

Absorptionsgradbestimmung von Lochplatten im Impedanzrohr

Projektarbeit

durchgeführt von

Stefan Plagg

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot Kubin

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, im Mai 2016

Zusammenfassung

Die vorliegende Projektarbeit beschäftigt sich mit der Absorptionsgradbestimmung von gelochten Holzplatten mit porösem Kern im Impedanzrohr. Anhand von gezielt ausgewählten und produzierten Proben wird untersucht, inwiefern sich die Messergebnisse mit der Theorie für Resonanzabsorber beschreiben lassen und wo dies nicht möglich ist.

In Kapitel 1 werden die Auswahl der Proben und die verwendeten Messmethoden kurz beschrieben. Kapitel 2 untersucht die Messungen mit schallhartem Abschluss. Interessanterweise ergeben sich bereits hier für einige Messobjekte Resonanzen im Absorptionsgrad. In Kapitel 3 werden die Auswirkungen eines Luftpolsters auf diese Messobjekte untersucht. Den Abschluss bildet Kapitel 4 mit dem Fazit und einem Ausblick für mögliche zukünftige Arbeiten.

Abstract

This project thesis deals with the measurement of the absorption coefficient of perforated wooden boards, with a porous core, with the aid of an impedance tube. Based on the measurement results of carefully selected samples it is evaluated which of the results can be explained by the well-known theory of absorber and for which elements that is not possible.

In chapter 1 the selection process of the samples and the measurement methods are described. Chapter 2 deals with the results of the measurements when there is no air behind the device under test. Interestingly, for some of the samples the absorption coefficient shows already resonances. This phenomenon is attempted to be explained in chapter 3, by measuring some of the samples with an air pad behind. To conclude chapter 4 gives a short upshot and provides a prospect for possible future research work.

Inhaltsverzeichnis

1	Versuchsplanung	1
1.1	Proben	1
1.2	Messverfahren	5
1.3	Helmholtzresonatoren	7
2	Messung mit schallhartem Abschluss	9
2.1	Variation des Plattenmaterials.....	9
2.2	Variation der Lochgeometrie	13
3	Messung mit Luftpolster	21
4	Zusammenfassung und Ausblick	29
5	Anhang	31
5.1	Zwei-Parametervariation bei schallhartem Abschluss	31
5.2	Rohr-Eigenfrequenzen	36
5.3	Ein-Tormessung vs. Zwei-Tormessung	39

Literaturverzeichnis

[AMT] AKUSTISCHE MESSTECHNIK; Werner Weselak: Skript zur Vorlesung *Akustische Messtechnik*; Version 10.1, WS 2015/16

[TA] TECHNISCHE AKUSTIK; Werner Weselak: Skript zur Vorlesung *Technische Akustik*; Version 12.0, SS 2016

[BRUN] Rudolf Brunnader: *Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter*; Diplomarbeit, Graz, 2002

[DENDA] Martin Denda: *Messsystem für akustische Zweitore*; Bachelorarbeit, Graz, 2010

1 Versuchsplanung

In Kapitel 1.1 wird auf die Auswahl der Proben eingegangen. Kapitel 1.2 beschreibt kurz die verwendeten Messverfahren. Abschließend werden in Kapitel 1.3 die wichtigsten theoretischen Grundlagen zu den Helmholtzresonatoren angegeben.

1.1 Proben

Zur Auswahl standen verschiedene Materialien die im Möbelbau eingesetzt werden. Um aus den Messungen den größtmöglichen Informationsgehalt zu erhalten und aus den Ergebnissen Dimensionierungsvorschriften ableiten zu können, wurden die Proben gezielt ausgewählt und hergestellt. Aus einer ersten Vorauswahl gingen 3 Materialien hervor. Erstens die herkömmliche Spanplatte mit einer Dichte von ca. 600kg/m^3 . Dieses Material wird mit FPY bezeichnet (Abb. 1.1 & Abb. 1.2).



Abb. 1.1: FPY im Querschnitt



Abb. 1.2: FPY in der Draufsicht (Proben-Nr. 30)

Als zweites Material wurde eine alternative Spanplatte gewählt, die bei einer geringeren Dichte von ca. 500kg/m^3 eine ähnliche Festigkeit wie die herkömmliche Spanplatte aufweist. Sie besteht zu einem Teil aus einem Recyclingprodukt der Maisverarbeitung und wird deshalb mit Mais bezeichnet (Abb. 1.3 & Abb. 1.4).



Abb. 1.3: Maisplatte im Querschnitt



Abb. 1.4: Maisplatte in der Draufsicht (Proben-Nr. 8)

Das letzte Material ist eine mitteldichte Faserplatte mit einer Dichte von ca. 650kg/m^3 . Sie wird mit MDF bezeichnet.



Abb. 1.5: MDF im Querschnitt



Abb. 1.6: MDF in der Draufsicht (Proben-Nr. 52)

Die Materialien sollen für den Bau von absorbierenden Möbeln verwendet werden. Da die Oberflächen aller 3 Typen als schallhart anzusehen sind, müssen sie gelocht werden, um einen Absorptionsgrad zu erreichen, der dem eines herkömmlichen Materials zum Möbelbau überlegen ist. Bei Lochplatten stehen theoretisch 3 Konstruktionsparameter zur Verfügung. Das ist zum einen die Dicke der Platte l_0 , dann der Lochdurchmesser $2a$ und der Lochabstand e . Im Möbelbau gelten 19mm Plattendicke als ein Standard, weshalb dieser Parameter konstant belassen wird. Das heißt, als variable Konstruktionsparameter bleiben noch der Lochdurchmesser und der Lochabstand bzw. das sich daraus ergebende Perforationsverhältnis σ :

$$\sigma = \frac{\pi \cdot a^2}{e^2} \quad (1.1)$$

Aus der Theorie für Resonanzabsorber sind generelle Dimensionierungsvorschriften bekannt ([TA] Kap. 3.2.5) und die Messobjekte werden, obwohl es sich dabei um eine Mischform aus porösem und Resonanzabsorber handelt, nach diesen Vorschriften hergestellt. Die Messergebnisse können dann mit der Theorie verglichen werden. Die 3 Materialien zueinander sollen auch verglichen werden. Daraus ergeben sich die in Tab. 1.1 und Tab. 1.2 aufgelisteten Messobjekte. Der Durchmesser der Proben beträgt 10cm.

Proben-Nr.	Material	l_0 [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
1	Mais	19	0	0	0,0
2	Mais	19	2	32	0,3
3	Mais	19	1	12	0,5
4	Mais	19	2	24	0,5
5	Mais	19	3	36	0,5
6	Mais	19	1,5	12	1,2
7	Mais	19	3	24	1,2
8	Mais	19	1	6	2,2
9	Mais	19	1,5	9	2,2
10	Mais	19	2	12	2,2
11	Mais	19	6	32	2,8
12	Mais	19	1,5	6	4,9

Tab. 1.1: Messobjekte (Teil 1)

Proben-Nr.	Material	l_0 [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
13	Mais	19	2	8	4,9
14	Mais	19	8	32	4,9
15	Mais	19	2	6	8,7
17	Mais	19	3	8	11,0
16	Mais	19	6	16	11,0
18	Mais	19	2	4	19,6
19	Mais	19	4	8	19,6
20	Mais	19	8	16	19,6
21	Mais & Flies	2*9,5	1	6	2,2
22	Mais & Flies	2*9,5	2	12	2,2
23	FPY	19	0	0	0,0
24	FPY	19	1	12	0,5
25	FPY	19	2	24	0,5
26	FPY	19	3	36	0,5
27	FPY	19	1,5	12	1,2
28	FPY	19	3	24	1,2
30	FPY	19	1	6	2,2
29	FPY	19	1,5	9	2,2
31	FPY	19	2	12	2,2
32	FPY	19	10	48	3,4
34	FPY	19	1,5	6	4,9
33	FPY	19	12	48	4,9
35	FPY	19	14	48	6,7
36	FPY	19	2	6	8,7
37	FPY	19	10	24	13,6
40	FPY	19	3	6	19,6
39	FPY	19	6	12	19,6
38	FPY	19	12	24	19,6
41	FPY	19	14	24	26,7
43	FPY & Flies	2*9,5	1	6	2,2
42	FPY & Flies	2*9,5	2	12	2,2
44	MDF	19	0	0	0,0
47	MDF	19	1	12	0,5
45	MDF	19	2	24	0,5
46	MDF	19	3	36	0,5
49	MDF	19	1,5	12	1,2
48	MDF	19	3	24	1,2
52	MDF	19	1	6	2,2
51	MDF	19	1,5	9	2,2
50	MDF	19	2	12	2,2
53	MDF	19	1,5	6	4,9
54	MDF	19	2	6	8,7
55	MDF & Flies	2*9,5	1	6	2,2
56	MDF & Flies	2*9,5	2	12	2,2

Tab. 1.2: Messobjekte (Teil 2)

1.2 Messverfahren

Für das Impedanzrohr als akustisches Ein-Tor bzw. Zwei-Tor stehen zwei Messverfahren zur Auswahl. Die 2-Mikrofonmessung bzw. Trennungs- oder Übertragungsfunktionsmethode und die 4-Mikrofonmessung bzw. Kettenmatrixmethode. Die Auswertung der Messdaten erfolgt in CATS8. Sämtliche Messungen wurden im Akustiklabor des Instituts für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation der TU-Graz durchgeführt.

