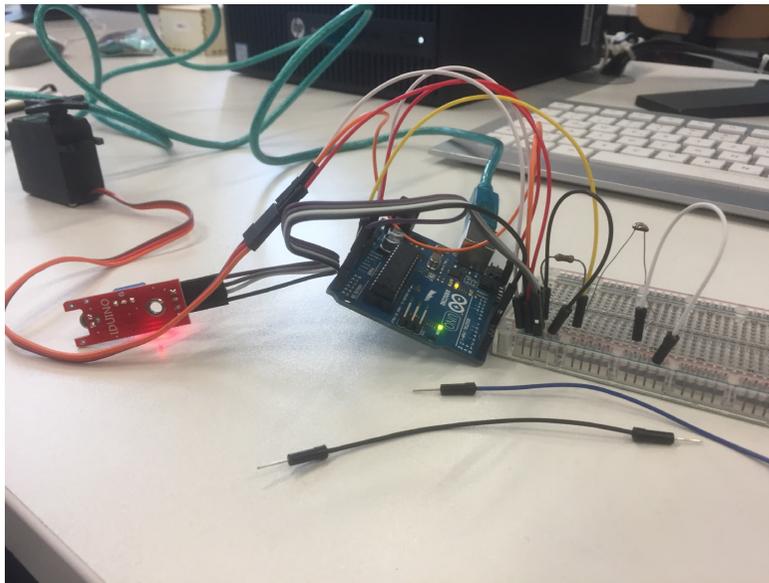
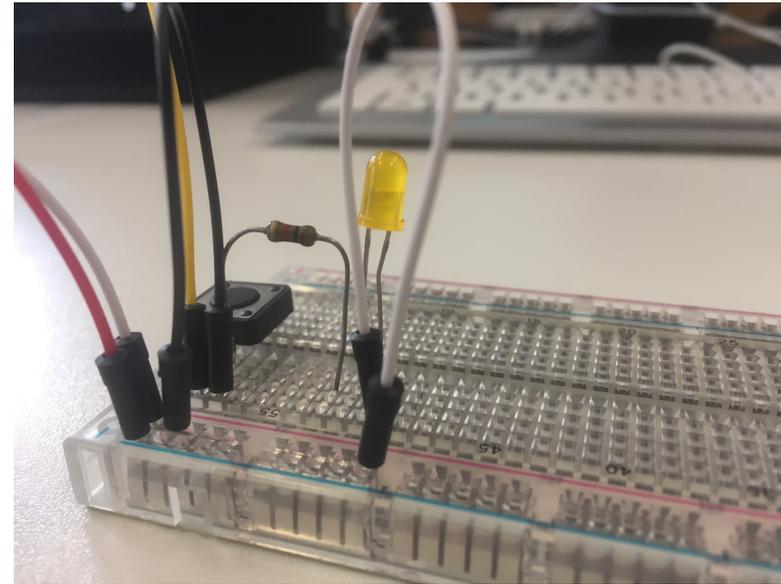
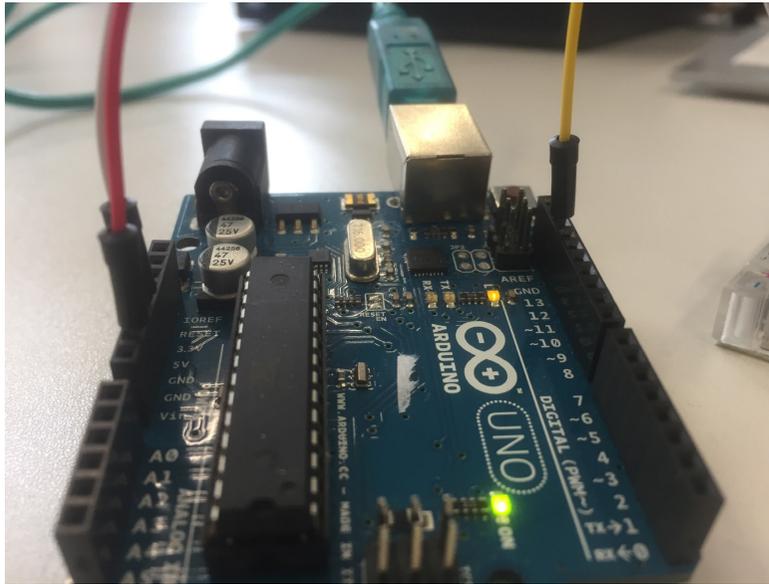
Große Oberfläche.

[Link](#)

quelle: grasshopper3d.com



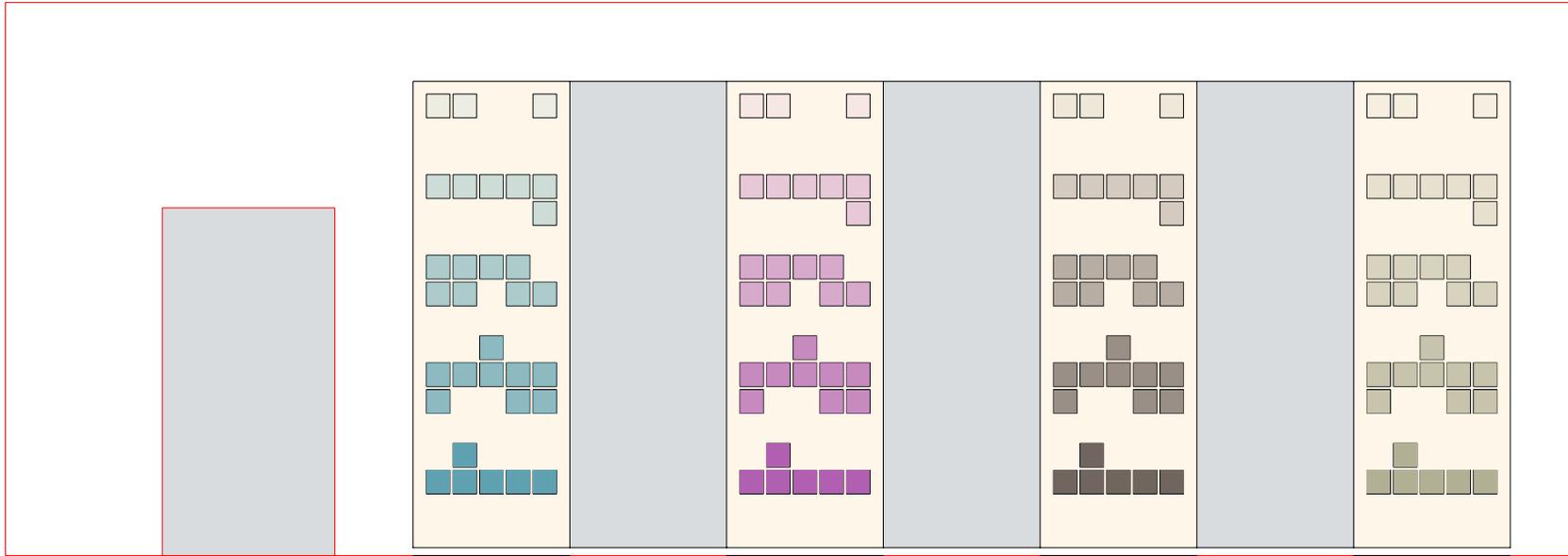
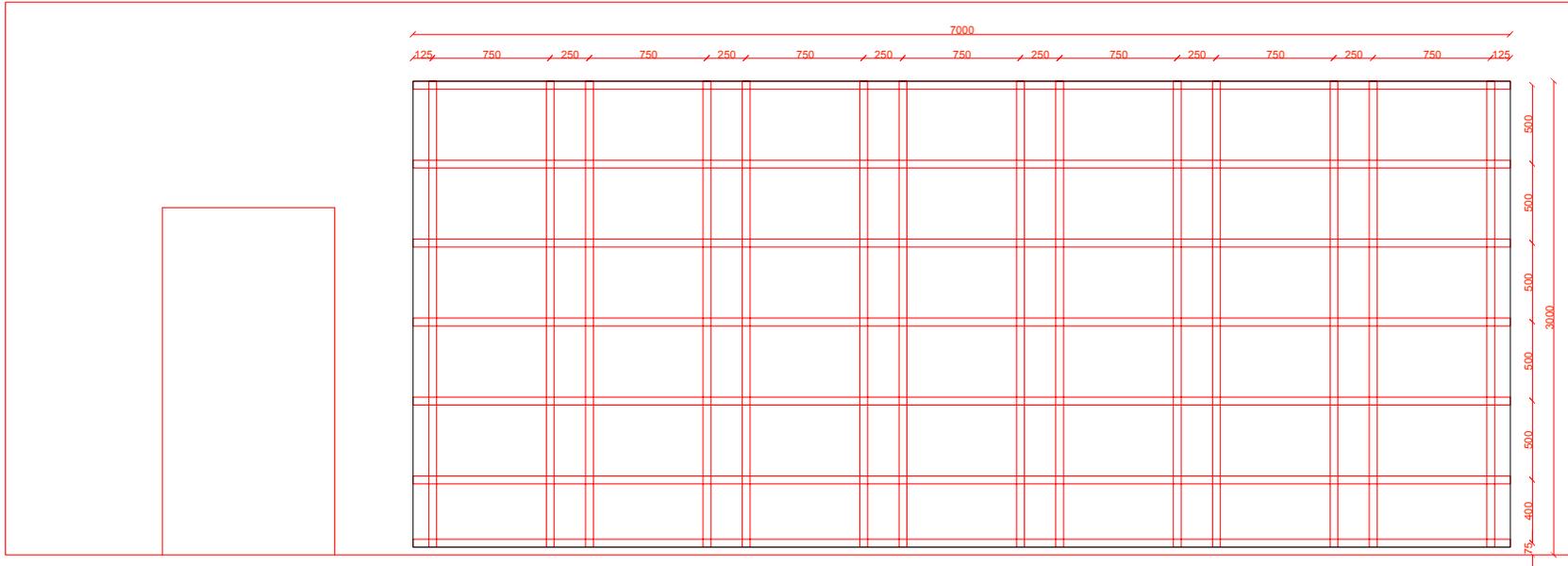
Das Programmieren mit Grasshopper in Rhino war Inhalt der ersten Übungen. Um sich mit der Oberfläche vertraut zu machen, haben wir eine modulare Pyramide entworfen, die sich in Höhe und Anzahl der Seitenflächen verändern konnte sowie sich öffnen und schließen konnte.

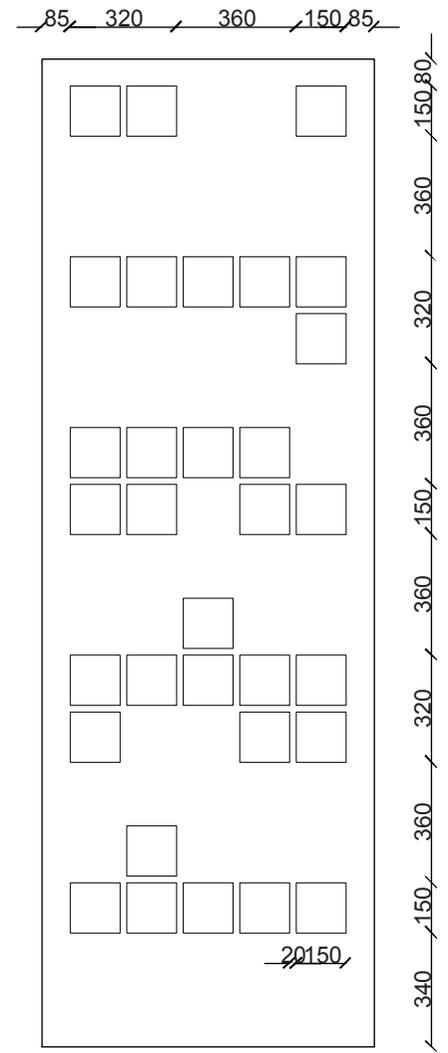
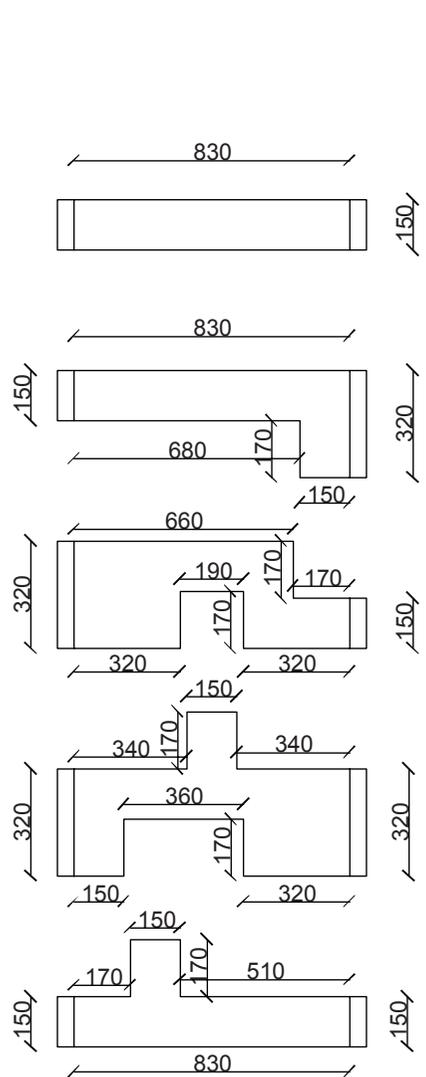
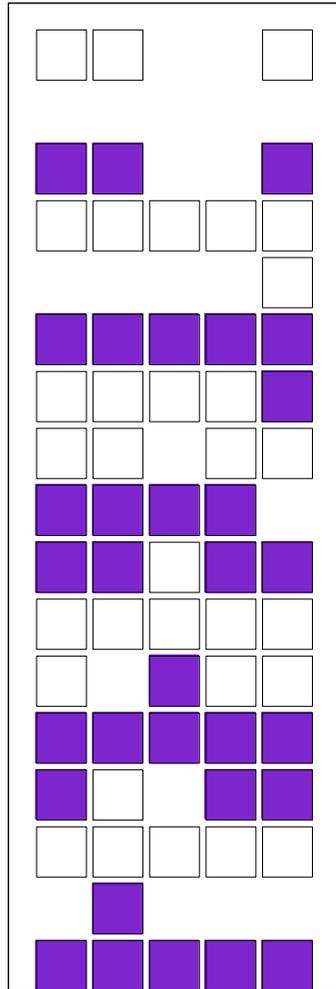


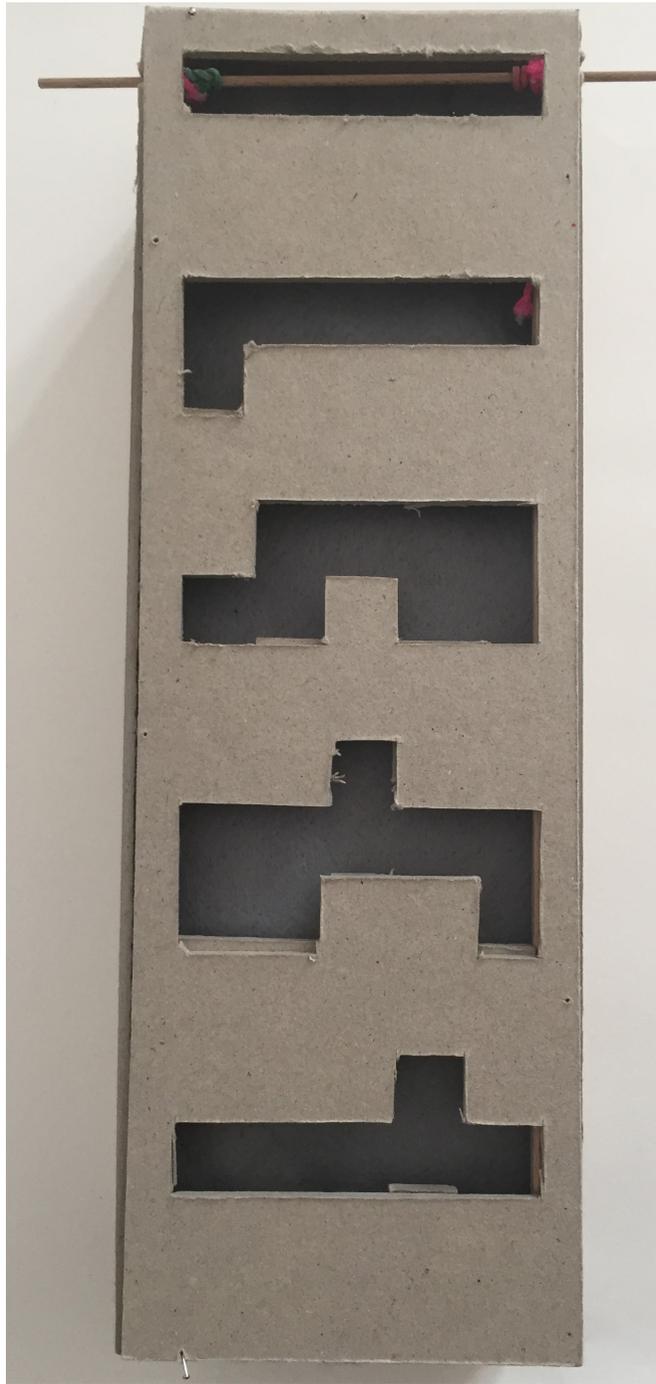
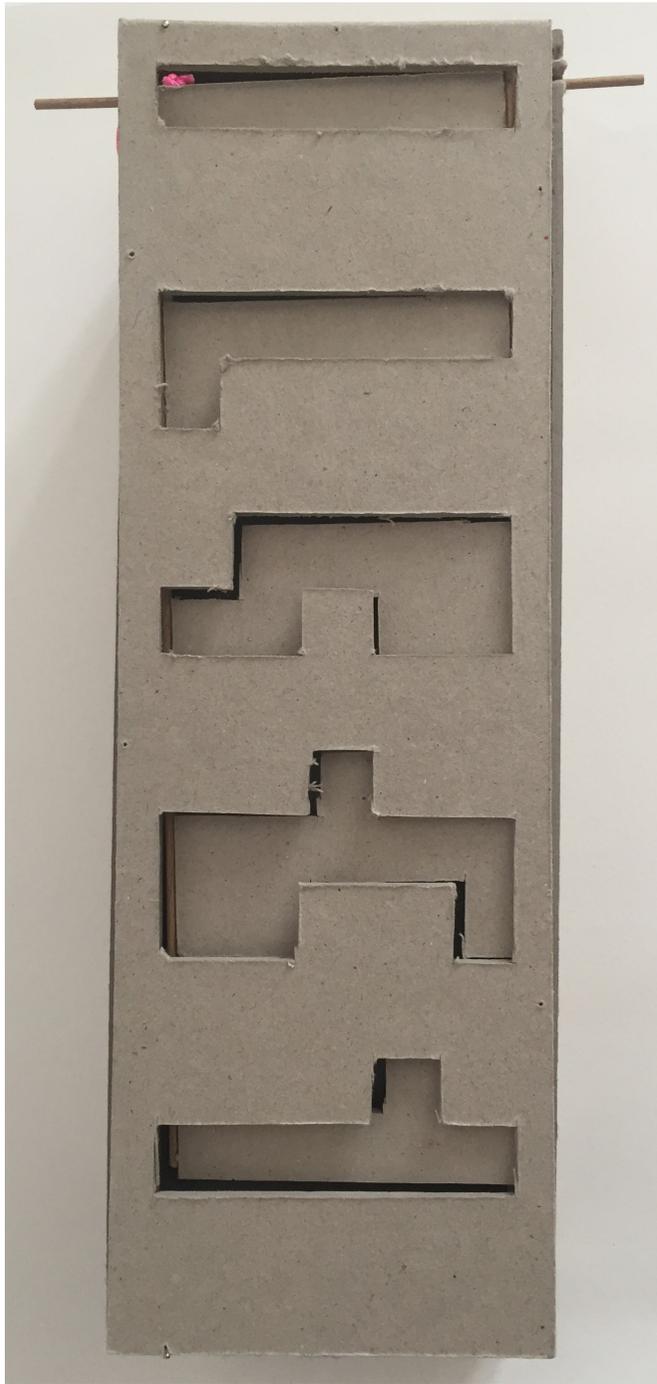
Im ersten Bild ist der Arduino Uno zu sehen, ein Bord mit analogen und digitalen Ein- und Ausgängen. Der Arduino wird über ein USB-Kabel mit dem Computer verbunden und mithilfe der Firefly Software im Grasshopper gesteuert.