Die 2-Mikrofonmethode



Abb. 1.7: Messsystem für die 2-Mikrofonmethode (Ein-Tor-Messung)

Abb. 1.7 zeigt das Messsystem im Aufbau als akustisches Ein-Tor sprich für die 2-Mikrofonmethode. Der Lautsprecher links liefert ein breitbandiges Rauschen als Messsignal. Auf dem darauf folgenden Messpfad wird der Schalldruck an 2 Positionen gemessen. Dahinter befindet sich der Probenhalter mit dem Messobjekt und dahinter der einstellbare Luftpolster [BRUN].

Das Prinzip beruht auf der Trennung des (messbaren) Gesamtschalldruckes in Anteile der hin- und rücklaufenden Wellen ([AMT] Kap. 4.1). Aus diesen können dann die interessierenden akustischen Parameter bestimmt werden ([AMT] Kap 4.4).

Mit Hilfe dieser Messmethode können der Reflexionsfaktor bzw. der Reflexionsgrad, der Absorptionsgrad für senkrechten und diffusen Schalleinfall und die Wandimpedanz bzw. Wandadmittanz bestimmt werden. Die eigentliche Messzeit ist mit ca. 30s sehr gering.

Die 4-Mikrofonmethode

Abb. 1.8: Messsystem für die 4-Mikrofonmethode (akustisches Zwei-Tor)

Abb. 1.8 zeigt das Messsystem für die 4-Mikrofonmethode. Die wesentlichen Unterschiede zur 2-Mikrofonmethode sind ein Probenhalter in der Mitte, ein zweiter Messpfad hinter dem Messobjekt und ein zweiter Lautsprecher rechts. Bei der Kettenmatrixmethode handelt es sich prinzipiell um eine wiederholte Anwendung der Trennungsmethode, an beiden Toren des akustischen Zwei-Tors. Werden nun die Kettenmatrixparameter nach ([AMT] Kap. 4.2) bestimmt, können daraus alle interessierenden akustischen Parameter berechnet werden ([AMT] Kap. 4.4).

Mit Hilfe dieser Methode können neben den Reflexionsparametern der Ein-Tormessung zusätzlich die Transmissionsparameter wie z.B. Durchgangsdämpfung, Absorberimpedanz, die komplexe Ausbreitungskonstante und Strömungsimpedanz bestimmt werden.

Außerdem bietet diese Messmethode die Möglichkeit im Postprocessing beliebige akustische Zweitore zu schichten. So können zum Beispiel Fälle simuliert werden, in denen zwei Materialien geschichtet werden oder es kann ein Luftpolster hinter der Probe simuliert werden ([DENDA] Kap. 3.4). Der Nachteil ist, dass die Messung im Vergleich zur Zwei-Mikrofonmethode doppelt so lange dauert.

1.3 Helmholtzresonatoren

Da die Dicke der Proben konstant bleibt, stehen zwei veränderbare Konstruktionsparameter zur Verfügung, der Lochdurchmesser 2α und der Lochabstand e . Beide Parameter haben Einfluss auf die Strömungsgeschwindigkeit der Luftteilchen durch das Material, was den viskosen Widerstand an der Innenwand der Öffnung R_0 beeinflusst ([TA] Kap. 3.2.4):

$$R_0 = 0,53 \cdot 10^{-2} \cdot \frac{e^2 \cdot l_0}{\alpha^3} \cdot \sqrt{f} \quad (1.2)$$

Im Rahmen dieser Projektarbeit wurde an der jeweiligen Resonanzfrequenz die gemessene Wandimpedanz \underline{W} ausgelesen und daraus der Strömungswiderstand R_0 über folgende Beziehung berechnet:

$$R_0(f_0) = \underline{W}(f_0) \quad (1.3)$$

Außerdem haben der Lochdurchmesser und der Lochabstand Einfluss auf den wirksamen Massenbelag m ([TA] Kap. 3.2.1):

$$m = m_0 + 2\Delta m = \frac{\rho \cdot e^2}{\pi \cdot \alpha^2} \cdot (l_0 + 2\Delta l) \quad (1.4)$$

Die Mündungskorrektur kann nach Rayleigh näherungsweise über folgende Gleichung berechnet werden ([TA] Kap. 3.2.2):

$$\Delta l = 0,8 \cdot \alpha \quad (1.5)$$

Wird der Lochabstand e gering, beeinflussen sich die Strömungen außerhalb der Lochmündungen gegenseitig, was sich zusätzlich auf die Mündungskorrektur auswirkt. Nach Ingard gilt für Perforationsverhältnisse von $\sigma \leq 20\%$ ([TA] Kap. 3.2.2):

$$\Delta l = 0,8 \cdot (1 - 1,4 \cdot \sqrt{\sigma}) \quad (1.6)$$

Bei Helmholtz-, Loch- und Schlitzplattenresonatoren wird die Absorptionswirkung durch Resonanz verstärkt, wobei sowohl Masse als auch Feder von der (zum Großteil) eingeschlossenen Luft gebildet werden. Das Prinzip der Luftresonanz bewirkt dann die damit in Verbindung stehende dämpfende Wirkung der Luftströmung durch die Löcher oder Schlitze. Hier werden lediglich Lochplatten betrachtet und deshalb die Schlitzplatten nicht weiter besprochen. Für die Resonanzfrequenz eines solchen Masse-Feder-Systems gilt ([TA] Kap. 3.1):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{s'}{m'}} \quad (1.7)$$

Dabei bezeichnet s' die Federsteife und m' die Schwingmasse.

$$s' = \rho \cdot c^2 \cdot \frac{S^2}{V} \quad (1.8)$$

$$m' = \rho \cdot (l_0 + 2\Delta l) \cdot S \quad (1.9)$$

Im Volumen V ist der Wandabstand d enthalten. Die beiden Terme in die Gleichung für die Resonanzfrequenz eingesetzt, ergeben dann die allgemeine Gleichung für die Resonanzfrequenz, die für Einzel-Helmholtzresonatoren, Loch- und Schlitzplattenresonatoren gültig ist ([TA] Kap. 3.1):

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{S}{(l_0 + 2\Delta l) \cdot V}} \quad (1.10)$$

Diese Gleichung kann auch umgeformt werden:

$$f_0 = \frac{60}{\sqrt{m \cdot d}} \quad (1.11)$$

Der Wandabstand ist ein wichtiger Dimensionierungsparameter für Resonanzabsorber. So lässt sich die Härte der akustischen Feder verändern und damit die Resonanzfrequenz einstellen.

2 Messung mit schallhartem Abschluss

In diesem Kapitel werden einige Messergebnisse zur Zwei-Mikrofonmessung mit schallhartem Abschluss gezeigt und diskutiert. Der variable Kolben des Messsystems (vgl. Abb. 1.7) wurde dazu direkt an den Messobjekten platziert und fixiert. Mit Hilfe der Messobjekte aus Tab. 1.1 bzw. Tab. 1.2 konnte so das Absorptionsverhalten der Messobjekte untersucht werden.

Kapitel 2.1 zeigt zunächst einen direkten Vergleich der 3 Materialien. Kapitel 2.2 enthält die Ergebnisse der Messungen mit Variation der Lochgeometrie.

2.1 Variation des Plattenmaterials

Bei den ersten Untersuchungen wurden die 3 Materialien anhand einiger Messobjekte hinsichtlich ihrer absorbierenden Eigenschaften verglichen.

Abb. 2.1 zeigt das Ergebnis der 3 Materialien ohne Lochung. Ausgewiesen wurde jeweils der Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall α_0 . Unter den Abbildungen befindet sich jeweils die passende Legende mit Angaben zum Material und zu den Konstruktionsparametern und mit den Ergebnissen. Während für die herkömmliche Spanplatte und die mitteldichte Faserplatte annähernd Null gemessen wird, zeigt die Maisplatte bereits eine leicht absorbierende Wirkung mit $\alpha_0 \approx 0,1$.

Abb. 2.2 zeigt einen ersten Vergleich für gelochte Messobjekte. Interessanterweise zeigen sich für Mais und FPY Resonanzen im Absorptionsgrad. Für die Maisplatte ist die Resonanz sogar sehr deutlich zu erkennen. Bei FPY ist sie bereits sehr breit, aber trotzdem noch erkennbar.

Abb. 2.3 zeigt ein Beispiel für ein größeres Perforationsverhältnis ($\sigma = 4,9\%$). Die Maisplatte weist immer noch den höchsten Absorptionsgrad auf, jedoch ist der Unterschied zwischen Mais und FPY nicht mehr ganz so groß wie noch im vorangehenden Beispiel. Auf MDF hatte die Vergrößerung des Perforationsverhältnisses nur wenig Auswirkung.

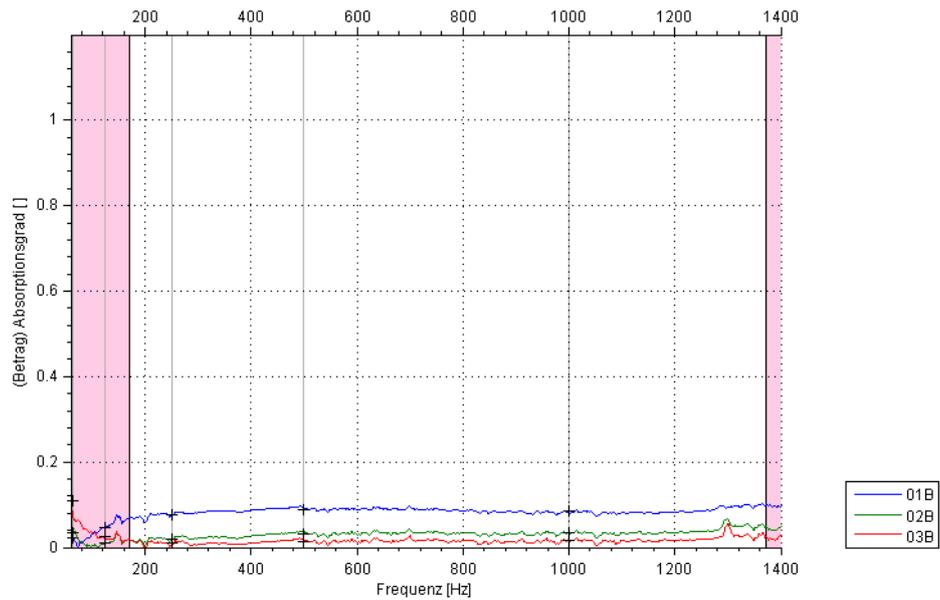


Abb. 2.1: Vergleich der 3 Materialien

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	0	0	0
02B	FPY	0	0	0
03B	MDF	0	0	0

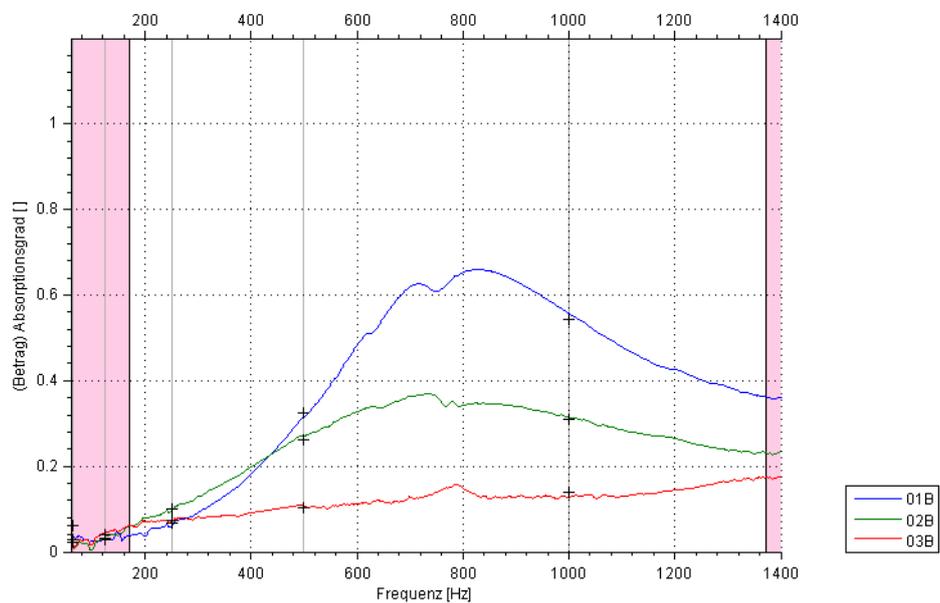


Abb. 2.2: Vergleich der 3 Materialien, gelocht ($\sigma=2,2\%$)

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	1	6	2,2
02B	FPY	1	6	2,2
03B	MDF	1	6	2,2

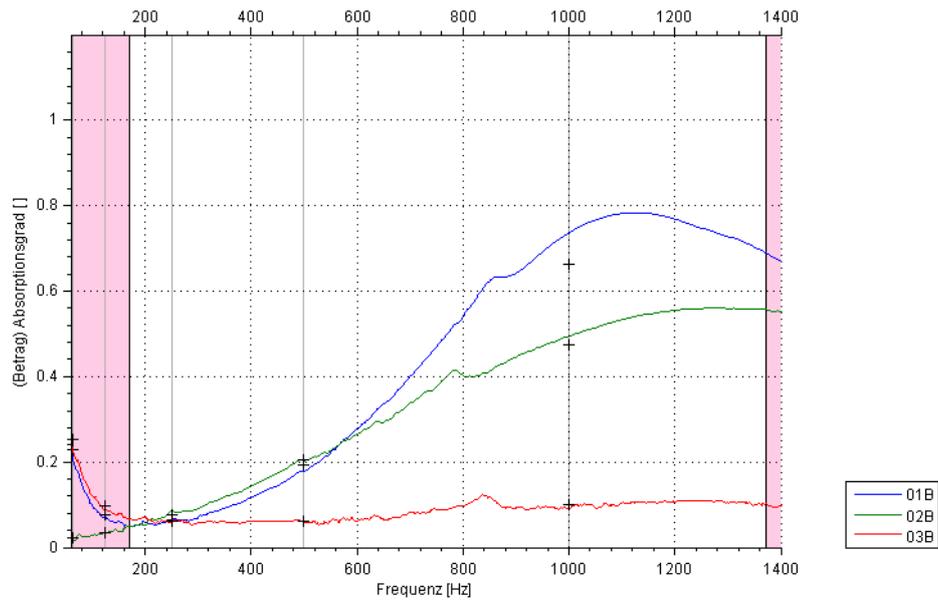


Abb. 2.3: Vergleich der 3 Materialien, gelocht ($\sigma=4,9\%$)

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	1,5	6	4,9
02B	FPY	1,5	6	4,9
03B	MDF	1,5	6	4,9

Tab. 2.1 zeigt die Ergebnisse für 3 Materialien und 2 Perforationsverhältnisse.

Material	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
Mais	2,2	830	0,64	1500
FPY	2,2	730	0,36	3500
MDF	2,2	-	-	-
Mais	4,9	1120	0,76	1082
FPY	4,9	1280	0,56	1980
MDF	4,9	-	-	-

Tab. 2.1: Ergebnisse

Für MDF zeigte sich keine Resonanz im Messfrequenzbereich. Das Ergebnis zeigt, dass die Maisplatte von den drei Materialien am besten an die Schallkennimpedanz der Luft Z_0 angepasst ist (wenn auch nicht ideal). Das erklärt auch die beste Absorptionswirkung dieses Materials. MDF zeigt auch für gelochte Proben keine wesentliche absorbierende Wirkung. Deshalb wird dieses Material für die weiteren Diskussionen außer Acht gelassen.

Laterale Federn

Bei den untersuchten Messobjekten werden die Luftmassen in den Löchern auch seitlich in das Material gepresst, was zur Ausbildung lateraler akustischer Federn und zu Resonanzen im Absorptionsgrad führt. Ein erster Hinweis dafür ist, dass sich dieser Effekt bei MDF nicht zeigt. Dieses Material ist sehr kompakt und weist auch im Inneren eine sehr hohe Dichte auf. Als einfacher Test wurde für jede Probe versucht, Luft seitlich durch den Querschnitt zu blasen. Am einfachsten funktioniert dies mit dem Mund, da so der Strömungswiderstand im Vergleich zu einem Blasinstrument abgeschätzt werden kann. Für die Maisplatte war der Widerstand sehr gering (geringer als bei einem Blechblasinstrument). Das Material ist also seitlich sehr luftdurchlässig. Auch bei der herkömmlichen Spanplatte konnte relativ leicht Luft durchgeblasen werden. Beim Material MDF war dies nur sehr schwer möglich. Das Material ist also auch im Querschnitt eher schallhart.

Für die Maisplatte wurde versucht diese lateralen Federn zu berechnen. Ausgehend von der Formel für die Resonanzfrequenz [vgl. Gl.(1.11)], wurde für die gemessene Resonanzfrequenz und die gegebenen geometrischen Abmessungen des Absorbers, auf den dafür notwendigen Wandabstand rückgerechnet. Zu beachten ist hierbei, dass beim wirksamen Massenbelag die Mündungskorrektur nur einfach eingeht, da das Material rückseitig schallhart abgeschlossen ist. Um die Auswirkungen durch die lateralen Federn von jenen durch Änderungen im wirksamen Massenbelag unterscheiden zu können, wurden Messobjekte mit konstantem Perforationsverhältnis verwendet. Dort ändert sich der wirksame Massenbelag nur geringfügig durch die einseitige Mündungskorrektur.

Tab. 2.2 zeigt das Ergebnis für einige Messobjekte:

Material	f_0 [Hz]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	d [mm]
Mais	830	1,0	6	2,2	5,1
Mais	720	1,5	9	2,2	6,7
Mais	800	2,0	12	2,2	5,4
Mais	1280	2,0	8	4,9	4,7
Mais	1120	1,5	6	4,9	5,2

Tab. 2.2: Berechnete laterale akustische Federn (äquivalente Wandabstände)

Das Ergebnis fällt je nach Perforationsverhältnis unterschiedlich aus. Sind die berechneten akustischen Federn bei $\sigma = 2,2\%$ noch sehr ähnlich, unterscheiden sie sich bei $\sigma = 4,9\%$ doch schon deutlich. Hier sind aber auch die Änderungen in den Konstruktionsparametern größer. Zudem zeigt Tab. 2.1, dass für das größere Perforationsverhältnis der Strömungswiderstand besser an die Schallkennimpedanz der Luft angepasst ist und somit generell mehr Schall ins Material und somit auch in die lateralen Federn eindringen kann.

In Kap. 3 gibt es noch eine Betrachtung der lateralen Federn für Beispiele, die mit Luftpolster, also durch den Wandabstand definierte akustische Federn, gemessen wurden.