Wie in den anderen beiden Bildern zu sehen ist, können über ein Steckbrett noch zusätzliche Elemente wie beispielsweise ein Schalter oder verschiedene Sensoren angeschlossen werden.

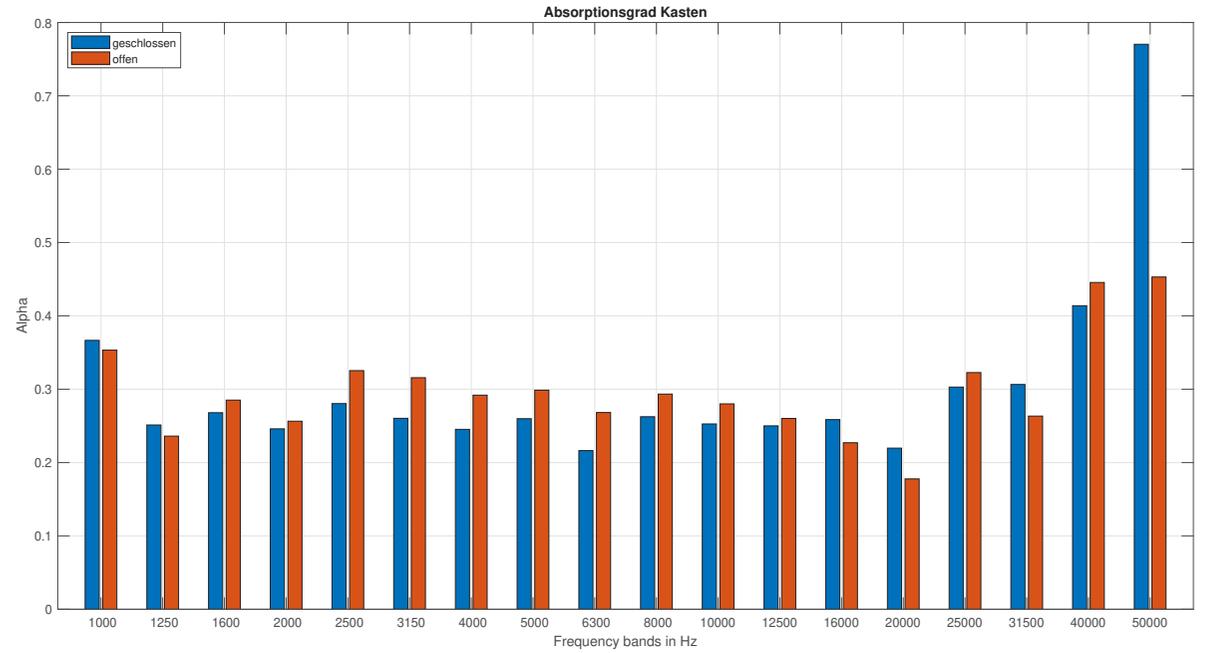
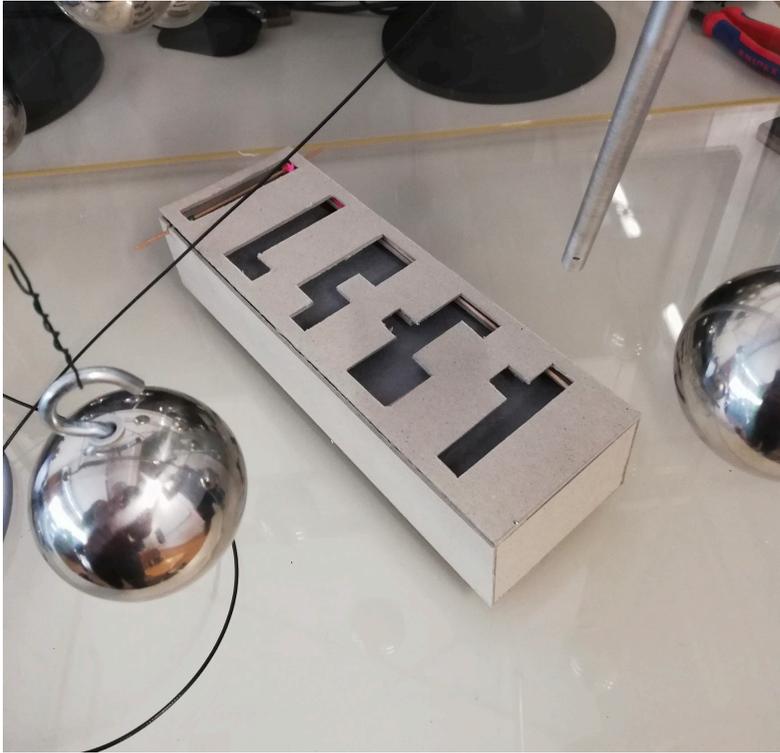
In unserem Fall haben wir einen Akustik und einen Licht Sensor angeschlossen, sowie einen Servomotor der sich bei entsprechender Lautstärke, entsprechenden Lichtverhältnissen gedreht hat.







ADAPTIVE ACOUSTICS - ARBEITSMODELL

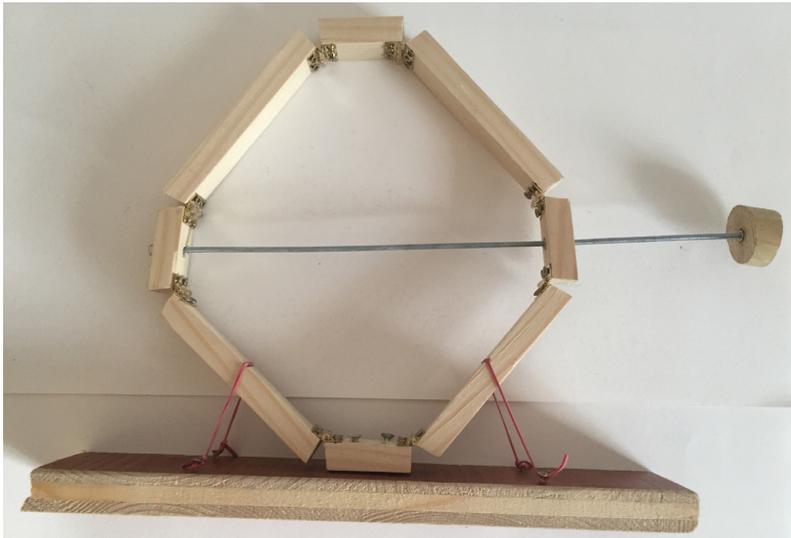


Die Messwerte meines Modells zeigten im Vergleich mit den anderen Modellen einen deutlich schlechteren Absorptionswert bei allen Frequenzen. Aufgrund dessen, wurde entschieden mein Modell nicht zu bauen.

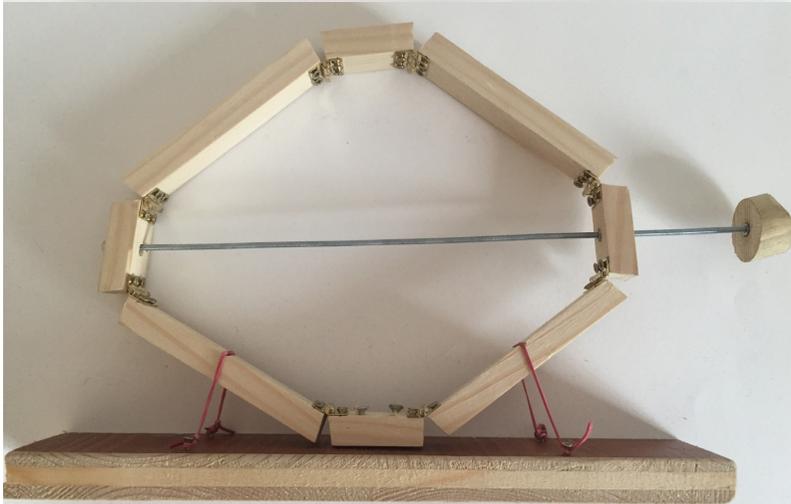
Für mich liegt der Grund eindeutig an der großen Karton Oberfläche im Vergleich zu den anderen Modellen, welche größtenteils aus Filz oder Vlies bestanden.

Die Lösung für einen höheren Absorptionsgrad wäre somit, den „Kasten“ nicht aus MDF sondern aus Schaumstoff oder Akustikvlies zu bauen bzw. zu beschichten.

23 cm



19 cm



12 cm



27 cm

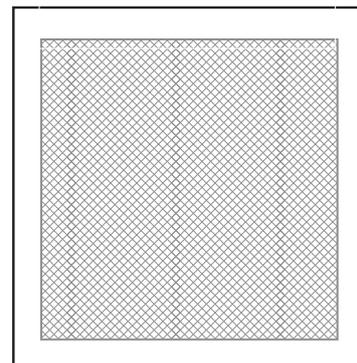
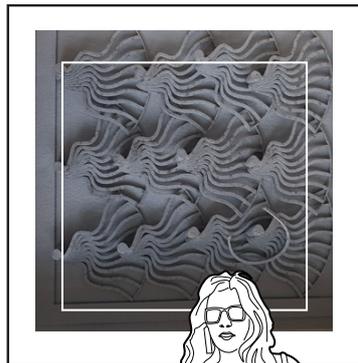


ESPEZ SS 2019 Adaptive Acoustics

# Acoustic Playground

Viktoriya Yeretska

11718119





## **INHALT**

### AUFGABENSTELLUNG / RELEVANZ

01\_Einführung in die Akustik (Jamilla Balint)

02\_Zusammenfassung Lektüre Kap. 1-3

### RECHERCHE

01\_Adaptivität

02\_Materialien (in Zusammenarbeit mit Mendi Kocis)

### GRASSHOPPER

01\_Einführung Oberfläche / Funktionen

02\_Pyramide

03\_Steuerung der Pyramide

### ARDUINO

01\_Einführung / Einfache Steuerung Komplexe Steuerung

### ENTWURF "ACOUSTIC PLAYGROUND"

01\_Konzept

02\_Realisierung (in Zusammenarbeit mit Desiree Wurnitsch)

## **EINFÜHRUNG**

### *Aufgabenstellung / Relevanz*

- adaptiv, faltbare Strukturen, Anwendung einfacher Prinzipien - wie entwickelt man eigene Strukturen (Daten aus der Umgebung in eine Geometrie übersetzen)
- jeder stellt sich seine eigene Aufgabe / Ziel - Akustik in der Architektur sehr oft vernachlässigt, beim Gestaltungsprozess nicht nicht mitgedacht / erst durch Sanierungen optimiert
- aufbauend auf vorangegangenen Projekten des Instituts: bisher nur statische Paneele, was kann man damit weiter machen?



## **EINFÜHRUNG IN DIE AKUSTIK (Jamilla Bilant)**

### *Der Zusammenhang Klang - Raum*

- Abhängigkeit Klang - Raumvorstellung im Kopf: die Wahrnehmung der Raumdimensionen sowie der Materialität (der räumliche Eindruck) sind akustisch steuerbar bzw. veränderbar
  
- Die Akustik eines Raums ist von 3 Hauptfaktoren abhängig: Raumvolumen, Raumgeometrie, Oberflächenbeschaffenheit
  
- Herausforderungen der akustischen Gestaltung sind anwendungsspezifisch: Hörsaal  
- Sprache Besprechungsraum - Kommunikation  
Konzertsaal - Musik Museum - Große Kirche
  
- Sprache, Musik, Größe
  
- Kirchen sind grundsätzlich sehr hallig (Oberflächen oft schallhart, z.B. Marmor oder Stein, der Schall wird reflektiert und hallt lange nach)

- Sitzmöbel, Personen, Vorhänge haben Einfluss auf die Akustik (Absorption), z.B. im Theater ist die Akustik dadurch eher trocken, gute Sprachverständlichkeit

- den akustischen Raum als Gestaltungselement nutzen (aural aesthetics) - Klang reagiert mit der Oberfläche: Wie die Oberfläche gestaltet ist, ist ausschlaggebend (Effekt)

*Grundsatzdiskussion: Was ist wichtiger Architektur oder Akustik?*

BSP.: die Elbphilharmonie Hamburg - Maßgabe: einer der besten Konzerthäuser der Welt (Akustiker Yasuhisa Toyota) - die Akustik wird sehr unterschiedlich empfunden / bewertet (subjektive Komponente)  
BSP: Raum innerhalb eines Musikinstruments

## *Akustische Ökologie*

Film: R. Murray Schafer „LISTEN“ (akustische Ökologie)

- mit allen Sinnen gestalten
- wir sind ununterbrochen von verschiedenen Geräuschen umgeben, nehmen diese aber oft nicht mehr wahr oder versuchen sie auszublenden ( z. B. mittels Kopfhörer)
- eine Tonbandaufnahme entspricht nicht dem realen Ton / Klang

Lärmspiralen: BSP.: Kunsthauscafé - Rohbau (sehr Hallig): schlechte Sprechverständlichkeit führt zur kontinuierlichen Erhöhung des Lärmpegels und zur noch schlechteren Verständlichkeit

BSP.: Ruhepole in Linz anlässlich der europ. Kulturhauptstadt verschiedene öffentlich zugängliche Ruheräume entwickelt (Initiative Hörstadt): bewusste und menschenwürdige gestaltung der hörbaren Umwelt ( Schallemissionen) hist. Vorbild die erste öffentliche Ruhehalle in Dresden (1911) Schutzraum vor alltäglichen Lärmmissionen und der Beschleunigung des Alltags (Großstadt)

- „Schalltoter Raum“ (echofreie / anechoische Kammer) : ein spezieller akustischer Laboratorium; ein extrem reflexionsarmer Raum, dessen Oberflächen so beschaffen sind, dass daran nahezu kein Schall reflektiert wird. Die absolute Stille ist unerträglich (Foltermethode)

*Was hören wir?*

Schallstrahlen: direkter Schall, Schallreflexionen

- Die Sensibilität des menschlichen Gehörs ist abhängig von der Frequenz

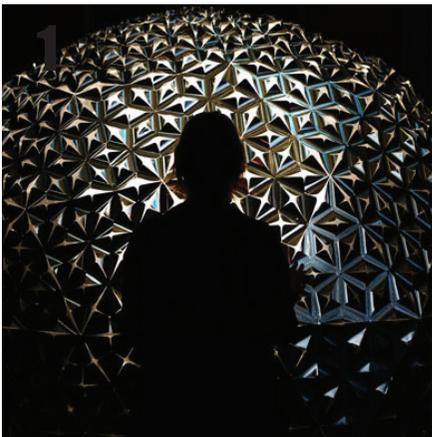
- Wichtige Formel in der Akustik: Wellenlänge (in m) = Schallgeschwindigkeit (c) : Frequenz (f) - Verhältnis der Wellenlänge zum Hindernis ist wichtig

Geometrische Gesetze: Schallwellen verhalten sich wie Lichtwellen: Einfallswinkel = Ausfallswinkel (bei Reflexionen)

- Absorptionsgrad: Abhängig von der Geometrie und Materialität der Oberfläche

Materialien und Wirkungsweisen

- poröse Strukturen (z.B. Filz, Heraklith) - gelochete Flächen - bewegliche Skulpturen (drehbar, schwenkbar, auf- / zumachen...) - geschlitzt / gelocht (Resonanzabsorber) - microperforated (meist kombiniert, dahinter poröse Materialien)

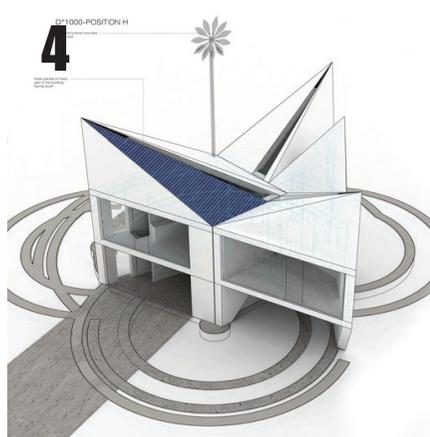


quelle: studio roosegaarde

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

Studio Roosegaarde, "Lotus", Lille (2012)

Reagiert auf die Anwesenheit bzw. die Anzahl der Menschen im Raum. Die einzelnen "Lotus-Module" der Kuppel sind aus einer lichtsensitiven Folie hergestellt. Sensoren geben Information an die darunterliegende Lichtquelle weiter, die beim Betreten des Raumes zu leuchten beginnt. Das Licht strahlt dabei stets dem Besucher entgegen und bewirkt so die Auffaltung der Folie an einer bestimmten Stelle. Bei identischer Form der Einzelmodule ist die Gesamtform variabel. Ein Möglichkeitsspektrum von glatter und strukturierter bis poröser, durchlässiger Oberfläche. *smart materials, modular, öffnen/schließen, interaktive Installation, Beleuchtung*



quelle: dezeen

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

The D\*Haus Company, The Dynamic Haus (2012)

Durch eine mehrstufige Transformation eines Rechtecks zu einem Dreieck lassen sich viele unterschiedliche Kombinationsmöglichkeiten von Innen-/Außenseiten sowie Formen erreichen. Im Fall von differenzierten Oberflächenbehandlungen kann dieses Prinzip ein großes Variationsspektrum an unterschiedlichen Qualitäten bieten. Die einzelnen Elemente können als Form zusammenhängend sein oder voneinander getrennt werden. Umsetzbarkeit in verschiedenen Maßstäben denkbar (als Modul oder Raumteiler/Möbel).