2.2 Variation der Lochgeometrie

Da die Dicke der Proben konstant bleibt, stehen zwei veränderbare Konstruktionsparameter zur Verfügung, der Lochdurchmesser $2a$ und der Lochabstand e .

Der Lochdurchmesser $2a$ und der Lochabstand e sind somit ausschlaggebend für die spätere Dimensionierung der Platten. Durch den Herstellungsprozess und den angestrebten Verwendungszweck sind hier gewisse Grenzen gesetzt, weshalb sich der Lochdurchmesser im Bereich von $1\text{mm} \leq 2a \leq 14\text{mm}$ und der Lochabstand im Bereich $4\text{mm} \leq e \leq 48\text{mm}$ bewegt. Sämtliche Messobjekte aus Tab. 1.1 bzw. Tab. 1.2 wurden gemessen. In den nachfolgenden Untersuchungen werden jedoch lediglich ausgewählte Messergebnisse dargestellt und diskutiert.

Die Materialien sind alle inhomogen aufgebaut (vgl. Querschnitte in Kap. 1.1). Die Dichte ist in der Mitte am geringsten und nimmt nach außen hin zu. Durch diesen inhomogenen Aufbau können Parameter wie die Absorberimpedanz oder die komplexe Ausbreitungskonstante nicht mehr für die Beschreibung herangezogen werden. Deshalb werden hier für die Diskussion der Ergebnisse lediglich der Absorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall α_0 und die Wandimpedanz \underline{W} bzw. der daraus berechnete Strömungswiderstand R_0 [Gl.(1.3)] herangezogen.

Mais

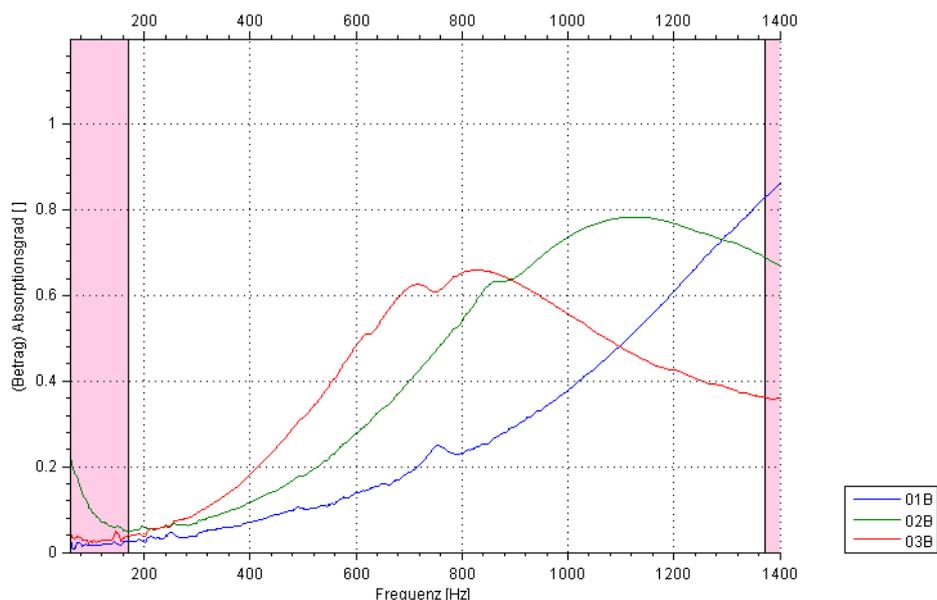


Abb. 2.4: Mais, Absorptionsgrad für variablen Lochdurchmesser $2a$ und $e=6\text{mm}$

Legende							
Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	2,0	6	8,7	>1400	-	-
02B	Mais	1,5	6	4,9	1120	0,76	1082
03B	Mais	1,0	6	2,2	830	0,64	1500

Abb. 2.4, Abb. 2.5 zeigen die Änderungen im Absorptionsgrad für die Maisplatte, wenn der Lochdurchmesser $2a$ variiert wird.

Wie bereits in Kapitel 2.1 zeigen sich auch hier wieder Resonanzen. Die Resonanzfrequenz f_0 und der Absorptionsgrad α_0 steigen dabei mit steigendem Lochdurchmesser an.

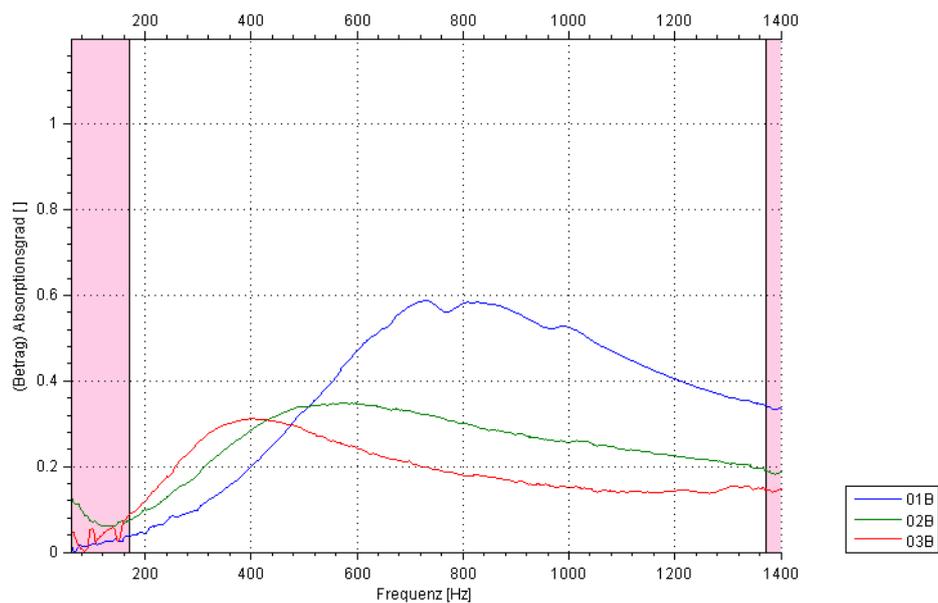


Abb. 2.5: Mais, Absorptionsgrad für variablen Lochdurchmesser $2a$ und $e=12$ mm

Legende							
Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	2,0	12	2,2	800	0,60	1895
02B	Mais	1,5	12	1,2	580	0,34	3718
03B	Mais	1,0	12	0,5	400	0,32	4185

Abb. 2.6 und Abb. 2.7 zeigen Beispiele, bei denen lediglich der Lochabstand e variiert wurde. Die Resonanzfrequenz f_0 und der Absorptionsgrad α_0 sinken mit steigendem Lochabstand.

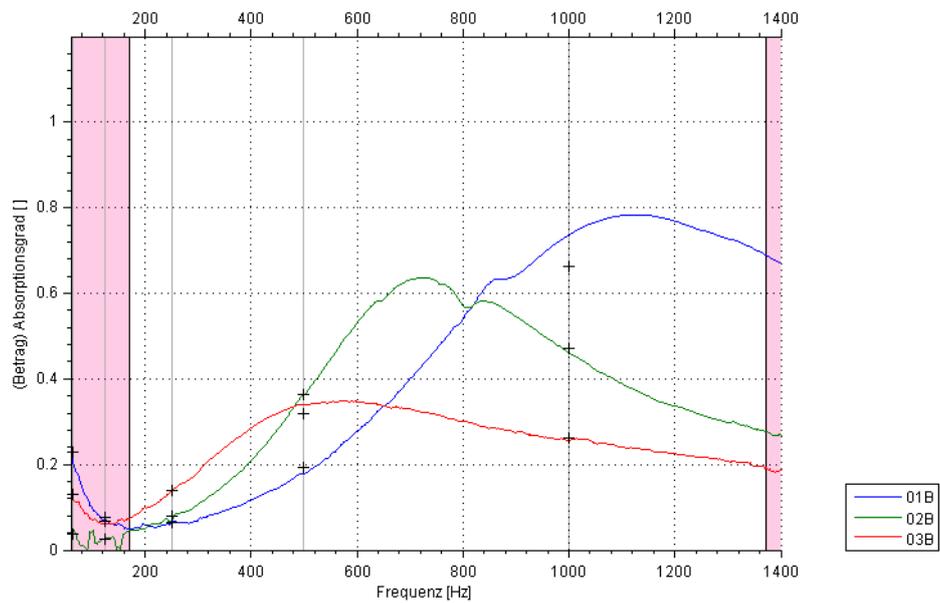


Abb. 2.6: Mais, Absorptionsgrad für variablen Lochabstand e und $2\alpha=1,5\text{mm}$

Legende

Fkt. Nr.	Material	2α [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	1,5	6	4,9	1120	0,76	1082
02B	Mais	1,5	9	2,2	720	0,64	1590
03B	Mais	1,5	12	1,2	580	0,34	3718

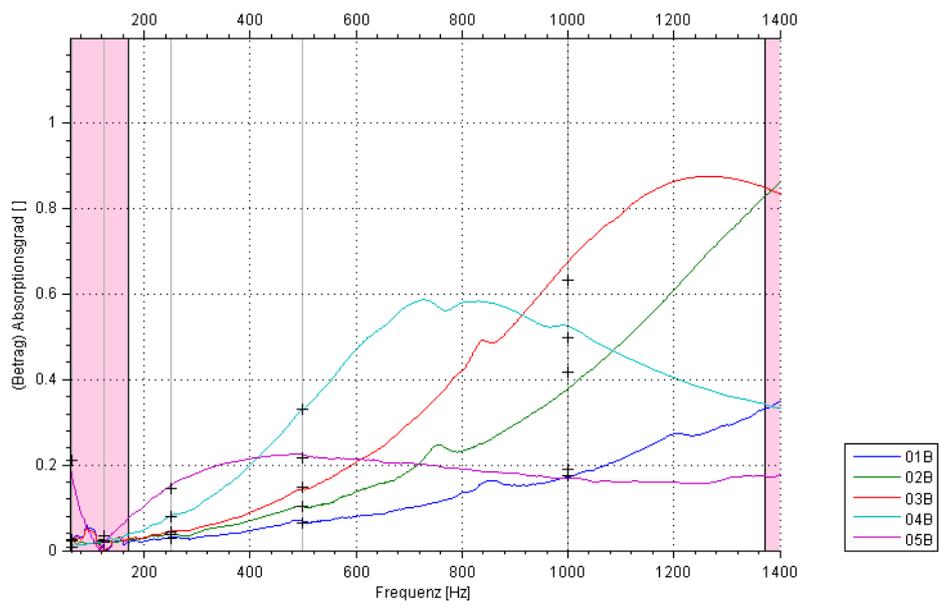


Abb. 2.7: Mais, Absorptionsgrad für variablen Lochabstand e und $2\alpha=2\text{mm}$

Legende

Fkt. Nr.	Material	2α [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	2	4	19,6	>1400	-	-
02B	Mais	2	6	8,7	>1400	-	-
03B	Mais	2	8	4,9	1280	0,88	825
04B	Mais	2	12	2,2	800	0,60	1895
05B	Mais	2	24	0,5	500	0,22	6408

FPY

Als zweites Material wurde die herkömmliche Spanplatte FPY untersucht. Im Vergleich zur Maisplatte ist dieses Material etwas kompakter und weist, wie in Abb. 2.1 zu sehen, ungelocht niedrigere Absorptionsgrade auf.

Abb. 2.8 und Abb. 2.9 zeigen die Ergebnisse für Messobjekte mit variablem Lochdurchmesser. Der Absorptionsgrad sinkt mit sinkendem Lochdurchmesser und die Resonanzfrequenz fällt dabei zu tieferen Frequenzen hin.

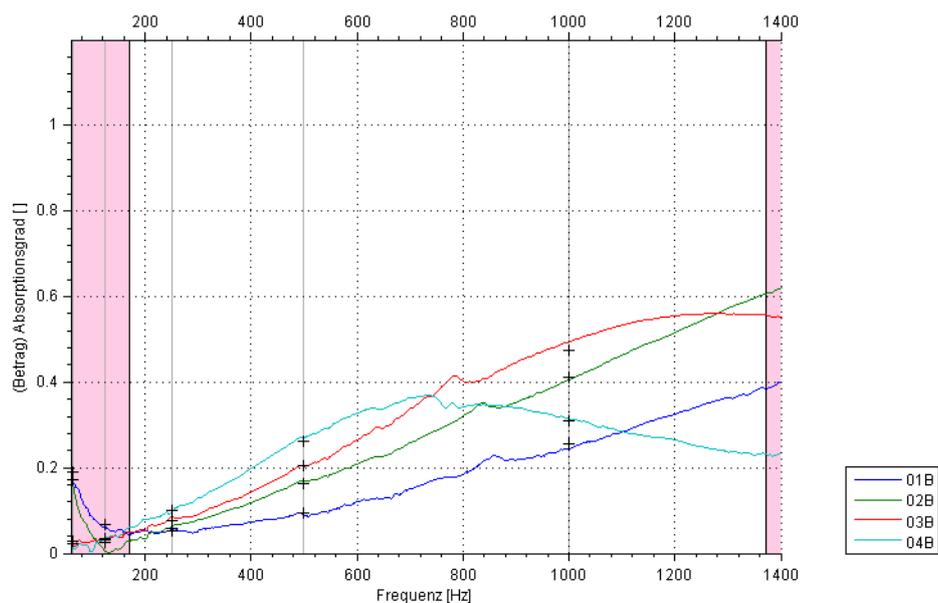
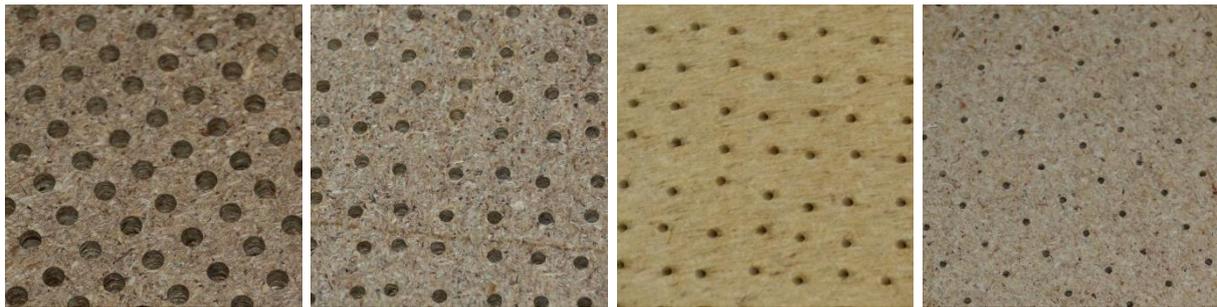


Abb. 2.8: FPY, Absorptionsgrad für variablen Lochdurchmesser $2a$ und $e=6\text{mm}$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	FPY	3,0	6	19,6	>1400	-	-
02B	FPY	2,0	6	8,7	>1400	-	-
03B	FPY	1,5	6	4,9	1280	0,56	1980
04B	FPY	1,0	6	2,2	730	0,36	3500

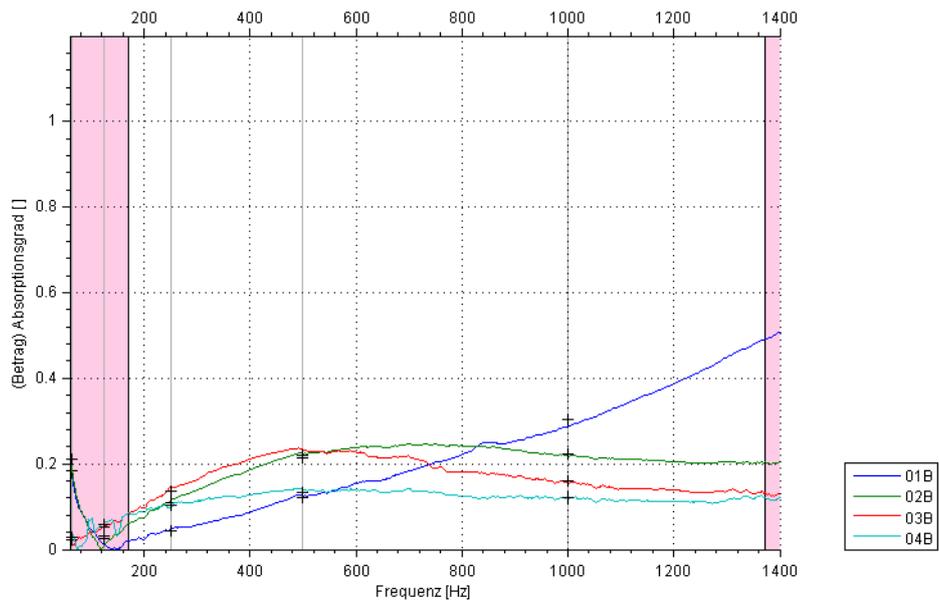
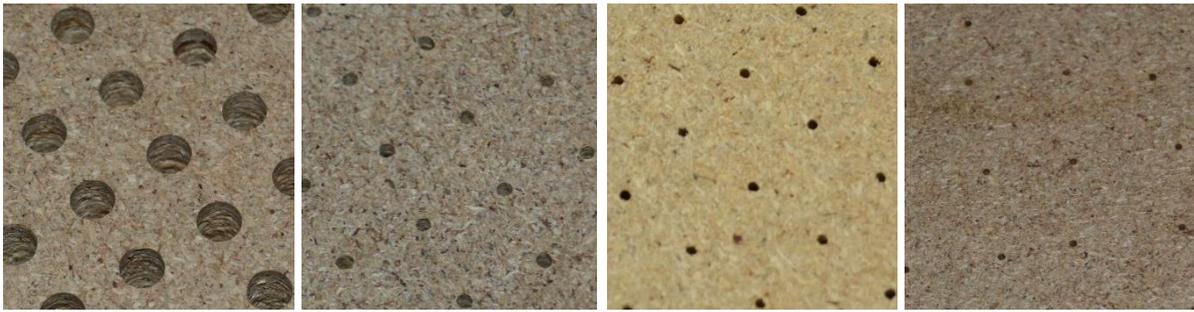


Abb. 2.9: FPY, Absorptionsgrad für variablen Lochdurchmesser $2a$ und $e=12\text{mm}$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	FPY	6,0	12	19,6	>1400	-	-
02B	FPY	2,0	12	2,2	740	0,26	5680
03B	FPY	1,5	12	1,9	500	0,24	6056
04B	FPY	1,0	12	0,5	600	0,14	10588

Abb. 2.10 zeigt ein Beispiel mit variablem Lochabstand.