*Geometrie, innen/außen, modular, adaptives Wohnhauskonzept, Drehung*



quelle: youtube / archdaily

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

Doris Kim Sung, "Bloom" (2012)

Basiert auf der Vision einer adaptiven, "atmenden" Gebäudehülle. Die Verformung beruht ausschließlich auf der natürlichen Eigenschaft des Metalls, sich bei Hitzeeinwirkung auszudehnen (keine mechanische Regulierung notwendig). In Äquivalenz zur menschlichen Haut kann die Fassade so auf die äußeren Einflüsse reagieren und zwischen Geschlossenheit und Durchlässigkeit steuern. Die Vorteile sind dabei unter anderem geringes Materialgewicht und Flexibilität in der Gestaltung der Gesamtform.

*smart materials, adaptive Fassade, Auffaltung, Belüftung*



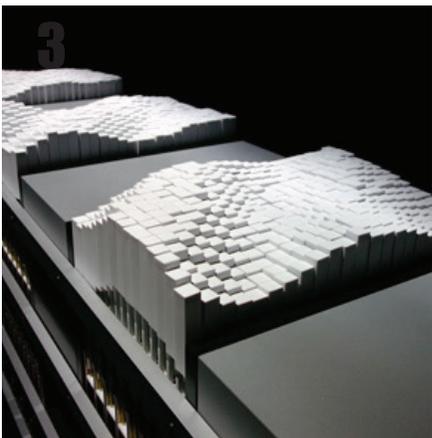
quelle: archdaily

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

Henning Larsen, SDU Campus, Kolding (2014)

1600 identischefaltbare Sonnenschutzelemente in Form eines Dreiecks aus perforiertem Stahl. Die integrierten Sensoren messen Licht- und Hitzelvels, wodurch der Grad der Öffnung ermittelt wird. Ein kleines Motor steuert die Fassade mechanisch. Die Bewegung und Rekombinationen von "offen" und "geschlossen" tragen zu einem abwechslungsreichen, spannenden Erscheinungsbild bei.

*adaptive Gebäudefassade, Sonnenschutz, faltbare Elemente*



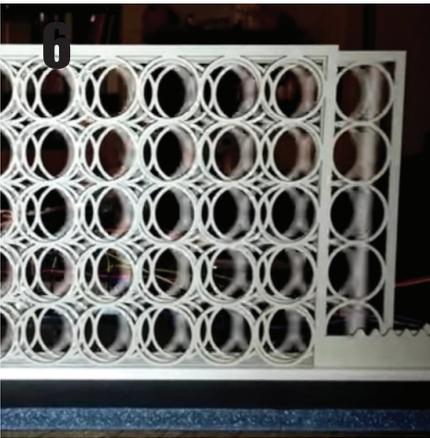
quelle: dezeen

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

MIT, "Transform" / der interaktive Tisch (2014)

Interaktives, robotisch gesteuertes Möbelstück, das auf die menschliche Anwesenheit / Bewegung über der Oberfläche reagiert (bewegungssensoren). Die vertikalen Verschiebungen einer Matrix einfacher, serieller Elemente (Stäbe, quadratischer Querschnitt) bewirkt die Entstehung unterschiedlicher Reliefs. Die Bewegung der Elemente wird einzeln / individuell gesteuert, was evtl. aufwendig sein kann. Zudem sind formale Einschränkungen (rechteckige Gesamtform) vorhanden.

*Relief, modular, interaktives Möbel, Verschiebung*



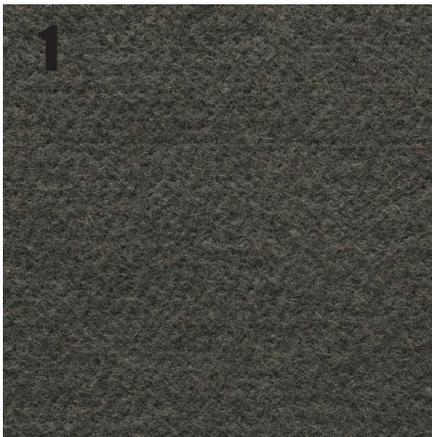
quelle: youtube

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

Dynamic Facade Prototype

Ein Prinzip der Verschiebung einzelner (Wand-) Schichten mit einem identischen Ornament gegeneinander. Bei diesem Beispiel geht es um Sichtschutz ( unterschiedliche Variationen zwischen offen und semiopak ). Dieses einfache Konzept birgt großes Potenzial, vor allem, wenn man die Materialität oder die Größe der Öffnungen variiert. Die Anwendung iauf die Gesamtstruktur ist genauso vorstellbar wie auf einzelne Elemente / Module.

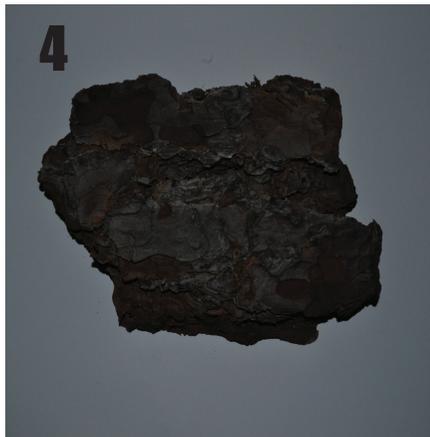
*Layer, Ornament, Wandprototyp, Verschiebung*



Schafwolle Akustikfilz

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

**Absrptionsgrad:** 0,6  
**Haptik:** weich, flauschig, warm  
**Optik:** verschiedenste Farben möglich  
**Formate:** Rollenbreite 150 cm  
**Gewicht:** 20-25 kg/m<sup>3</sup>  
**Preis:** 76, 60 EUR / 1m x 1,50 m  
**Brandschutz:** C- s2 d0  
**Pflege:** luftreinigend, schmutzabweisend  
**Recyclebarkeit:** ja  
**Verarbeitungsmöglichkeiten:** einfache mechanische Verarbeitung (z.B. durch Schneiden)



Waldkiefer Borke

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

**Absrptionsgrad:** 0,75  
**Haptik:** rau-hart, schuppig, duftend  
**Optik:** braunrot, tiefrissig, grobe schuppen  
**Formate:** abhängig vom Baumstamm  
**Rohdichte:** 490 kg / m<sup>3</sup>  
**Preis:** 55 Euro je m<sup>3</sup>  
**Brandschutz:** Insekten (?), Brandschutz, Feuchteschutz  
**Pflege:** robust, pflegeleicht, allergikerfreundlich, evtl. Insekten(?)  
**Recyclebarkeit:** ja  
**Verarbeitungsmöglichkeiten:** relativ einfache mechanische Verarbeitung mit Säge etc.



Reet

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

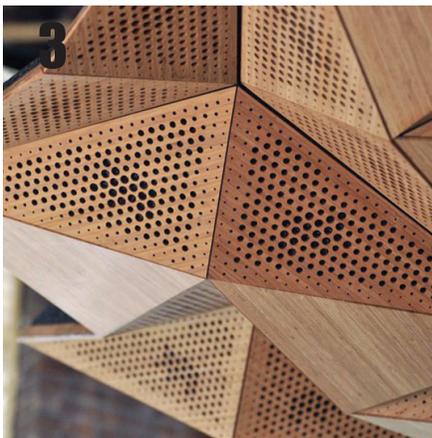
**Absrptionsgrad:** 0,75  
**Haptik:** rau, strukturiert  
**Optik:** feine, poröse schwammartige Optik, hell/dunkel Effekte, beige- und brauntöne  
**Formate:** 50 x 50 x 18 cm (Referenz)  
**Rohdichte:** 155 kg / m<sup>3</sup>  
**Preis:** 19,90 Euro für 5 m Schilfrohrhalme  
**Brandschutz:**  
**Pflege:** robust, pflegeleicht, allergikerfreundlich, evtl. Insekten(?)  
**Recyclebarkeit:** ja  
**Verarbeitungsmöglichkeiten / Beispielaufbau:** Ca. 168 mm Schilfrohrhalme (aufrecht stehend) verklebt mit Spezialschaum auf 12,5 mm Gipskarton-



Holzwole + Zement

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

**Absrptionsgrad:** 0,5  
**Haptik:** glatt, stellenweise rau und strukturiert, porös  
**Optik:** hellgrau mit Holzfasern  
**Formate:** variabel  
**Rohdichte:** 1,6- 1,9 kg / dm<sup>3</sup>  
**Preis:** HW 1 EUR / 300 g; Zement 0,32Euro/ kg  
**Brandschutz:** A1 / A2  
**Pflege:** pflegeleicht, evtl. Insekten (?)  
**Recyclebarkeit:** nein  
**Verarbeitungsmöglichkeiten:** einfache Herstellung



Sperrholz gelocht

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

**Absrptionsgrad:** 0,8  
**Haptik:** hart, glatt, perforiert  
**Optik:** glatt, perforiert, beige- und brauntöne  
**Formate:** variabel  
**Rohdichte:** 400 kg / m<sup>3</sup>  
**Preis:** ab 10 EUR / m<sup>2</sup>  
**Brandschutz:** B1  
**Pflege:** pflegeleicht  
**Recyclebarkeit:** ja  
**Verarbeitungsmöglichkeiten / Beispielaufbau:** gängige analoge und digitale Verarbeitungsmöglichkeiten (sägen, fräsen)



Holzwole + Gips

**Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:**

**Absrptionsgrad:** 0,5  
**Haptik:** glatt, stellenweise rau und strukturiert, porös  
**Optik:** hellgrau mit Holzfasern  
**Formate:** variabel  
**Rohdichte:** 950 kg / m<sup>3</sup>  
**Preis:** HW 1 EUR / 300 g; Zement 0,42 Euro/ kg  
**Brandschutz:** A1 / A2  
**Pflege:** robust, pflegeleicht, evtl. Insekten(?)  
**Recyclebarkeit:** ja, aber aufwendig  
**Verarbeitungsmöglichkeiten:** einfache Herstellung

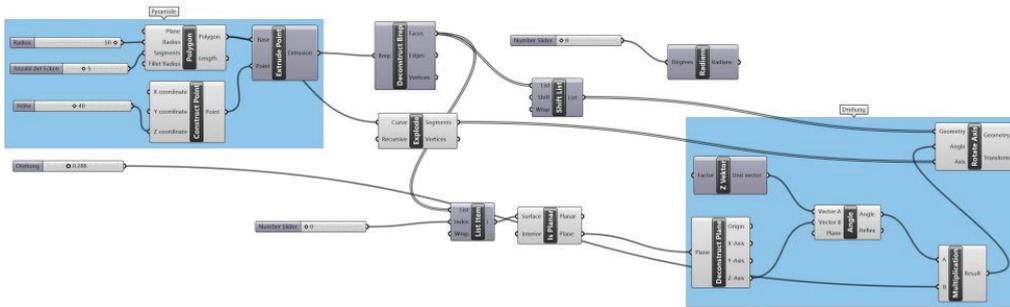
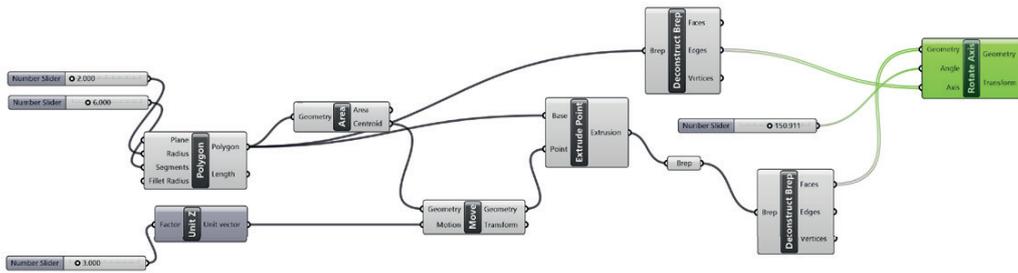
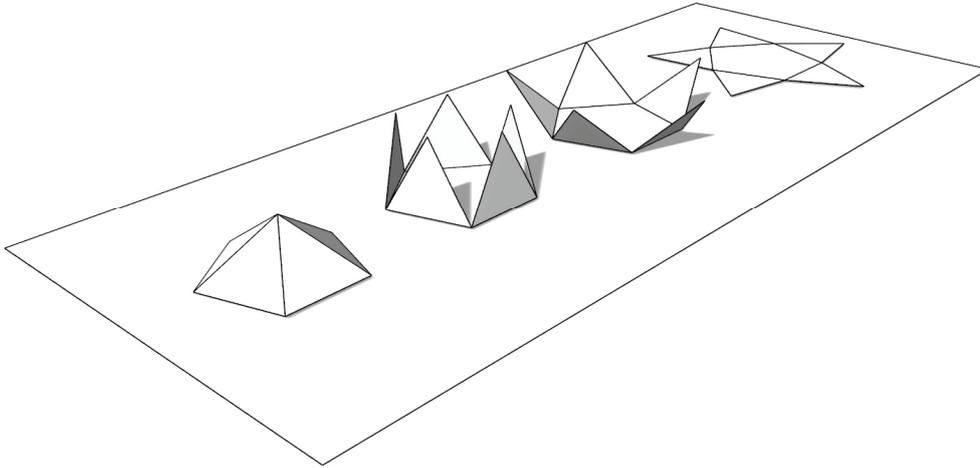
## **GRASSHOPPER**

*Allgemeines / UE\_01*

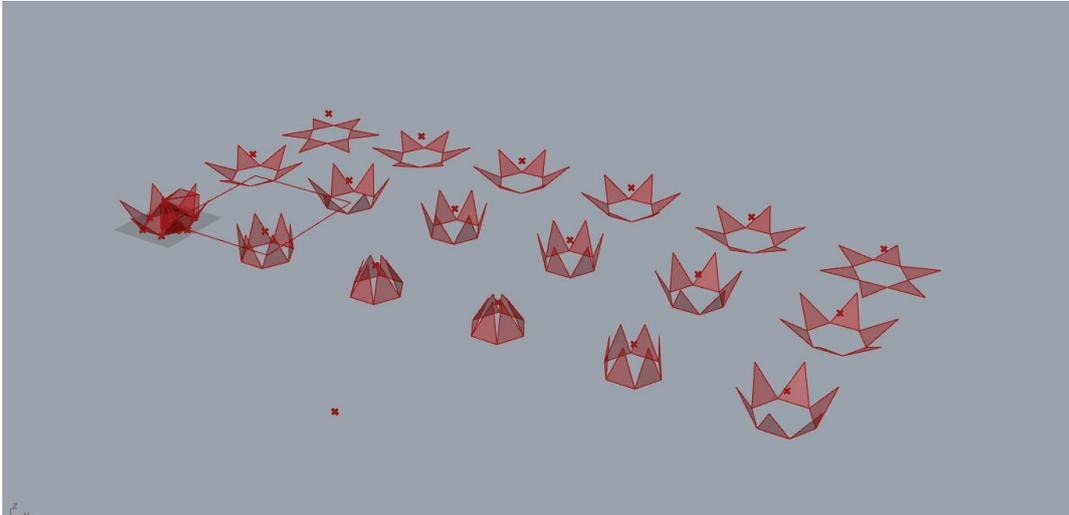
Die erste Übung diente hauptsächlich dazu, sich mit der Arbeitsweise und der Oberfläche von Grasshopper vertraut zu machen und die Funktionsweise der wichtigsten Tools kennenzulernen.

HÜ\_01: Die Aufgabe der ersten Hausübung war, eine Pyramide zu modellieren, deren Anzahl von Segmenten, Radius sowie die Höhe parametrisch steuerbar sind. Zudem sollte man die Pyramide zu allen Seiten öffnen können. Die Herausforderung / Schwierigkeit: die Winkel + Rotation um die richtigen Achsen (so, dass die geöffneten Facetten auf dem Boden aufliegen und sich nicht weiter drehen).

Hinweise zur HÜ\_01: - die Range der Slider gleich richtig einrichten (Edit) und evtl. benennen - Bei der Edxtrusion die Preview ausschalten - Strg + G = gruppieren (bei langen Definitionen sehr sinnvoll) - „Bak-en“: erst dann Weiterbearbeitung in Rhino möglich.

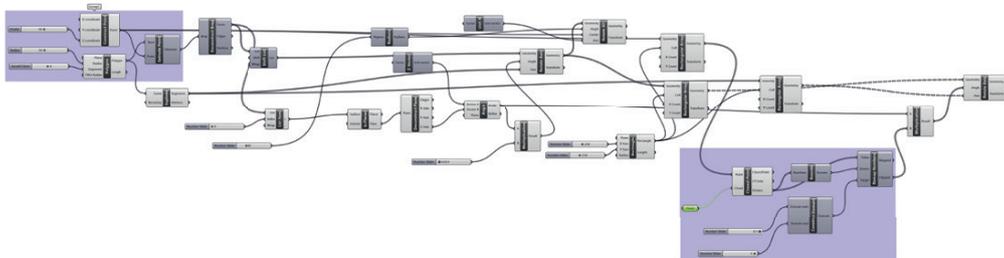


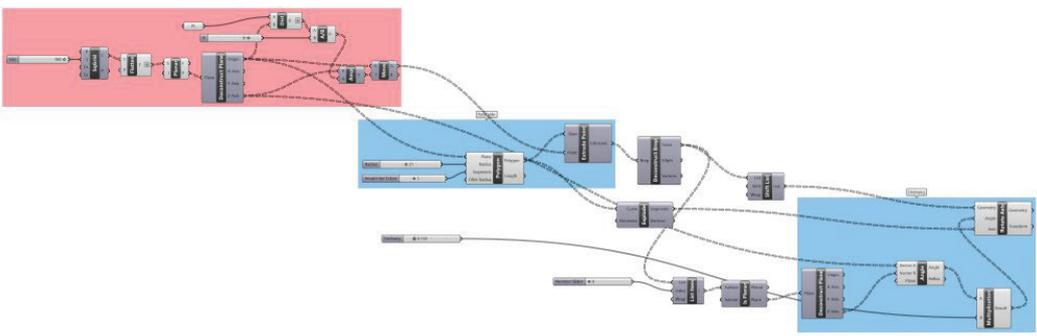
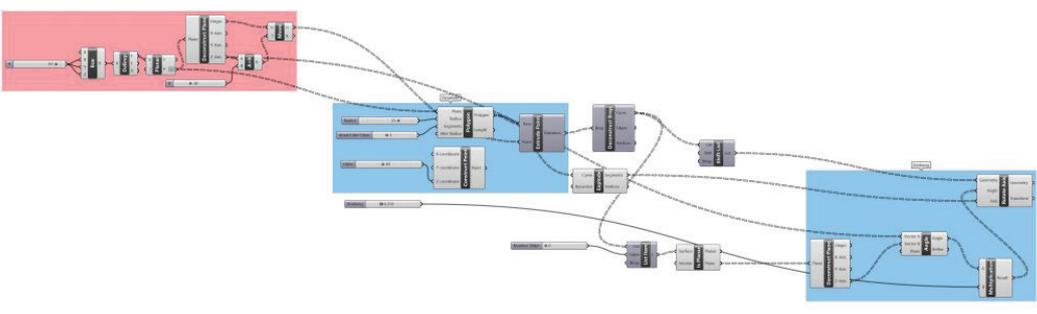
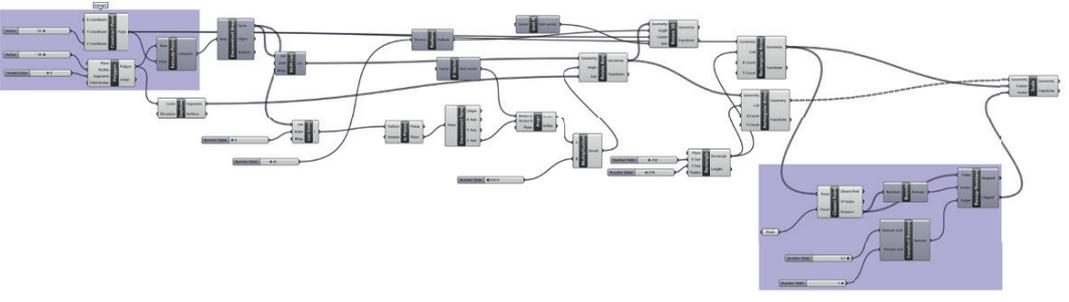
## GRASSHOPPER



*HÜ\_02*

Bei der zweiten Hausübung sollte mit der Geometrie aus der ersten HÜ weitergearbeitet werden. Die Pyramide sollte nun einmal in allen Ebenen gedreht werden. Ihre Größe sollte parametrisch steuerbar sein. Als weiterer Schritt sollte mehrerer Pyramiden nebeneinander angeordnet werden. Ihre Größe und Öffnungsgrad sollte mit einem Punkt gesteuert werden können.