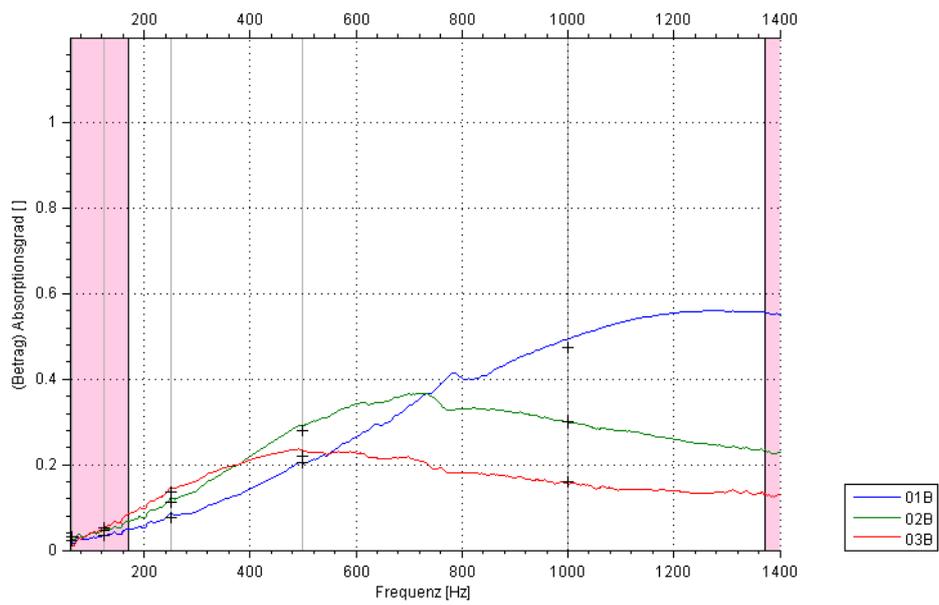
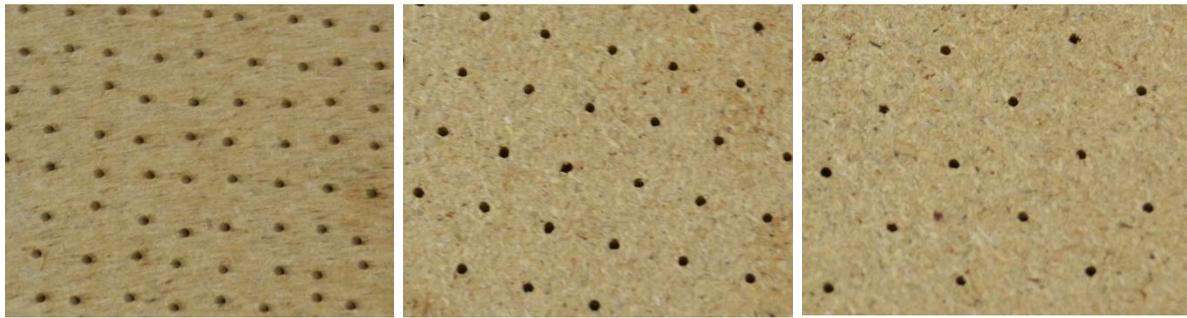


Abb. 2.10: FPY, Absorptionsgrad für variablen Lochabstand e und $2\alpha=1,5\text{mm}$

Legende

Fkt. Nr.	Material	2α [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	FPY	1,5	6	4,9	1280	0,56	1980
02B	FPY	1,5	9	2,2	740	0,36	3590
03B	FPY	1,5	12	1,2	500	0,24	6056

Der Vergleich der 2 Materialien hat gezeigt, dass die Maisplatte bei schallhartem Abschluss die besseren Absorptionseigenschaften aufweist.

Wird jeweils ein Konstruktionsparameter (2α oder e) verändert, ergeben sich bei schallhartem Abschluss folgende Tendenzen der Absorberparameter:

Lochdurchmesser $2\alpha \uparrow$, übrige Parameter bleiben konstant				
$f_0 \uparrow$	$R_0(f_0) \downarrow$	$m \downarrow$	$\sigma \uparrow$	$\alpha_0 \uparrow$
Lochabstand $e \uparrow$, übrige Parameter bleiben konstant				
$f_0 \downarrow$	$R_0(f_0) \uparrow$	$m \uparrow$	$\sigma \downarrow$	$\alpha_0 \downarrow$

Tab. 2.3: Absorberparameter bei Änderung eines Konstruktionsparameters

Bei steigendem Lochabstand muss die gleiche Luftmasse durch weniger Löcher, was eine Steigerung des wirksamen Massenbelages m zur Folge hat, wodurch f_0 sinkt. Die Vergrößerung des Lochdurchmessers wirkt entgegengesetzt auf m und somit steigt hier f_0 .

Die Abnahme von α_0 bei steigendem Strömungswiderstand ist dadurch zu erklären, dass R_0 für fast alle Messobjekte bereits überangepasst an die Schallkennimpedanz der Luft ist. Wird R_0 also weiter gesteigert, dringt weniger Schall in das Material ein und der Absorptionsgrad nimmt ab ([TA] Kap. 3.2.4).

Bei den Messungen hat sich gezeigt, dass $e=6\text{mm}$ gute Ergebnisse im Messfrequenzbereich liefert. Die Resonanzfrequenz oder der Arbeitsbereich kann dann über den Lochdurchmesser angepasst werden, wobei aber immer eine bestmögliche Anpassung an die Schallkennimpedanz der Luft angestrebt werden sollte. Gute Ergebnisse haben sich hier für $1 \leq 2\alpha \leq 2\text{mm}$ gezeigt. Ein Perforationsverhältnis von $\sigma \geq 2,2\%$ sollte unbedingt eingehalten werden, um genügende Absorption zu erreichen.

3 Messung mit Luftpolster

Bei den zu untersuchenden Absorbern handelt es sich um eine Mischform aus porösem Absorber und Resonanzabsorber, jedoch ist es durch den inhomogenen Aufbau und die ungenaue Kenntnis der Ausgangsmaterialien der Absorber sehr schwer, Untersuchungen hinsichtlich der Theorie der porösen Absorber durchzuführen. Deshalb wird auch in diesem Kapitel vorrangig auf das Prinzip der Luftresonanz eingegangen und versucht über den Wandabstand eine weitere Dimensionierungsvorschrift für die Absorber abzuleiten.

Das folgende Kapitel zeigt die Messergebnisse von 2 Materialien bei variablem Wandabstand und deren Diskussion.

Variation des Wandabstandes

In Kapitel 2 wurde festgestellt, dass auch bei schallhartem Abschluss Resonanzen im Absorptionsgrad vorhanden sind. Nun wird untersucht, was mit diesen Resonanzen passiert, wenn zusätzlich eine akustische Feder hinter dem Messobjekt vorhanden ist. Ausgewiesen wird wieder der Absorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall α_0 für Wandabstände von 1mm bis 250mm. Zusätzlich wurde das Messergebnis für den schallharten Abschluss angegeben.

Mais

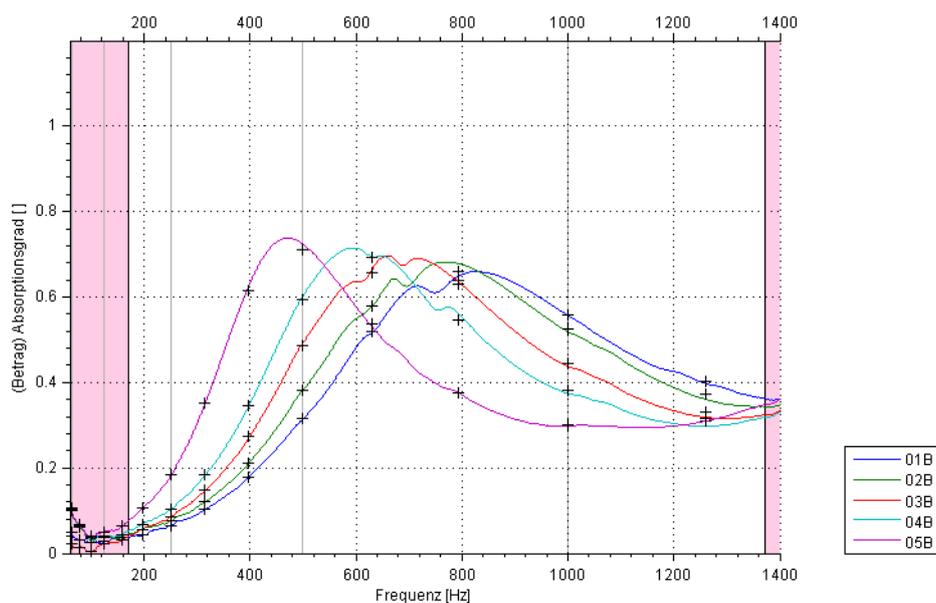


Abb. 3.1: kleine Wandabstände, Maisplatte mit $\sigma=2,2\%$

Legende					
Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	0	1	6	2,2
02B	Mais	1	1	6	2,2
03B	Mais	3	1	6	2,2
04B	Mais	5	1	6	2,2
05B	Mais	10	1	6	2,2