## **ARDUINO**

### *Einfache Steuerung*

- Der Stromkreis muss geschlossen sein, sonst fließt kein Strom! - Resistor: Strom fließt in eine Richtung - LED: funktioniert nur in eine Richtung ( +/- Pol!) - BREAD-BOARD: beachten, wie in dem jeweiligen Abschnitt der Strom fließt (vertikal / horizontal)

Arduino Aufbau:

POWER / BATTERIE 5V = das pos. Ende der Batterie

DIGITAL: kann 0 oder 1 sein, true / false

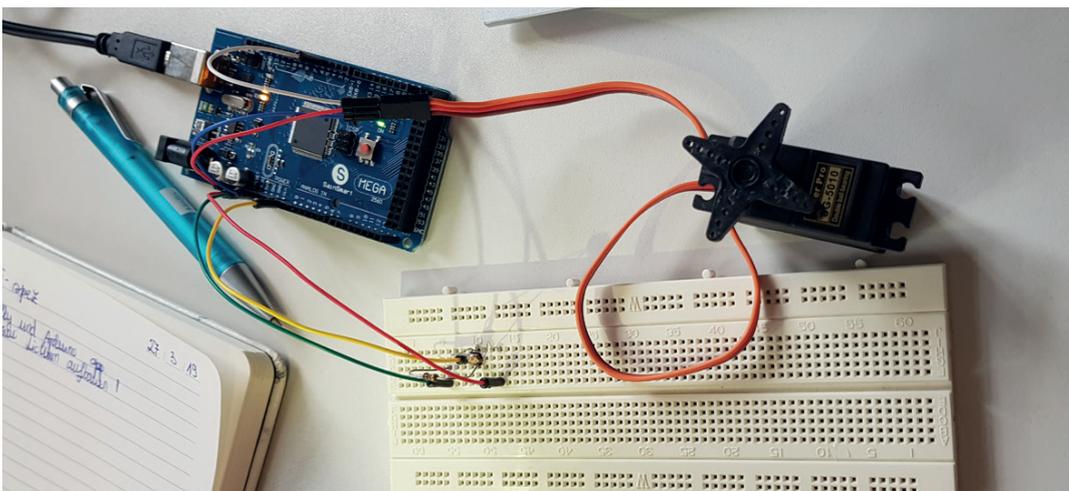
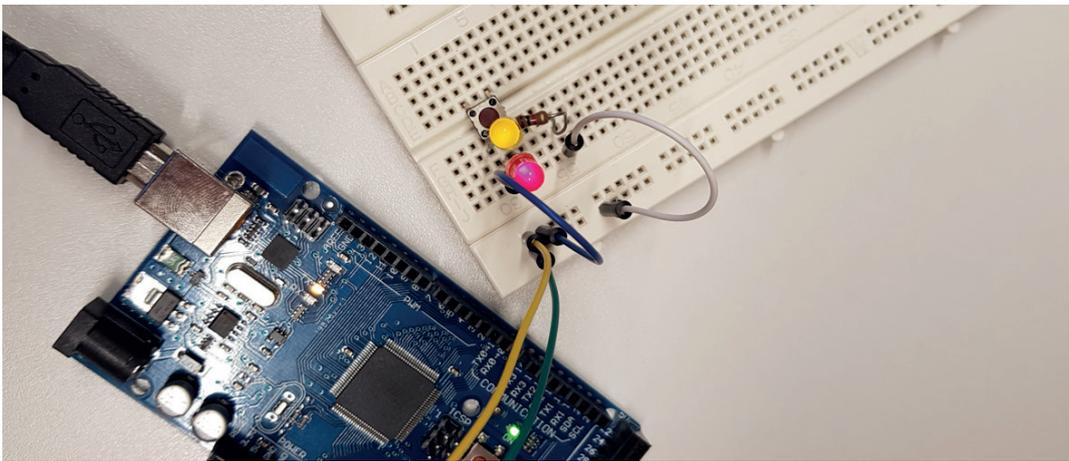
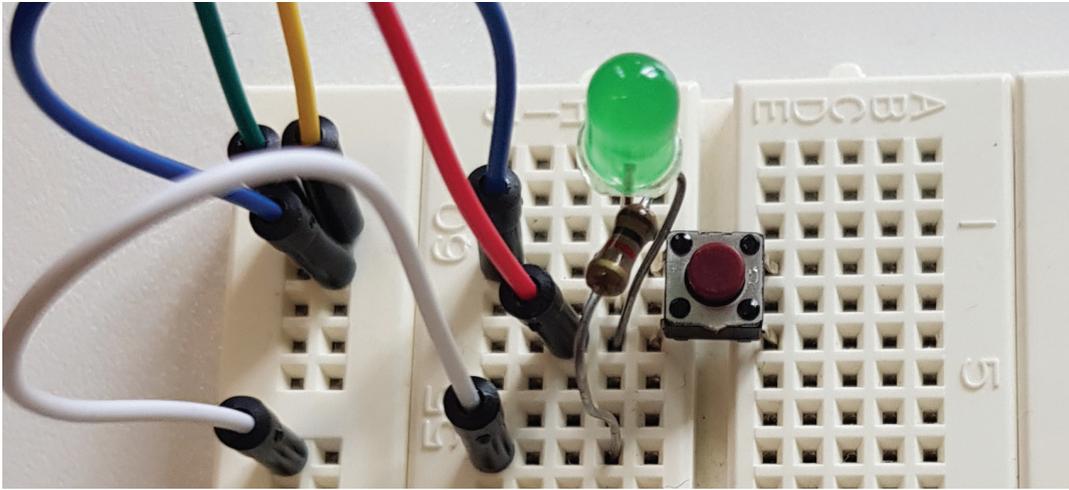
ANALOG: irgendeine Zahl zwischen 0 und 1023 (Lichtstärke, Lautstärke messen etc. ..)

Communication Ports: Port auswählen über Device Manager -> Ports -> z.B. COM 5

Ausführungen von Arduino: Uno / Mega / Due  
Firefly: software tools

Mikrofon-Modul für Arduino 0-1023 Lautstärke

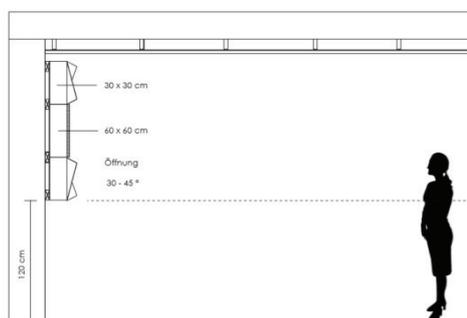
Ue\_01\_Zusammenbau und einfache Steuerung:  
LED-Leuchte Ue\_02: Motor Ue\_03: Lichtsensor  
Ue\_04: Lautstärke (Mikrofon)



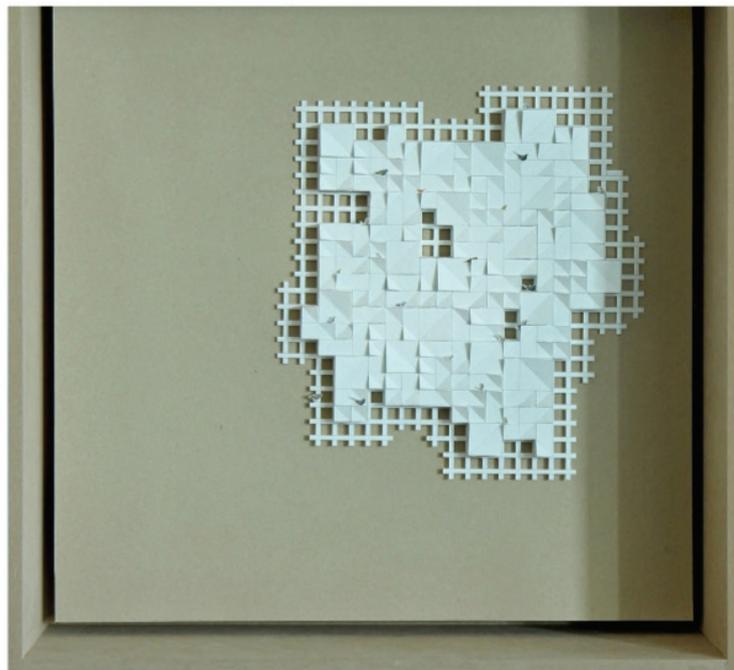
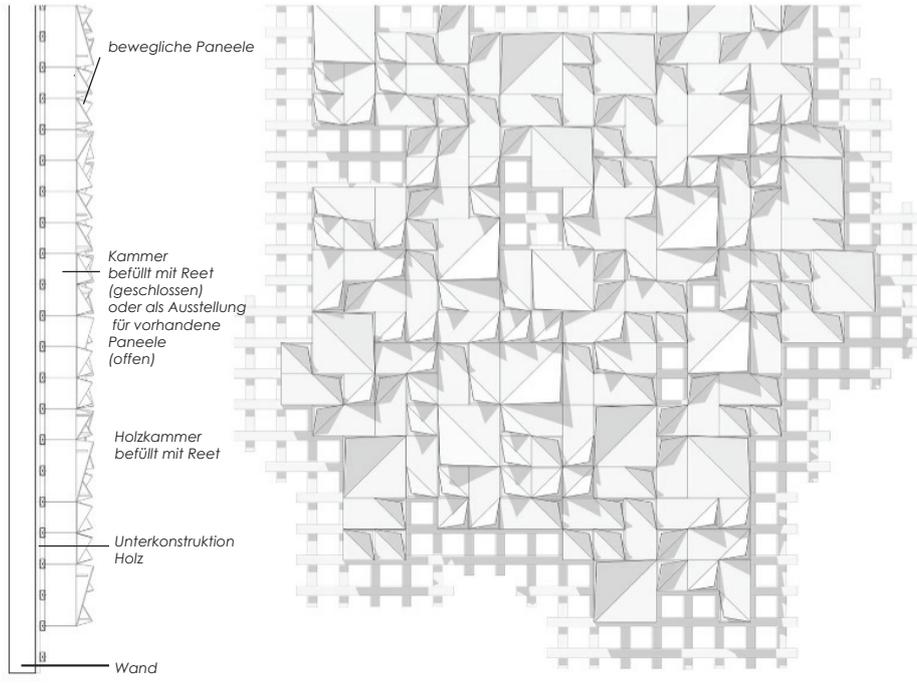
## KONZEPT "ACOUSTIC PLAYGROUND"

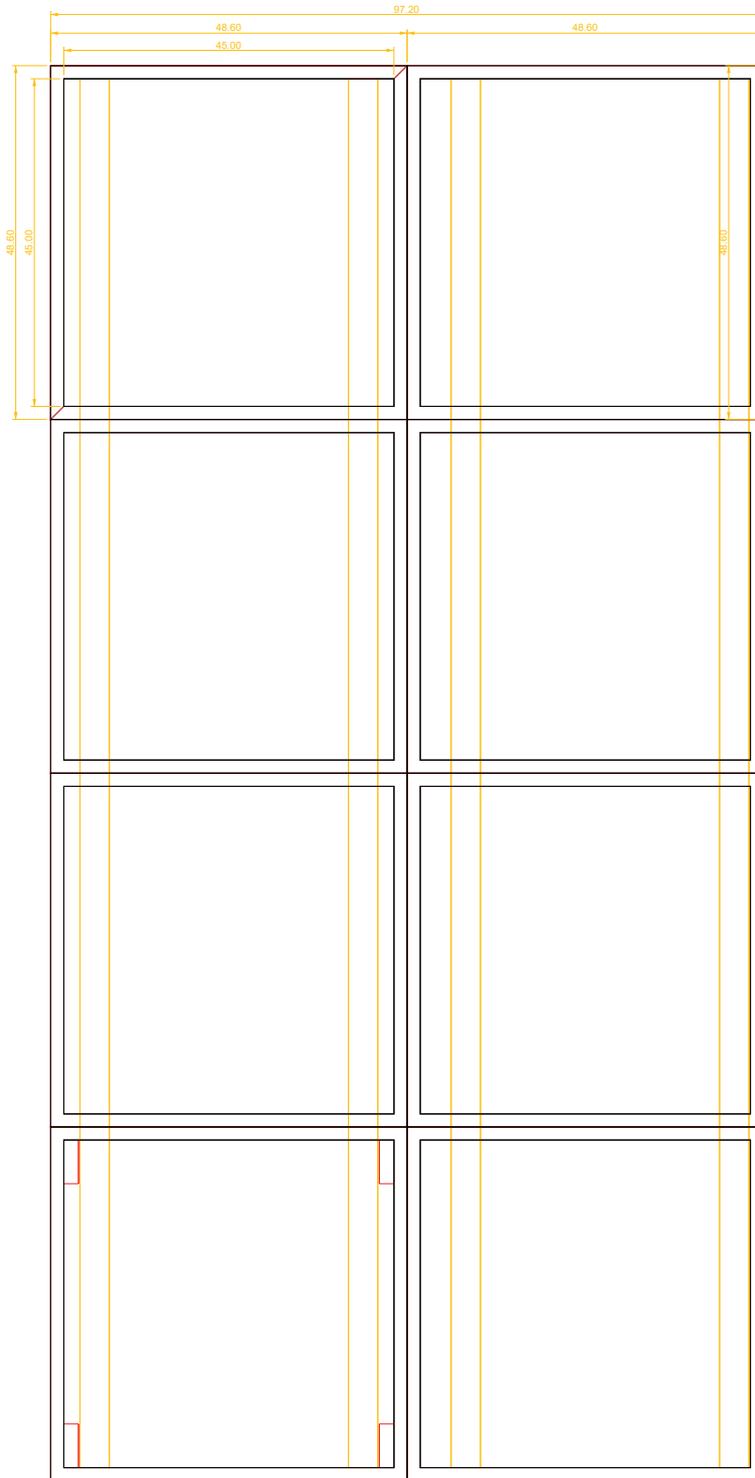
Ein für die Entwicklung des Projekts sehr ausschlaggebendes Thema war neben der bewussten Wahl des Materials Holz und der Entwicklung einer zurückhaltenden Form auch der Umgang mit dem bereits vorhandenem Material. Der Aspekt der Nachhaltigkeit soll durch die Intervention gestärkt und hervorgehoben werden.

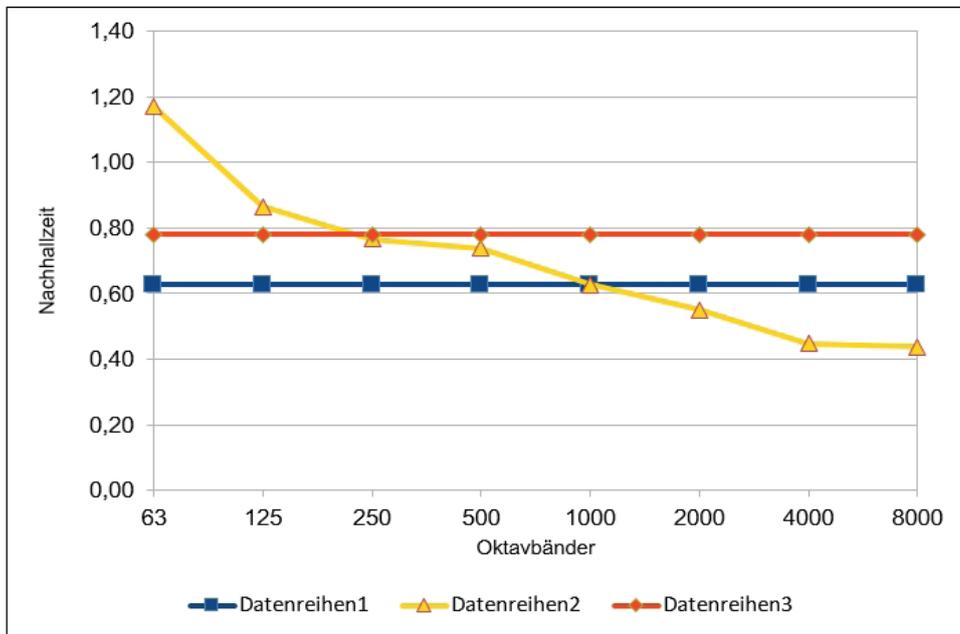
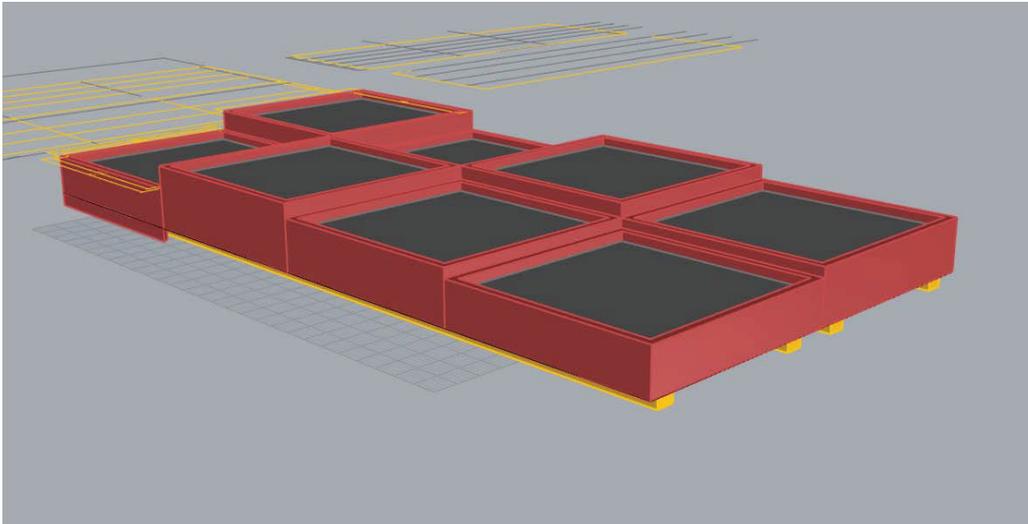
Das übergreifende Konzept einer Ausstellungswand macht es möglich, auch im Nachhinein weitere Akustikpaneele zu integrieren bzw. auszutauschen. Durch die variable Struktur des Holzgerüsts sind unterschiedlichste Optionen möglich. Dabei soll ein "Acoustic Playground" - eine Test- und Spielwiese für akustische Paneele und Materialien entstehen und sowohl zur akustischen Aufwertung der Räumlichkeiten beitragen als auch der Öffentlichkeit präsentiert werden. Das akustische Ziel ist die Reduktion der Halligkeit des Raums und insbesondere die Absorption im Bereich der tiefen Frequenzen.



Querschnitt Lehrsaaal M 1:50











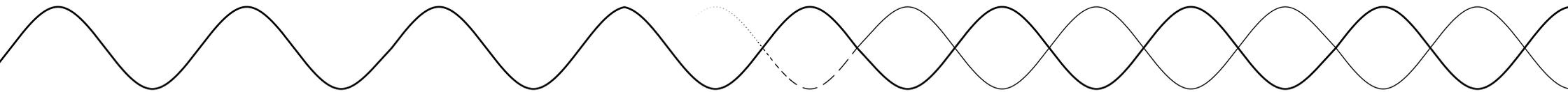
## **Adaptive Acoustics**

Entwerfen spezialisierter Themen

Milena Stavric

SS 19

*Viktoriya Yeretska 11718119*



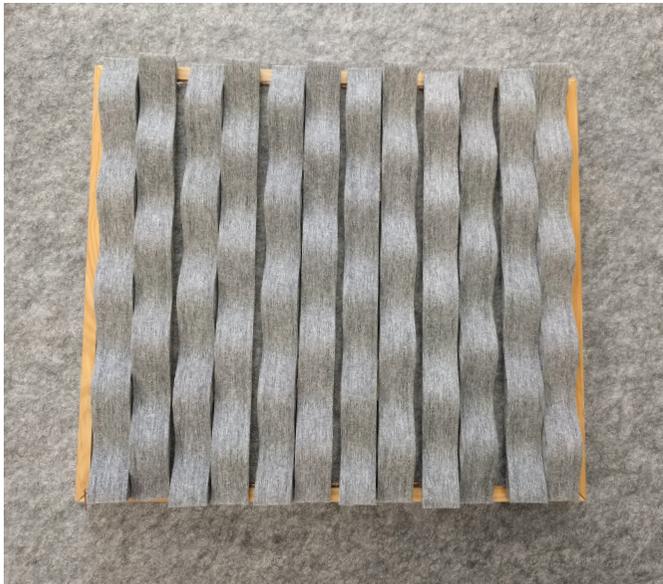
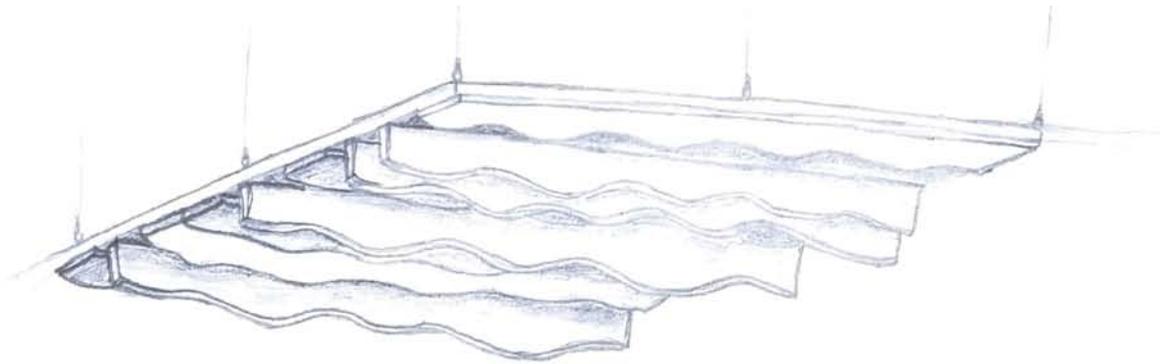
adaptive acoustics | anna katrin ebenführer



Adaptive Acoustics  
Entwerfen spezialisierter Themen  
Milena Stavric  
SS 19

Anna Katrin Ebenführer  
01626173

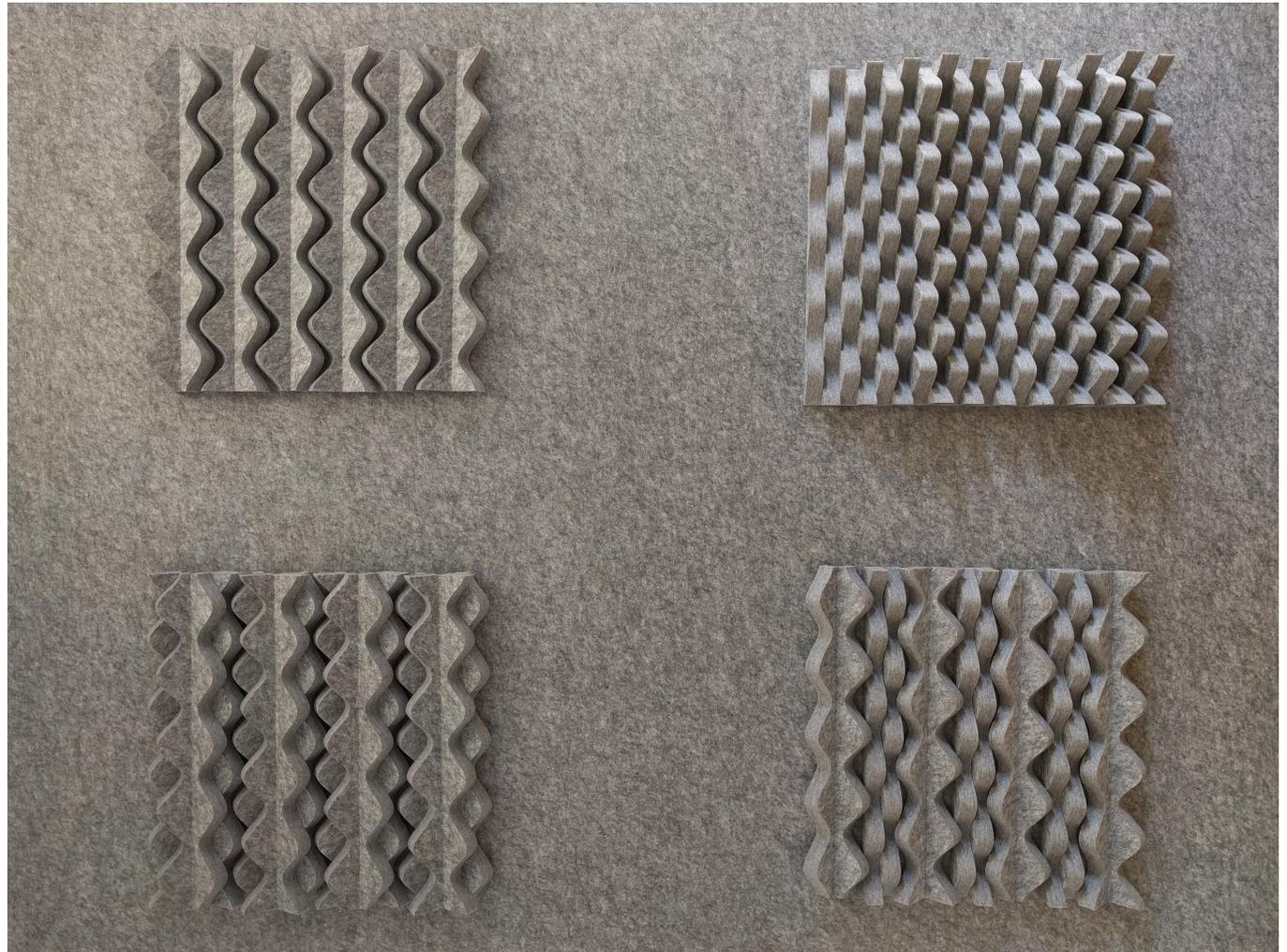
Von den ersten Ideen ...

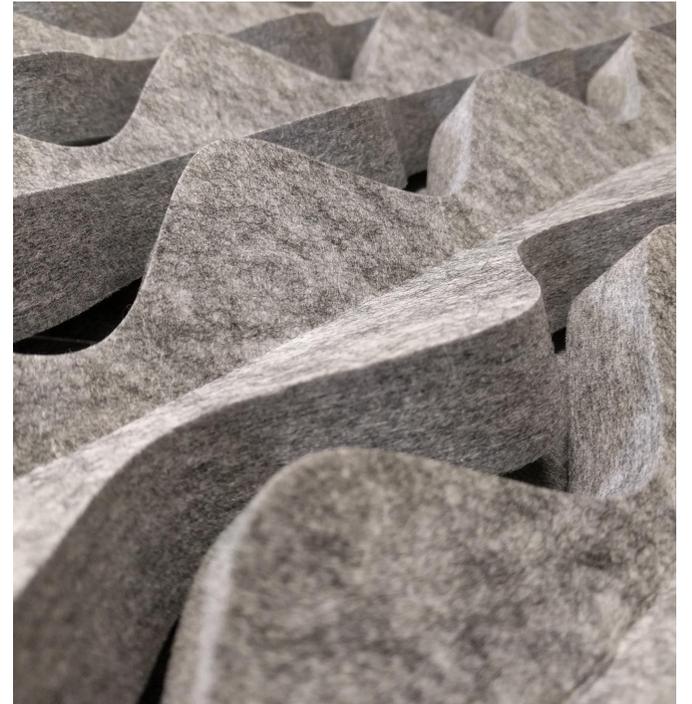


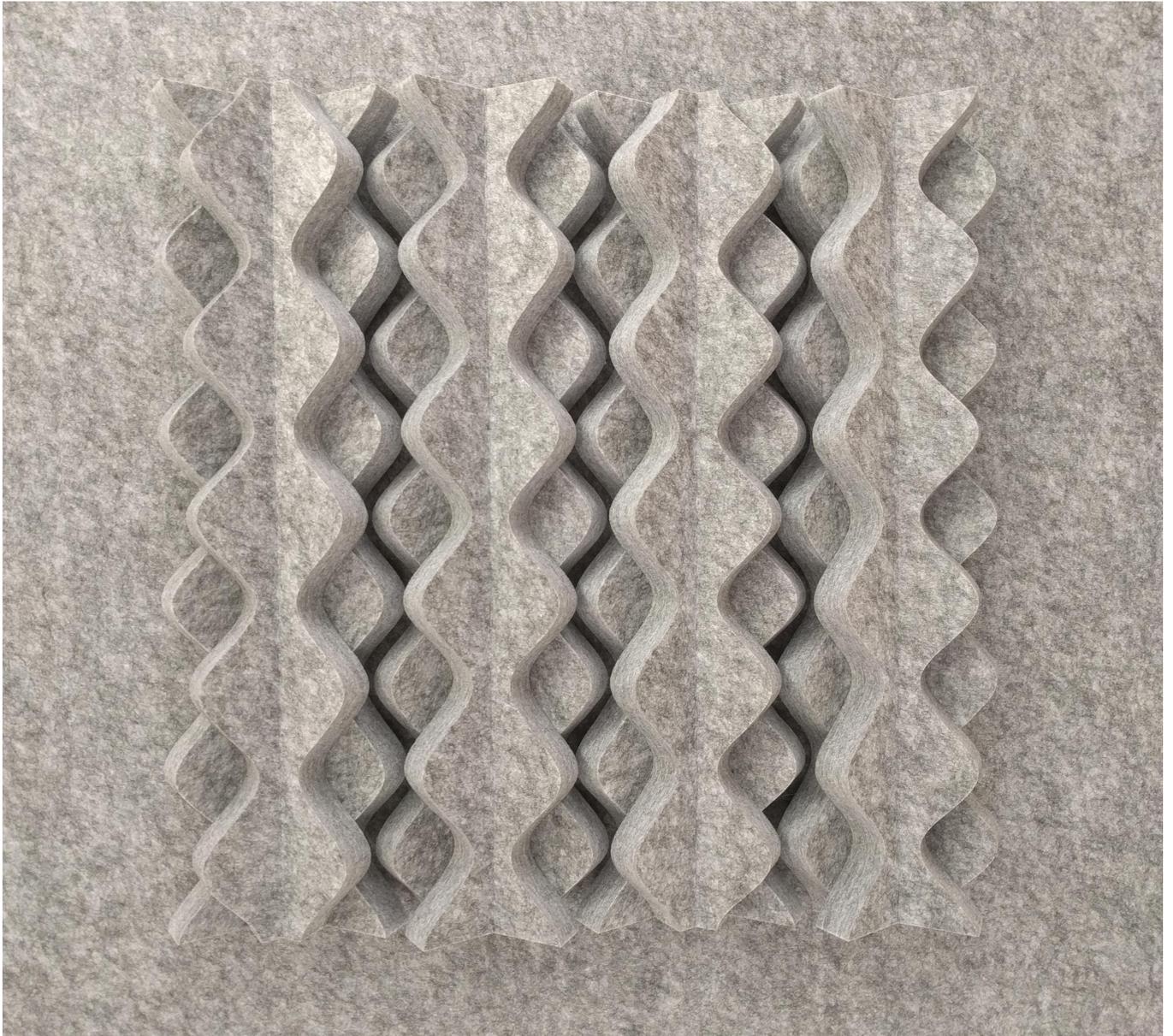
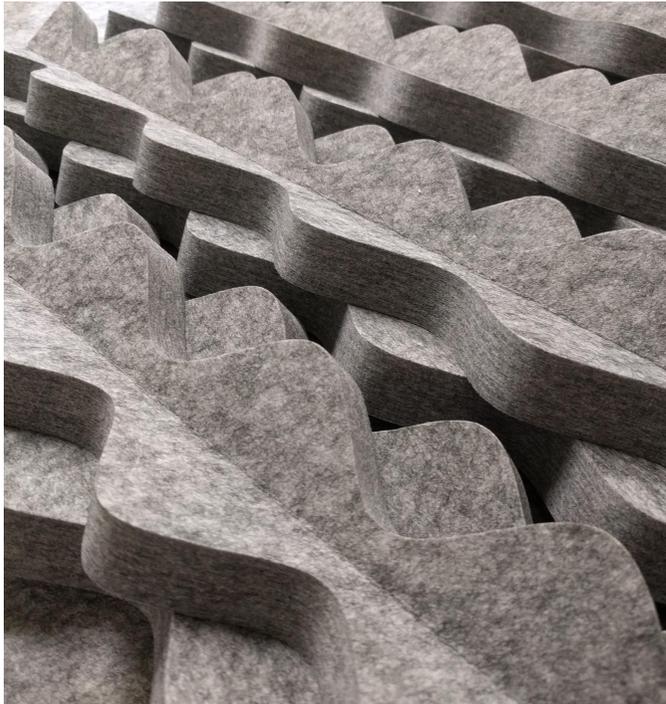
Die Inspiration für den ersten Entwurf stammte von Schallwellen. Diese Idee der Wellen war von Anfang an im Entwurf verankert und blieb über den gesamten Entwurfsprozess erhalten. Angefangen mit herunterklappbaren Wellen die sich über die Wochen zu den aufklappbaren Wellen des Endprodukts entwickelten. Die Idee einer abgehängten Decke wandelte sich zu Akustikpaneelen für die Wand. Der anfängliche Plan ein adaptives Akustikpaneel zu bauen wurde schlussendlich von der Idee des statischen Paneels übertroffen.