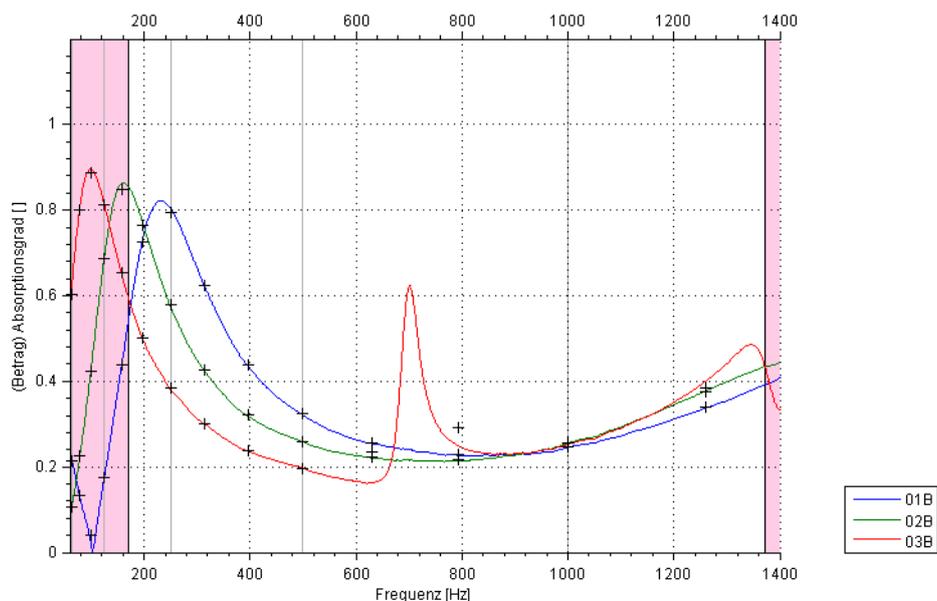


Abb. 3.2: große Wandabstände, Maisplatte mit $\sigma=2,2\%$

Legende					
Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	50	1	6	2,2
02B	Mais	100	1	6	2,2
03B	Mais	250	1	6	2,2

Abb. 3.1 und Abb. 3.2 zeigen ein Beispiel der Maisplatte, das bereits bei schallhartem Abschluss eine Resonanz im Absorptionsgrad hatte. Wird hinter dem Messobjekt ein Luftpolster angebracht und dieser vergrößert, verschiebt sich die Resonanzfrequenz zu tiefen Frequenzen hin. Der Absorptionsgrad steigt und die Halbwertsbreite der Resonanzstellen Δf_H sinkt.

Tab. 3.1 zeigt die Ergebnisse für die verschiedenen Wandabstände. R_0 sinkt mit steigendem Wandabstand und der Absorptionsgrad steigt dadurch immer mehr an, da sich R_0 dem Bereich der Anpassung an Z_0 nähert.

d [mm]	f_0 [Hz]	$\alpha_0(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
0	830	0,64	1500
1	780	0,66	1457
3	680	0,69	1362
5	580	0,71	1270
10	460	0,74	1175
50	230	0,82	969
100	160	0,86	859
250	100	0,88	777

Tab. 3.1: Ergebnisse für steigenden Wandabstand (Mais, $\sigma=2,2\%$)

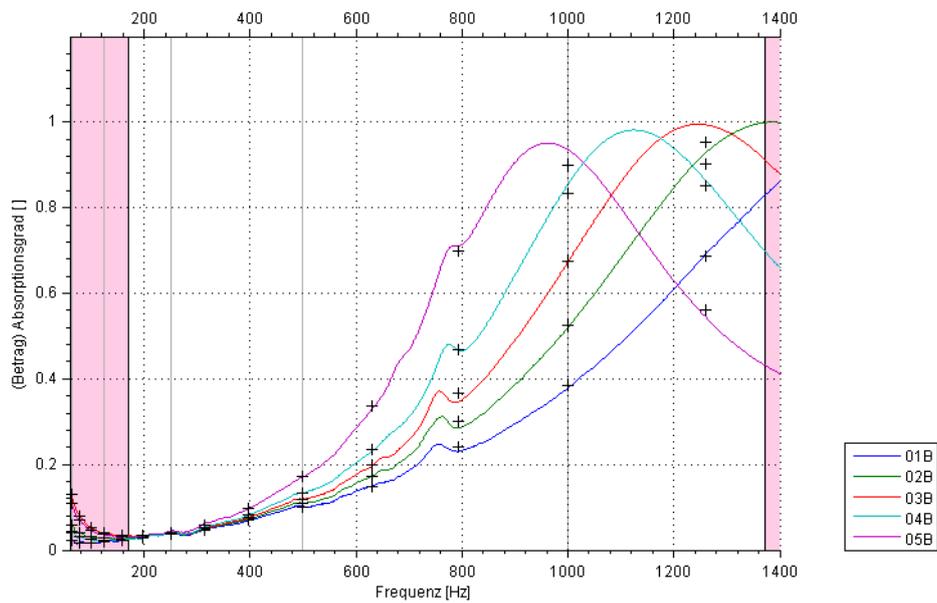


Abb. 3.3: kleine Wandabstände, Maisplatte mit $\sigma=8,7\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	0	2	6	8,7
02B	Mais	1	2	6	8,7
03B	Mais	3	2	6	8,7
04B	Mais	5	2	6	8,7
05B	Mais	10	2	6	8,7

Abb. 3.3 und Abb. 3.4 zeigen ein Beispiel mit größerem Perforationsverhältnis. Der Absorptionsgrad hat sein Maximum bei kurzem Abstand zur Wand und fällt dann für größere Abstände ab. Die Resonanzfrequenz f_0 fällt stetig mit steigendem Wandabstand. Tab. 3.2 zeigt für dieses Messobjekt die Ergebnisse. Es wird klar, dass das Messobjekt durch das größere Perforationsverhältnis gut an die Schallkennimpedanz Z_0 angepasst ist. Mit steigendem Wandabstand fällt der Strömungswiderstand dann weiter ab (Unteranpassung) und der Absorptionsgrad sinkt.

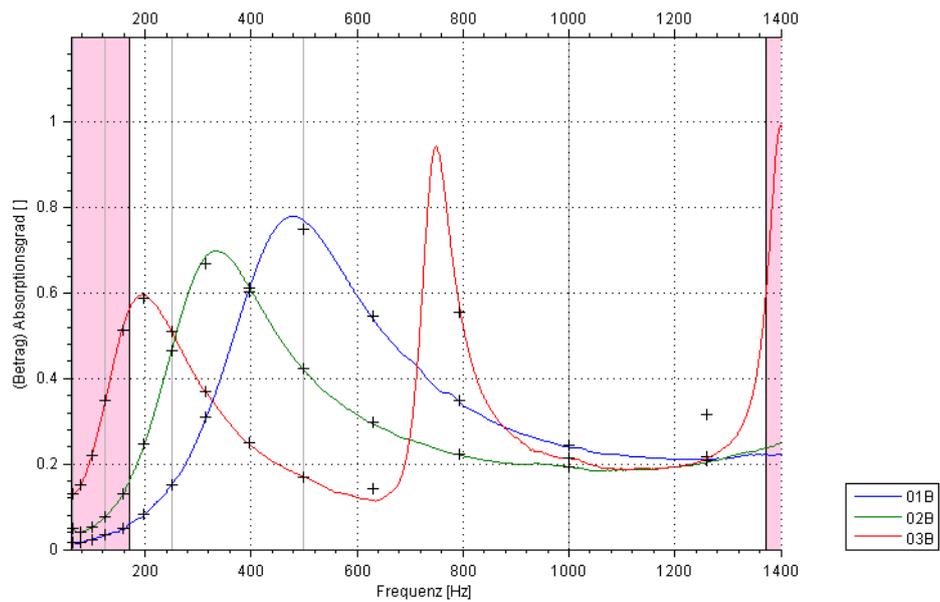


Abb. 3.4: große Wandabstände, Maisplatte mit $\sigma=8,7\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	50	2	6	8,7
02B	Mais	100	2	6	8,7
03B	Mais	250	2	6	8,7

Für beide Messobjekte zeigen sich für den Abstand von 250mm weitere Resonanzen. Dies sind Rohrresonanzen (siehe Kap. 5.2).

d [mm]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
0	-	-	-
1	1380	0,99	388
3	1250	0,99	336
5	1130	0,98	296
10	960	0,97	248
50	480	0,79	142
100	340	0,70	115
250	200	0,58	96

Tab. 3.2: Ergebnisse für steigenden Wandabstand (Mais, $\sigma=8,7\%$)

FPY

Abb. 3.5 und Abb. 3.6 zeigen ein Beispiel mit relativ geringem Perforationsverhältnis. Der Absorptionsgrad steigt mit wachsendem Wandabstand, während die Resonanzfrequenz sinkt.