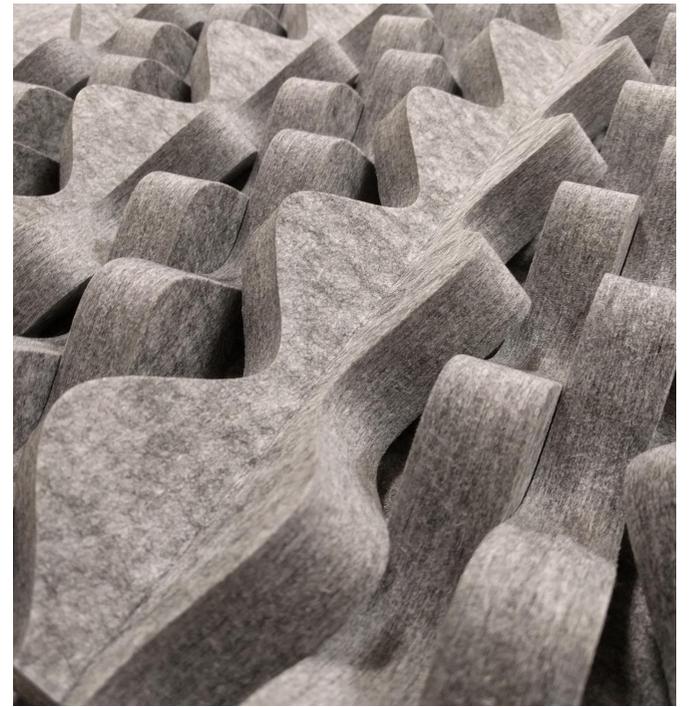
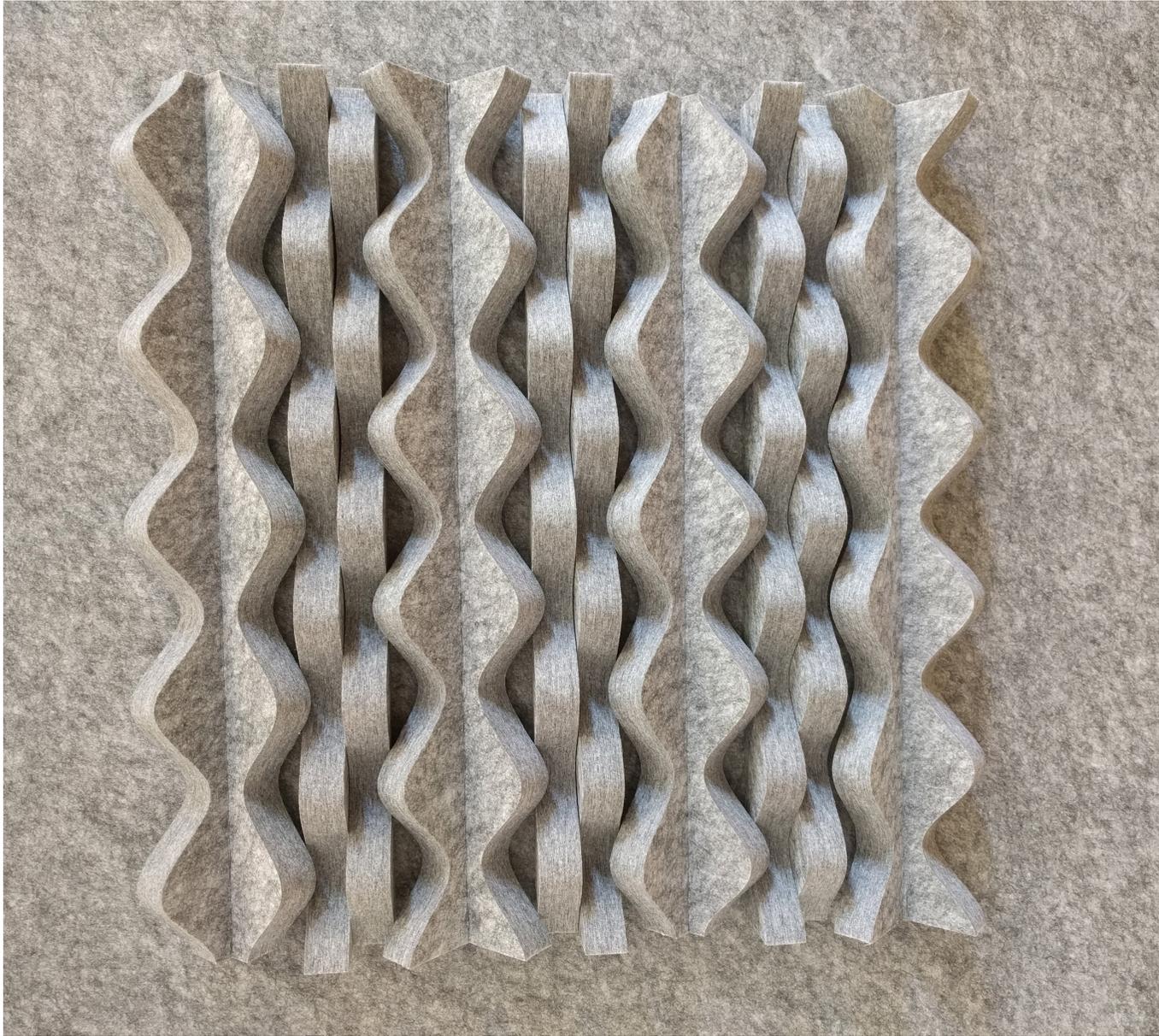
Die Wellen des Akustikpaneels wurden aus einer 2,5 cm dicken Filzplatte mit Hilfe des Schneideplotters geschnitten. Alle Elemente wurde wiederum auf einer großen Filzplatte angebracht und somit zum fertigen Akustikpaneel zusammengeführt.

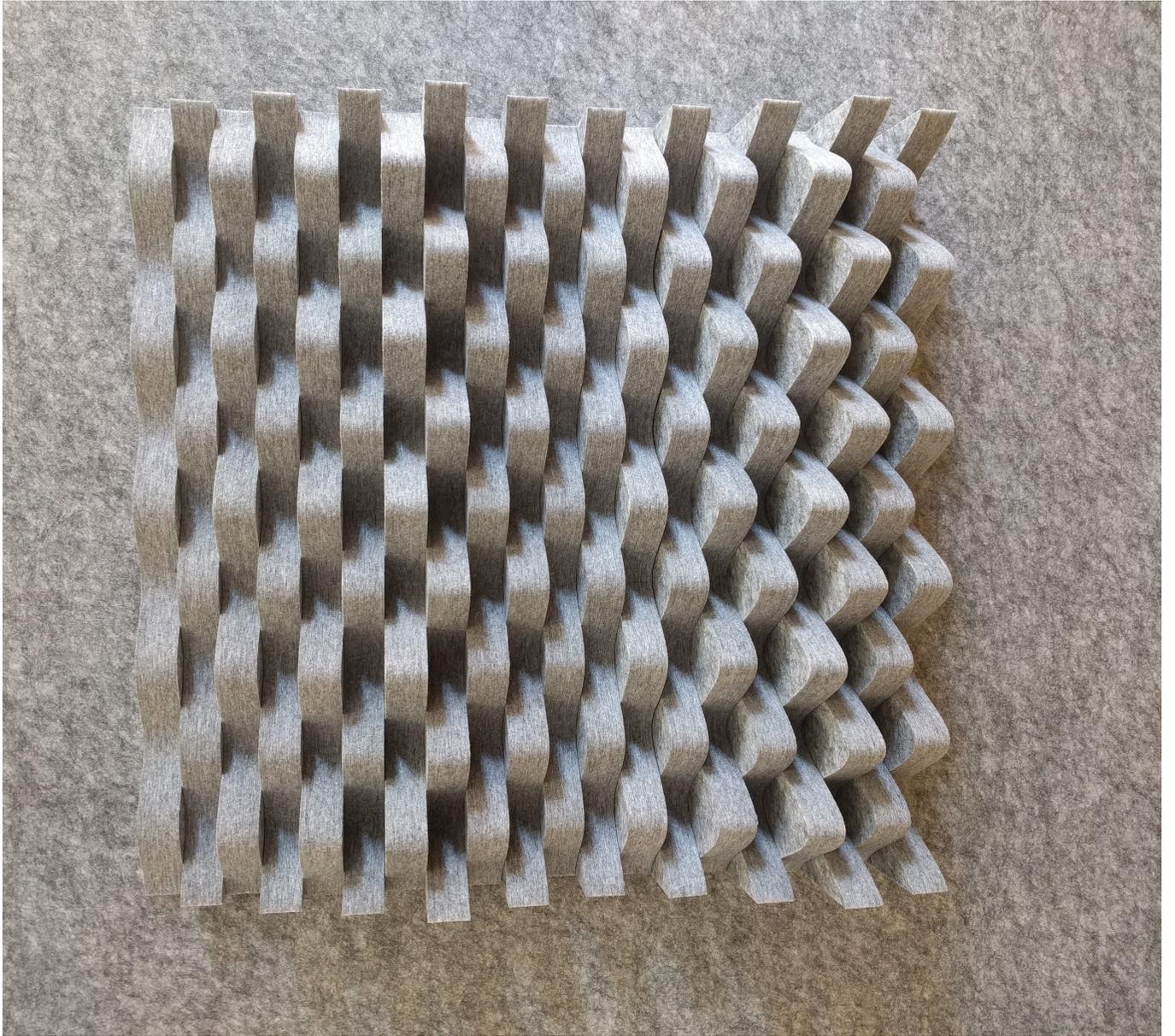
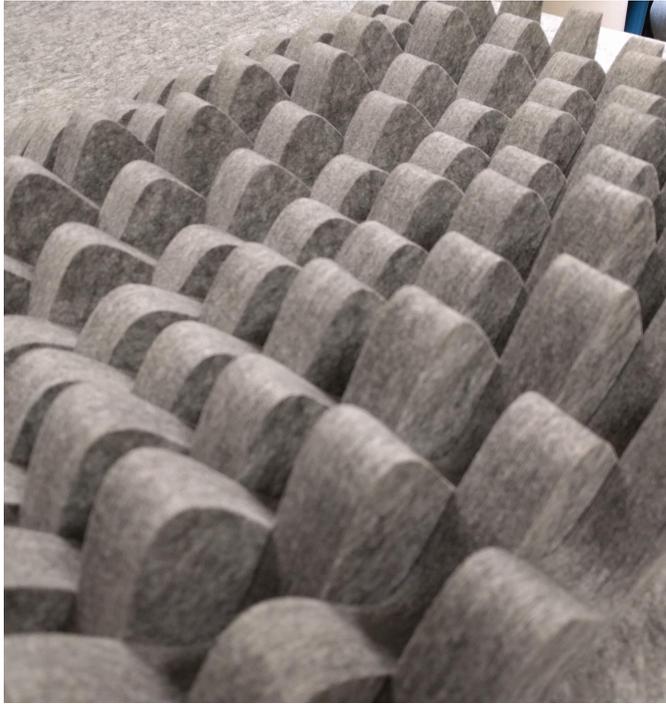
Durch die gute Absorbtiionsfähigkeit des Filzes und die große Oberfläche durch die Wellenform des Panels ergibt sich somit eine positive Auswirkung auf die Schallausbreitung im Raum.

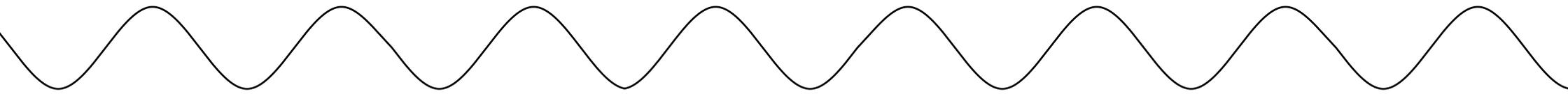






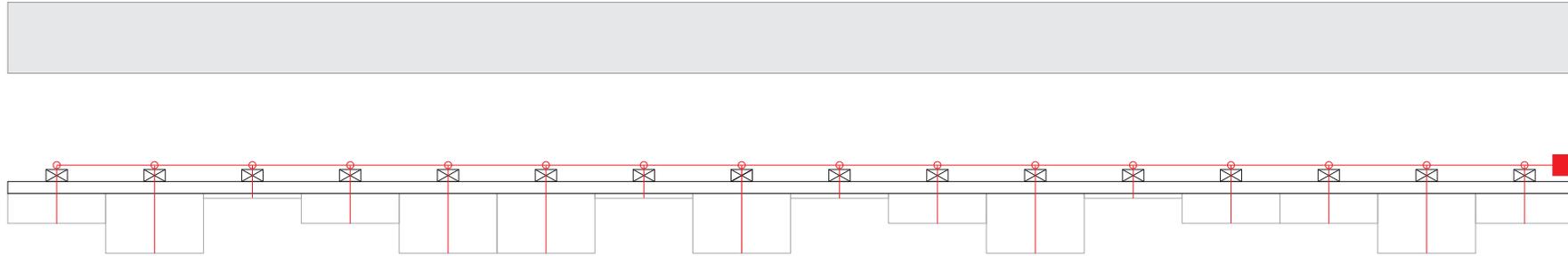






# ENTWURF

## Schnitt



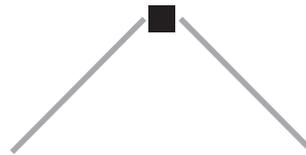
Decke

Abgehängte Decke

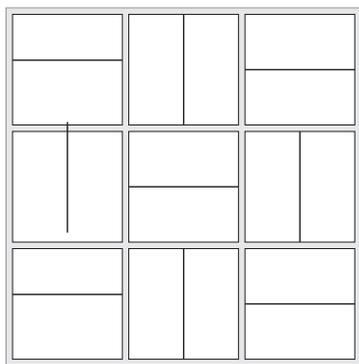
Seilzug zum Servo  
Lattung

Akustikpaneele

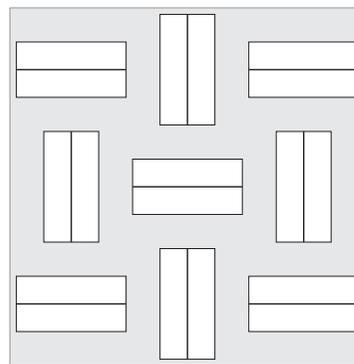
## Akustikpaneel



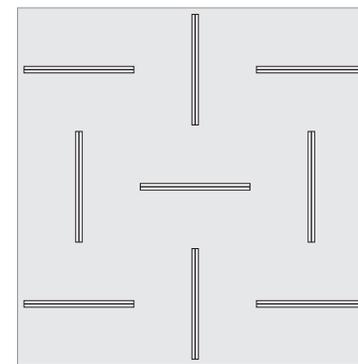
## Akustikpaneele Anordnung



Geschlossener Zustand



Halboffener Zustand



Offener Zustand

# **ESPEZ—ADAPTIVE ACOUSTICS**

**SOMMERSESTER 2019**

**WULFRIG GLACKSON**



### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Die Fassade der Al Bahar Türme in Abu Dhabi sind ein gutes Beispiel ein adaptives computergesteuertes System.

Die Paneele öffnen und schliessen sich mit dem Rückmus der Sonne um die türme zu schattieren und kühl zu halten.

quelle: Aedas Architects



quelle: Theo Jansen

### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Die Strandbeest von Theo Jansen sind mobile Kunstwerke die mit kraft des Windes über den strand laufen können. Mit nutzung von pneumatischen Sensoren können die "Tiere" auf ihrer Umgebung reagieren und schaden vom Meer und starkem Wind vermeiden.



### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Das projekt "Self-adaptive Membrane" nutzt ein Formgedächtnis-Legierung um an hitze zu reagieren.

quelle: Institute for Advanced Architecture of Catalonia

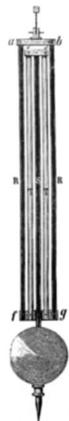


quelle: Barkow und Leibinger

### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Ein einfaches System um eine Wand zum bewegen zu bringen.

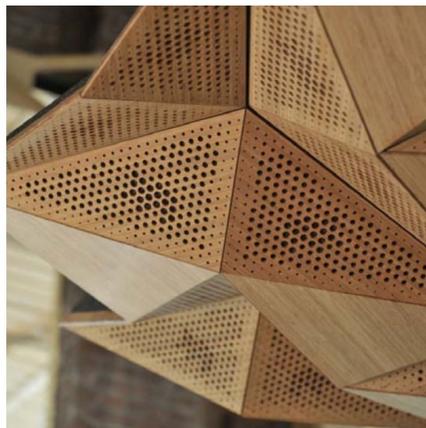
3



### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Der Rostpendel erhält mehrere Stangen aus verschiedenen Metallen, zusammengestellt sodass der Pendel sich bei hitze nicht verlängert. Ein einfaches, aber schlaues System des 18. Jahrhunderts um Uhren genauer zu machen.

quelle: "Tidens naturlære", Poul la Cour

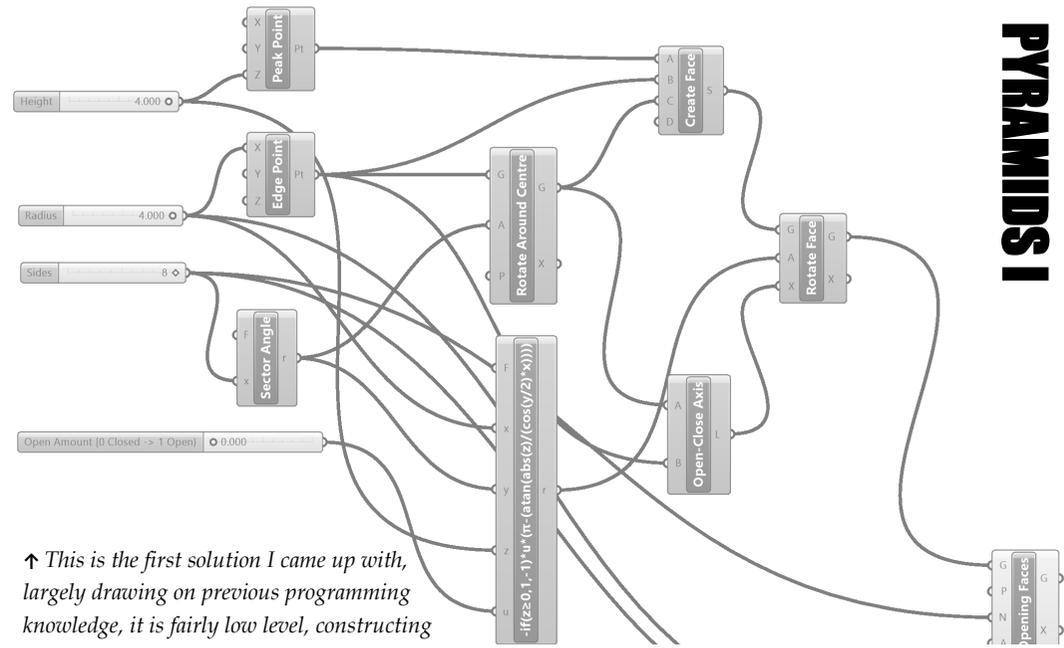
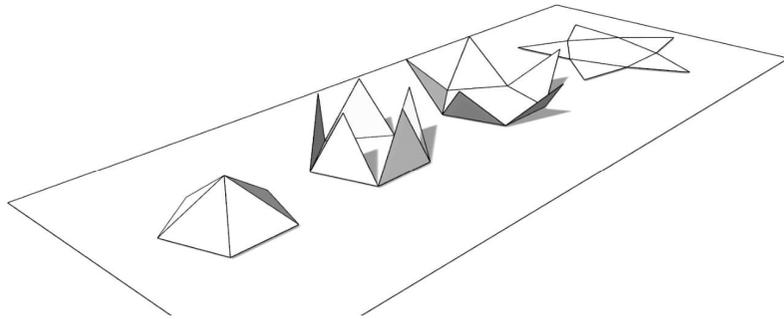


quelle: rvtr

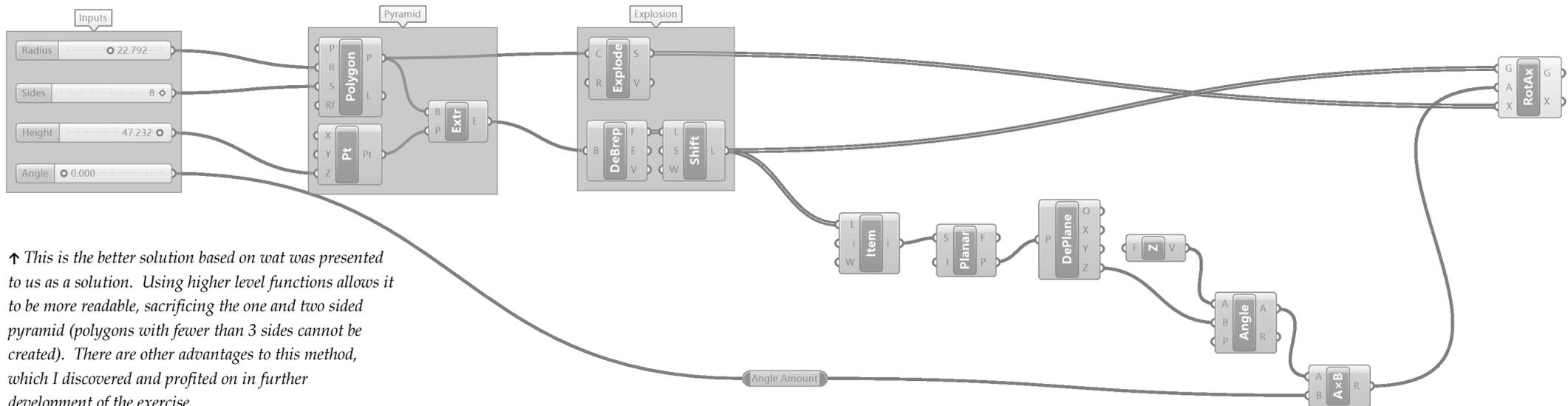
### Begründung der Auswahl/Analyse/Beschreibung:

Das Projekt „Resonant Chamber“ von rvtr ist ein Beispiel eines adaptives akustisches System. Die Paneele können aus und zusammenfallen um die akustische Wirkung der Decke zu ändern.

The first exercise of the course was an introductory project to create a parametric pyramid in Grasshopper which could be unfolded, with parameters for the height of the pyramid, the number of sides, and the percentage the pyramid was open. This at first was a little overwhelming for me as I had never used Grasshopper before in any capacity at this point. Luckily I could draw from previous programming experience and it did not take too long for me to solve.



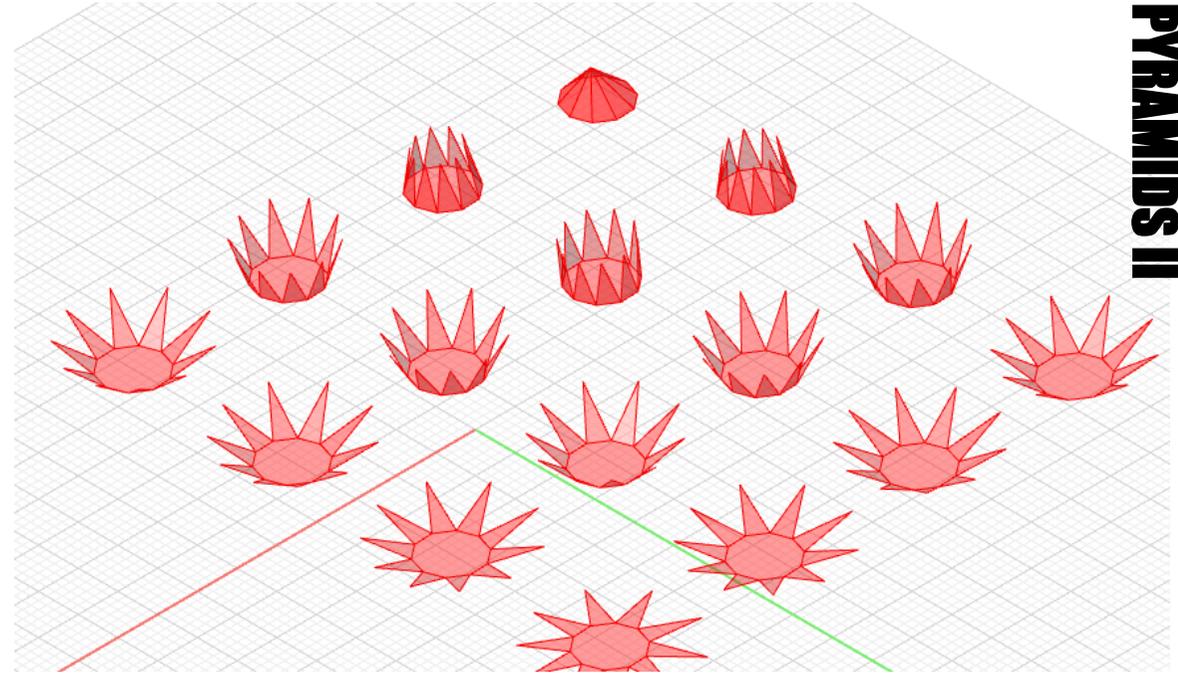
↑ This is the first solution I came up with, largely drawing on previous programming knowledge, it is fairly low level, constructing points, lines and faces to build the pyramid. It functioned, even being able to create pyramids with two and one face, however due to the fact it does not use any higher level functions, it is not too understandable to most people, and requires a fair amount of more complex mathematics.



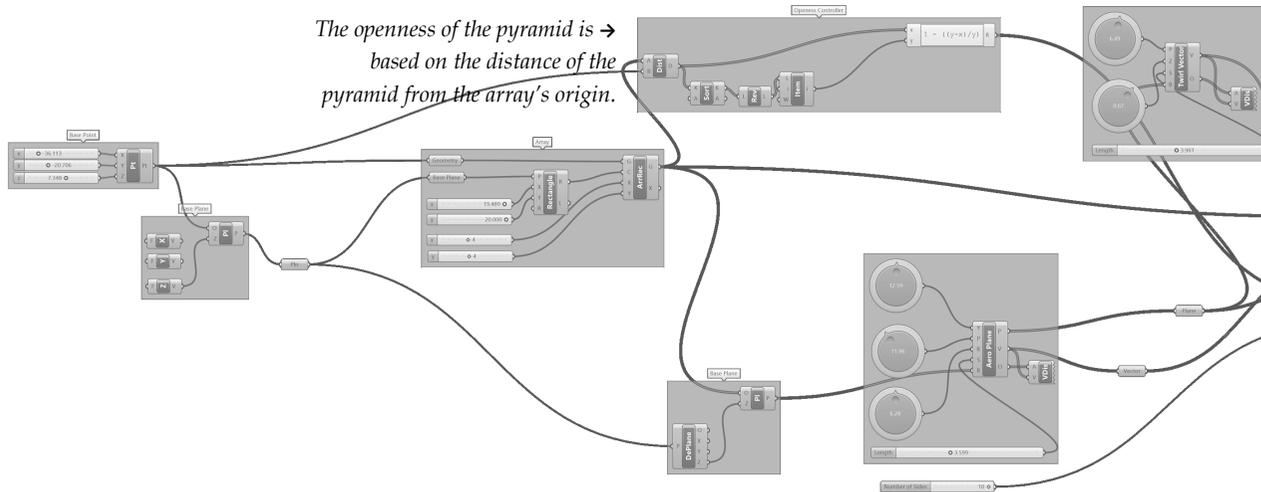
↑ This is the better solution based on what was presented to us as a solution. Using higher level functions allows it to be more readable, sacrificing the one and two sided pyramid (polygons with fewer than 3 sides cannot be created). There are other advantages to this method, which I discovered and profited on in further development of the exercise.

The exercise was continued over the next couple of weeks, with the aim of the exercise being to create a grid of the pyramids going from open to closed. This was not too difficult, so I continued to explore other aspects of Grasshopper. What was the main benefit of extruding and exploding? The answer is flexibility, for example, visible in this exercise, is that the point of the pyramid does not need to be in the centre. Creating these off-centre pyramids also involved learning the intricacies of Grasshopper's tables, which came into play as the separate faces of the skewed pyramids each needed to rotate through different angles to lay flat once fully opened.

Other issues also soon came into play: How do you prevent the script from becoming a mess of spaghetti? What should the inputs and outputs of separate sections be to maximise reusability of grasshopper sections? These issues are vital to solve to reduce the amount of work and to allow other people to use your creations and tools. So I continued developing the unfolding pyramid so it could be used as its own module within other creations.

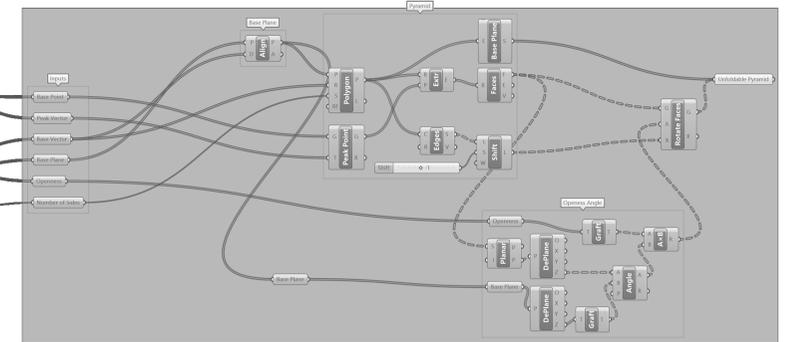


The openness of the pyramid is → based on the distance of the pyramid from the array's origin.

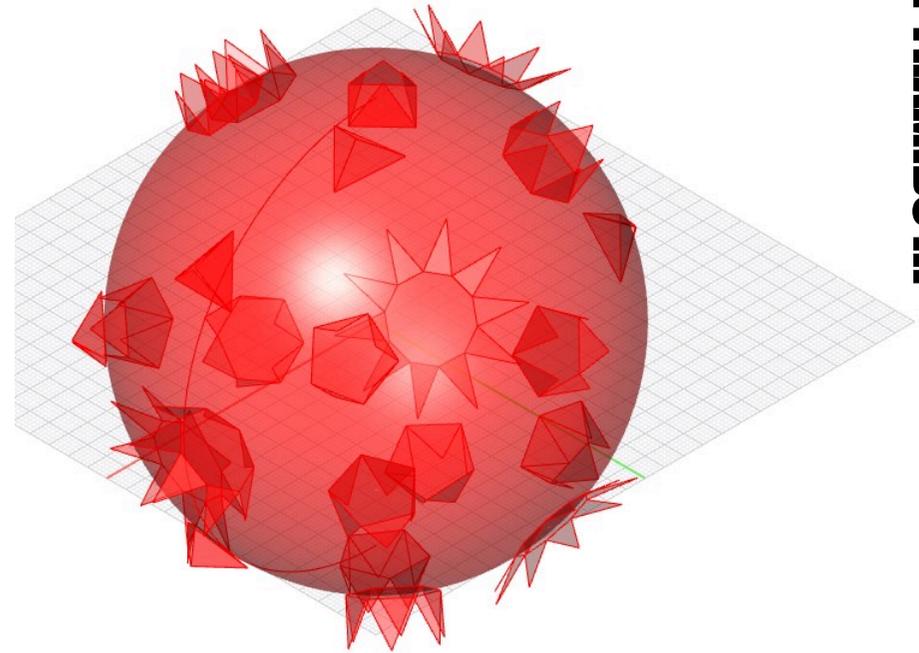
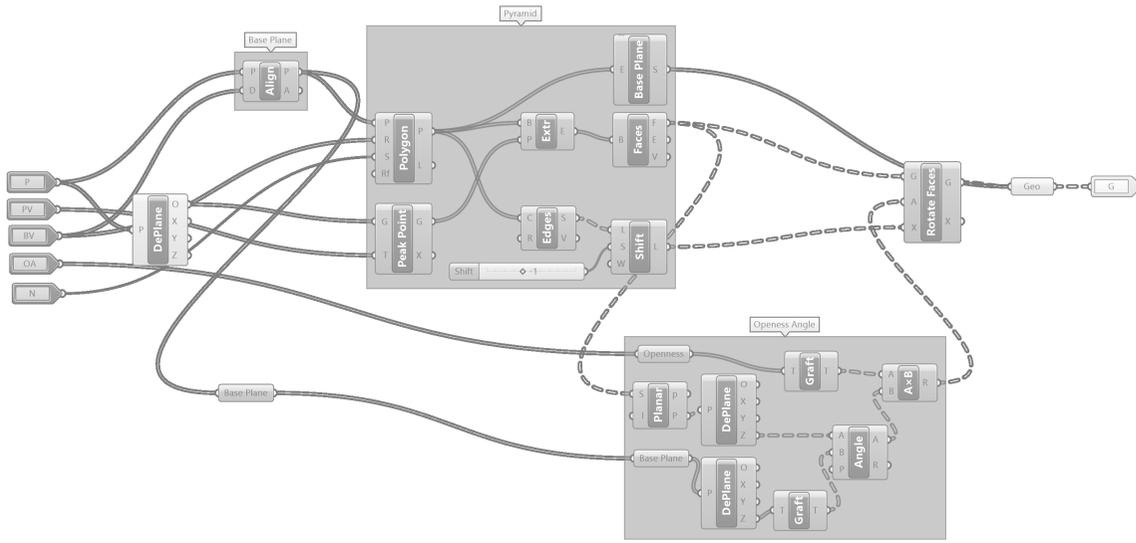


↑ Intuitively controlling directions of 3D objects also proved difficult. Above is a chunk which creates a plane, whose direction is controlled a little like an aeroplane, using pitch, roll and yaw.

← An intuitive input for the peak vector also was difficult. This used a system similar to solar coordinates using an altitude angle and azimuth angle.

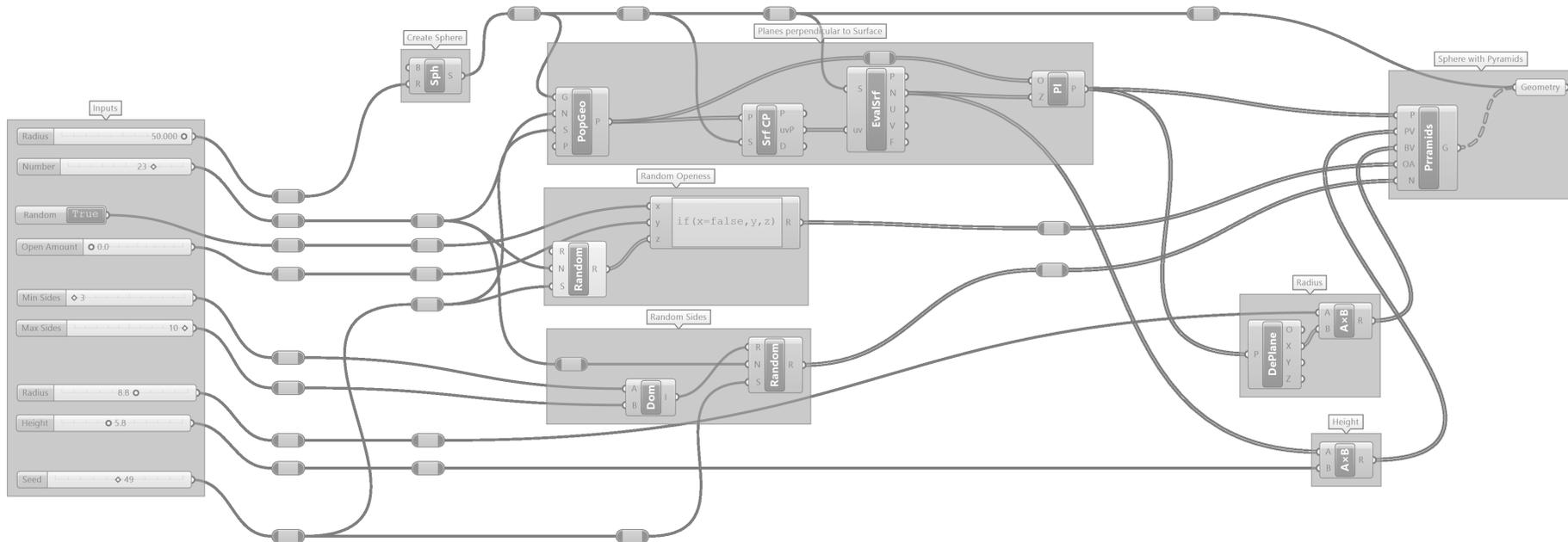


↑ This is the creator of the pyramids themselves, designed (not completely successfully) to use simple inputs from the rest of the script. It takes a list base planes and points for the creation of the pyramid base, a list of vectors for the peak (to allow different lengths and angles for the point), a list for the side numbers, and a list for the openness angle of the script. In this example the majority are constants from sliders and other input blocks.



↑ Above is the Block which generates pyramids. It has five inputs: a base plane (P), which encodes the position and angle of the base of the pyramid, a point vector (PV) which encodes the angle and height of the peak, a base vector (BV) which encodes the size and rotation of the base polygon, the openness amount of the pyramid (OA) and the number of sides of the polygon (N). It still creates the pyramid using an extrusion of the polygon, and rotates the sides by exploding them and then rotating them, however it also takes the angle of the base itself into account. The block functions independently of the rest of the script allowing it to easily be reused.

The final iteration of the unfolding pyramid consisted of a Grasshopper block, aiming to have the fewest inputs with the goal of making it easy to create any desired pyramid anywhere. This is demonstrated well by placing the pyramids on a curved surface, such as a sphere. I am very pleased with how this ended up and how much I was able to learn about Grasshopper in such a short time just by trying them out.



← This creates a sphere and using points populated on the sphere's surface, and the surface normals, it creates random pyramids on the sphere.

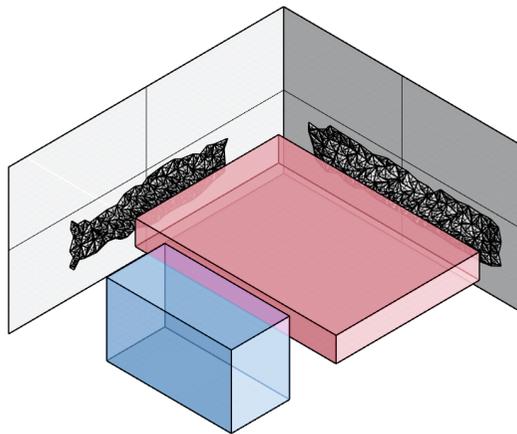
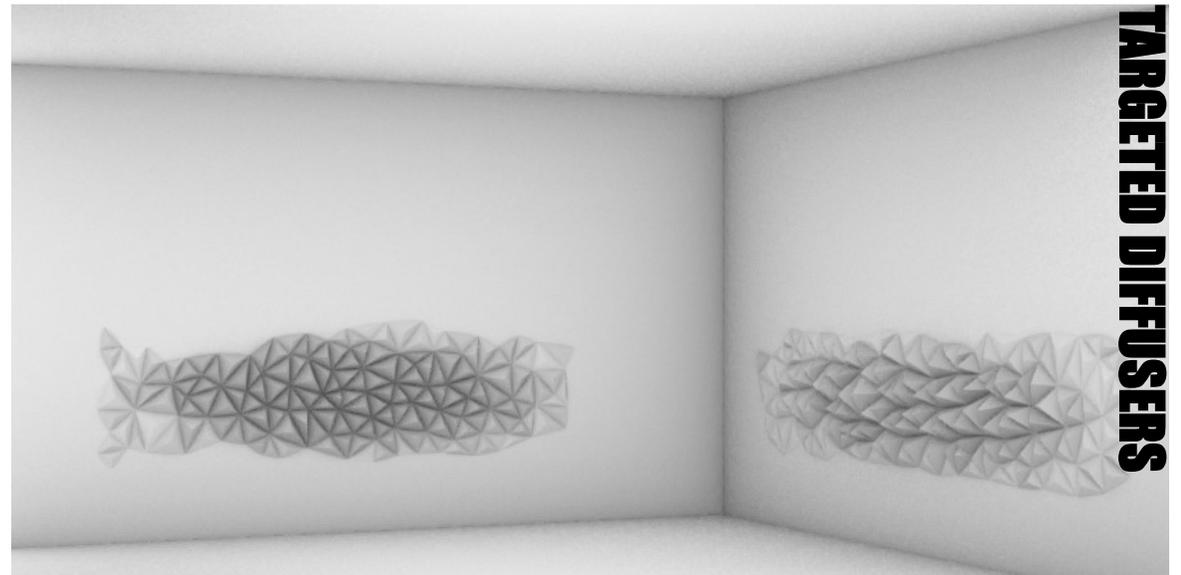
# TARGETED DIFFUSERS

The first reflection points of a space are the most important in room acoustics due to the fact the sound reflecting from them is the loudest, and I started developing an idea based on diffusing this sound to reduce its impact. This idea unfortunately faltered as I was not able to figure out how to best make it adaptive, however it further developed my Grasshopper skills: showing me how Grasshopper could be used to test and develop things besides geometry.

The concept was to create randomised, triangle based diffusers at all the first reflection points in the rooms.

The script used two defined spaces within the model, a cuboidal emitter region, and a cuboidal receiver region. As the design was to be in the computer room, the emitter region consisted of a cuboid by the projection screen and the lecturer's computer at the front of the room, it is around 2m tall as the lecturer is likely to lecture standing, but also quite tall as it is possible they may lecture sitting (or be a wheelchair user). The receiver cuboid is flatter and lower as the student will generally only be sitting.

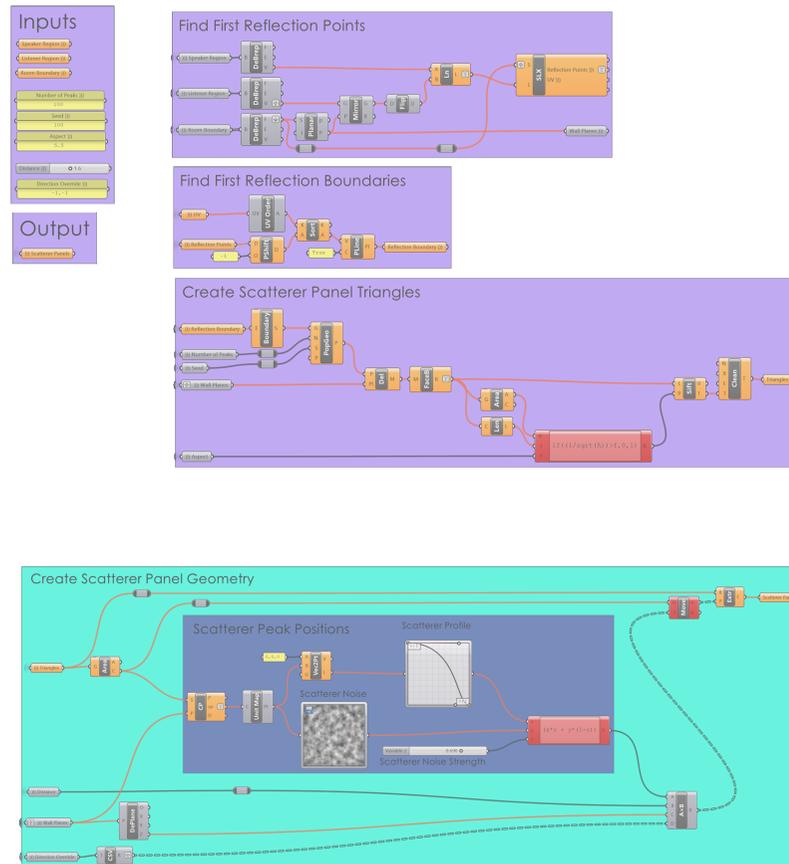
The room could be any shape, as long as it did not have any curved surfaces.



← Emitter region (blue) and receiver region (red)

The algorithm for finding the reflection regions and generating the panels is detailed to the left. This algorithm could be easily expanded to find any  $n^{\text{th}}$  reflection however Grasshopper did not seem to be up to this task.

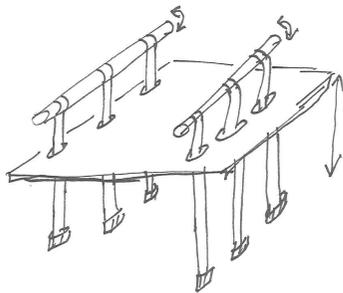
Another focus of this was to create a neat and tidy Grasshopper definition which can be easily read. I found that connecting large chunks of the definition with the use of hidden wires allowed for this. For added readability, each connection was labelled using renamed data type components.



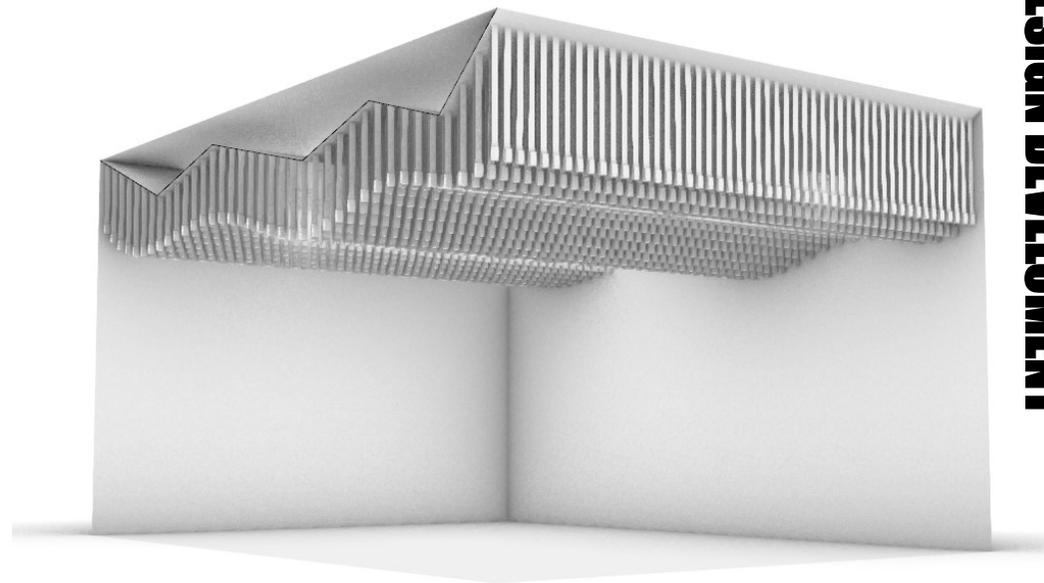
## ← Panel Generation Algorithm:

- Reflect receiver region using wall planes over all sides of the room
- Connect corresponding points between the emitter and all reflections of the receiver with lines
- Find intersections between these lines and the corresponding room surface
- Join the points to create surface containing the first reflection points
- Scatter points in reflection region randomly
- Triangulate these points using Delaunay Triangulation
- Remove triangles with the wrong aspect ratio (narrow ones)
- Find centres of triangles by averaging points
- Find height of triangle using Perlin Noise multiplied by a general profile curve.
- Generate Scatterer triangles using peak point.

The second concept I came up with for an adaptive acoustical system was a system based on lifting and lowering strips of material from the ceiling. These strips initially were thought out as hairs, however later developed into belts, and then finally wide sheets of acoustic material. This concept is quite different from other acoustic systems, and due to the fact sound reflection and sound transmission play a major role in the acoustic properties of the structure. The only way to test how this performs was to test it out in a model.

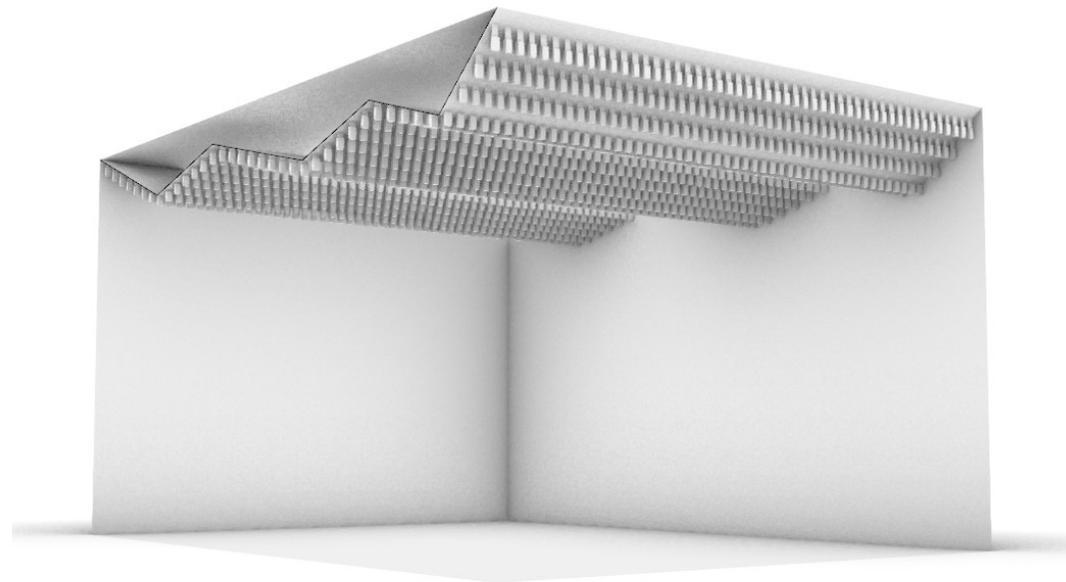
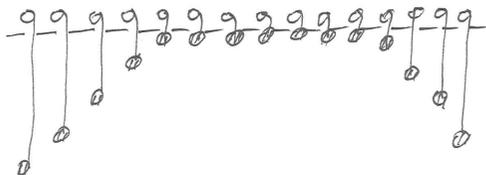


← The winding mechanism of the absorbing material.



The mechanism just involved winding up the sheets of material in a similar manner to a blind. The material is coiled up, wound around a drum to lift it, and is lowered with the aid of a weight, which also keeps the material hanging vertically. Whilst simple, the sheer number of parts required would make the system difficult to build. For maximum flexibility, the blinds would also need to be individually controlled, meaning the system would require quite a complex control system, again raising the cost and lowering the practicality of the system.

Winding the sheets of absorbing material independently allows the ceiling to have dynamic and localised acoustic properties.



Overall though, the flexibility of this system has the potential to create spaces with wildly varying acoustical properties due to the ability to vary the absorbance of the ceiling in a fairly precise manner. It also has an interesting aesthetic, and the fluid dynamic nature of the form is aesthetically interesting.

It was decided that the best method to test the acoustic performance of the concept by constructing a model which was then to be tested in a small scale reverberance chamber. Although the model was quite simple, I still decided to construct it using grasshopper. The main parameters for this design was to be the total size of the panel, which was limited by the size of the reverberant chamber to be used; and the length of the felt desired, as well as material thicknesses and minimum cut separations, to maintain structural integrity in the model.

This script had a different input system, based off a simple “key : value “ pairs, which were then parsed and separated, keeping inputs together and more organised as well making it easier to save copy and paste different parameter settings.

The core of the script was based the equation:

$$Tl = \pi(R^2 - r^2)$$

Where:

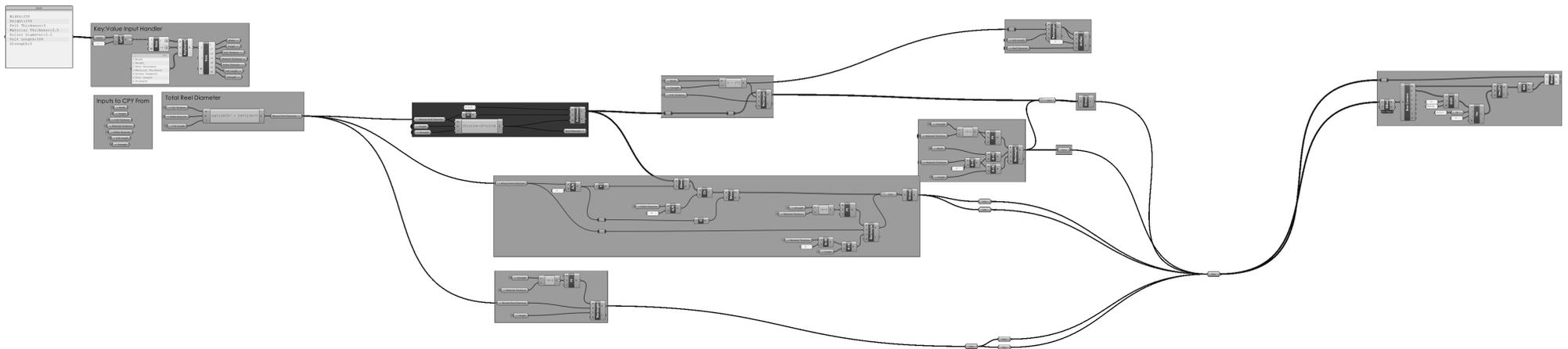
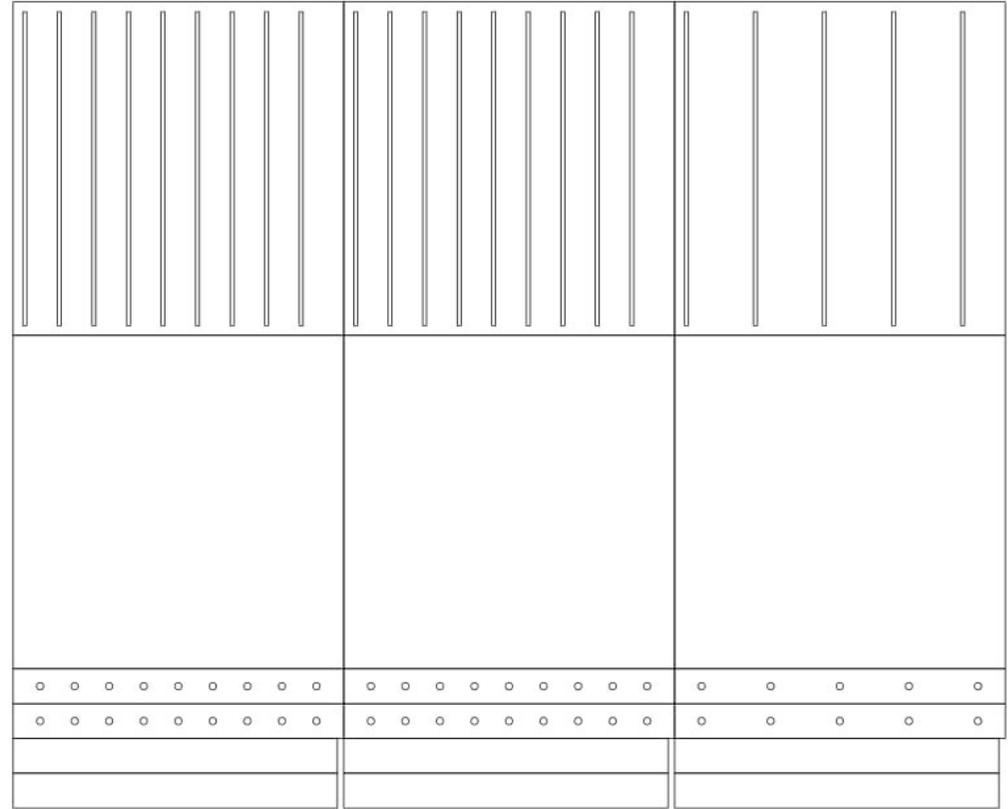
$T$  = Absorbing material thickness

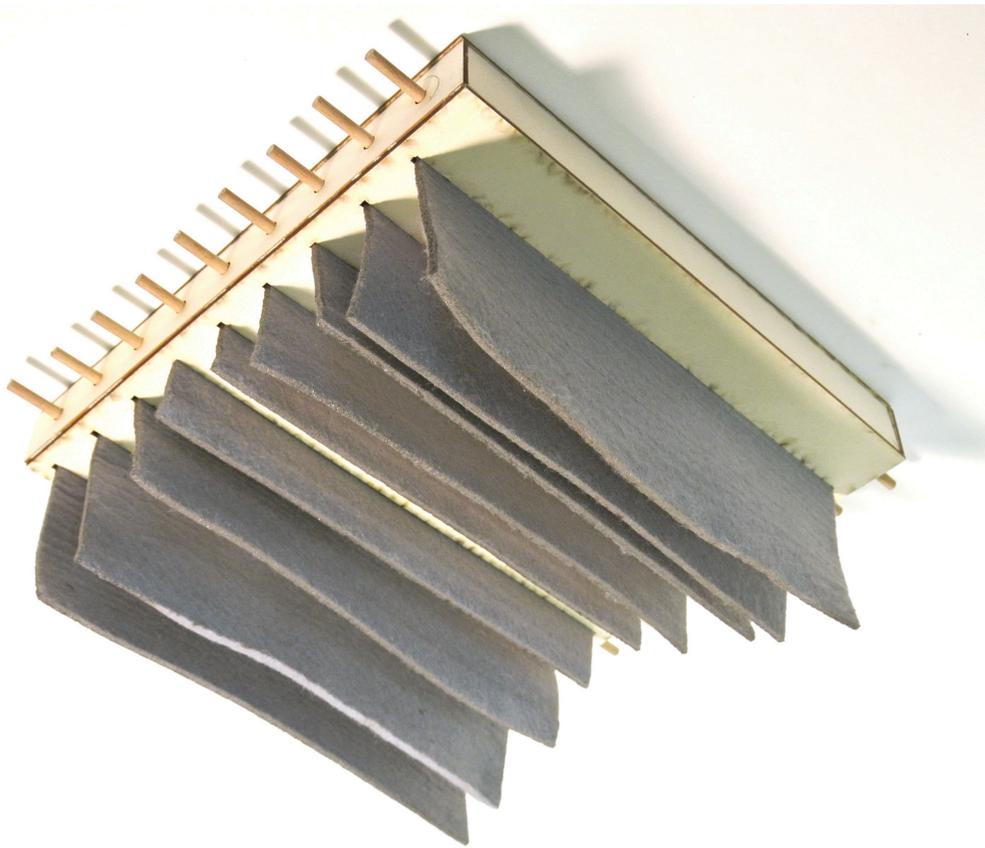
$l$  = Absorbing material length

$R$  = Total roll radius

$r$  = Roll axle radius

This equation formed the basis for finding the required thickness of the box and the minimum separation of the sheets of sound absorbing material which could easily then be translated into a net for laser cutting.





The model was tested fully extended and fully retracted. It performed very well, generally being twice as absorbent when extended compared to when retracted. It performed significantly better in the higher frequencies (as expected). Of all the models constructed in the group it performed best, with the largest difference between states.

This is however most likely not due to it being a better design, but due to the fact it succeeds in cramming a larger surface area of absorbing material onto the surface.

It was decided not to continue with the design at this point due to the complexity of constructing the design, as well as issues with finding a suitable material for the curtains. The design also needs to cover a large portion of the ceiling to be visually appealing, and the expense of constructing a larger prototype prohibited any further construction of the design.

These issues were not unexpected to me, so I moved over to another group to aid with their design.

Overall the course had been very helpful to me, giving me a very good introduction to parametric design, not only in theory, but also in application. I would likely never had even started with grasshopper had I not done this course.

← The model generally performed well; higher frequencies generally respond more than lower frequencies.