In Tab. 3.3 sind die Ergebnisse zu diesem Beispiel angegeben. Vergleicht man die Werte mit jenen aus Tab. 3.1, ist zu erkennen, dass R_0 für FPY für kleine Wandabstände wesentlich höher ist.

d [mm]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ [°]	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
0	730	0,36	3500
1	700	0,42	2898
3	580	0,54	2025
5	500	0,60	1917
10	420	0,68	1555
50	220	0,83	954
100	140	0,86	852
250	100	0,90	762

Tab. 3.3: Ergebnisse für steigenden Wandabstand (FPY, $\sigma=2,2\%$)

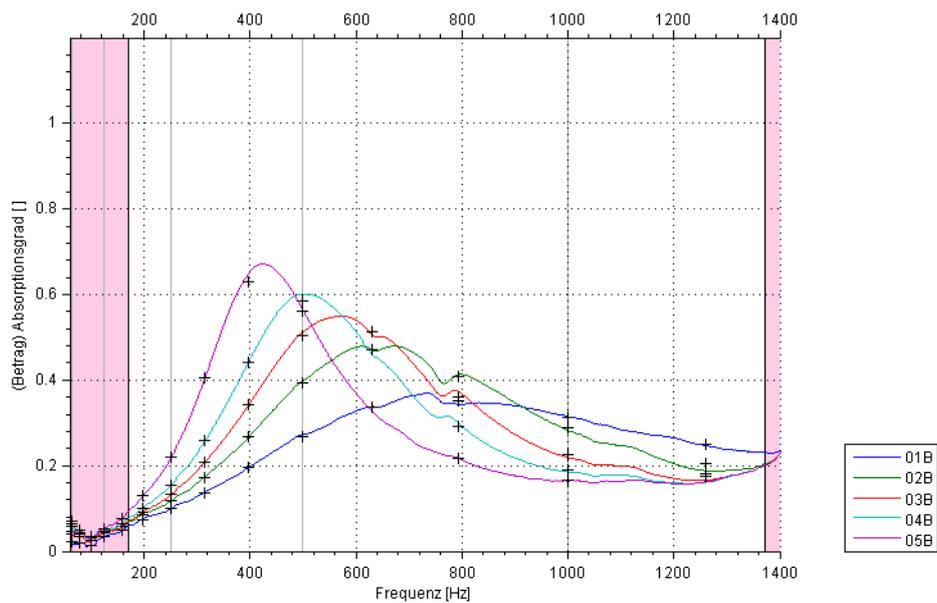


Abb. 3.5: kleine Wandabstände, FPY mit $\sigma=2,2\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	0	1	6	2,2
02B	FPY	1	1	6	2,2
03B	FPY	3	1	6	2,2
04B	FPY	5	1	6	2,2
05B	FPY	10	1	6	2,2

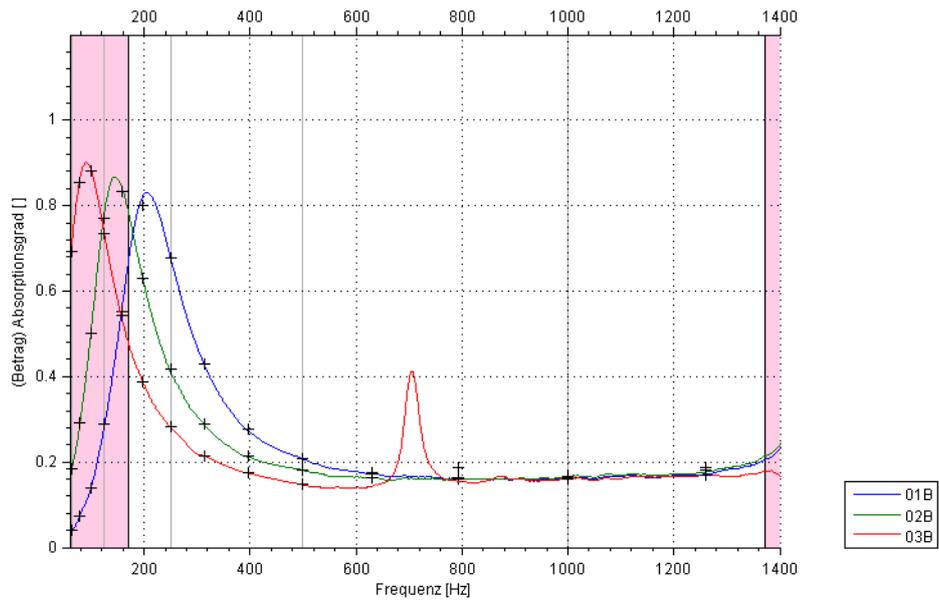


Abb. 3.6: große Wandabstände, FPY mit $\sigma=2,2\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	50	1	6	2,2
02B	FPY	100	1	6	2,2
03B	FPY	250	1	6	2,2

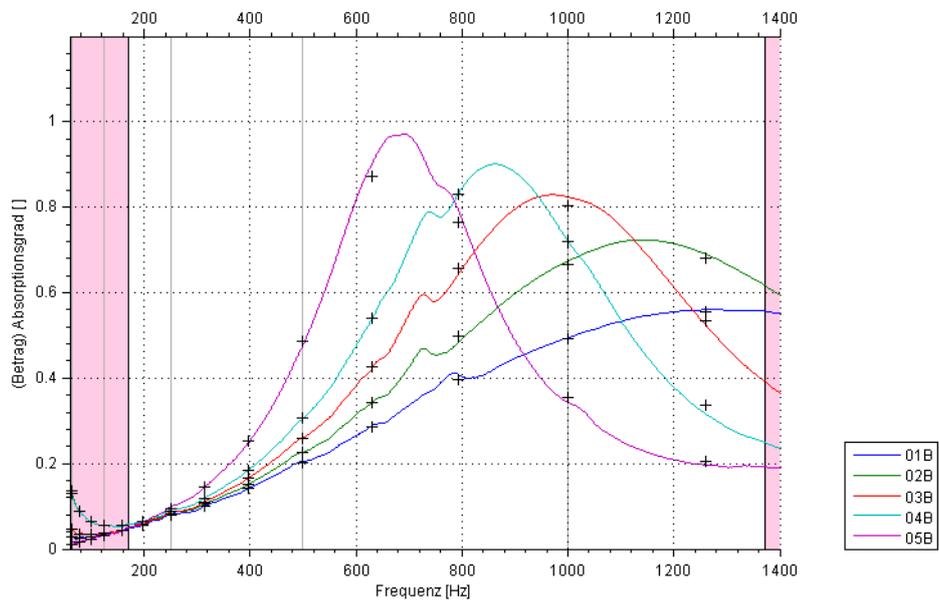


Abb. 3.7: kleine Wandabstände, FPY mit $\sigma=4,9\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	0	1,5	6	4,9
02B	FPY	1	1,5	6	4,9
03B	FPY	3	1,5	6	4,9
04B	FPY	5	1,5	6	4,9
05B	FPY	10	1,5	6	4,9

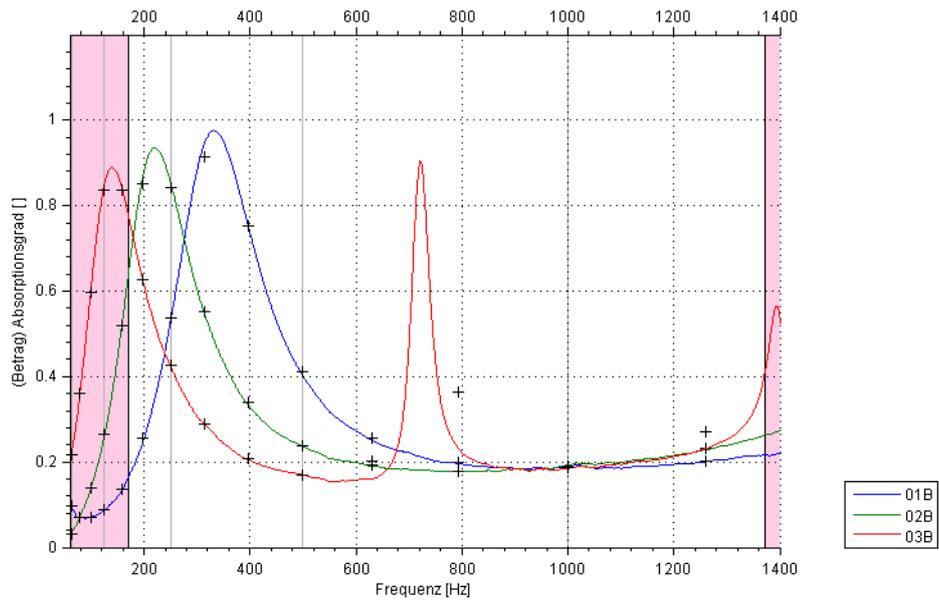


Abb. 3.8: große Wandabstände, FPY mit $\sigma=4,9\%$

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	50	1,5	6	4,9
02B	FPY	100	1,5	6	4,9
03B	FPY	250	1,5	6	4,9

Abb. 3.7 und Abb. 3.8 zeigen auch für dieses Material ein Beispiel mit größerem Perforationsverhältnis ($\sigma=4,9\%$). In Tab. 3.4 sind die Ergebnisse dazu angegeben. Der Absorptionsgrad nähert sich einem Maximum und fällt dann mit weiter sinkendem R_0 wieder ab. Auch bei diesem Material zeigen sich für den Abstand 250mm Rohrresonanzen (siehe Kap. 5.2).

d [mm]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
0	1280	0,57	1980
1	1140	0,72	1582
3	980	0,82	960
5	980	0,86	923
10	700	0,96	555
50	340	0,97	284
100	220	0,93	244
250	140	0,88	195

Tab. 3.4: Ergebnisse für steigenden Wandabstand (FPY $\sigma=4,9\%$)

Wird der Wandabstand als zusätzlicher Konstruktionsparameter herangezogen, ergeben sich bei dessen Steigerung also folgende Tendenzen:

Wandabstand $d \uparrow$ bei $\sigma=2,2\%$			
$f_0 \downarrow$	$R_0 \downarrow$	$\alpha_0 \uparrow$	$\Delta f_H \downarrow$
Wandabstand $d \uparrow$ bei $\sigma=4,9\%$			
$f_0 \downarrow$	$R_0 \downarrow$	$\alpha_0 \uparrow \downarrow$	$\Delta f_H \downarrow$
Wandabstand $d \uparrow$ bei $\sigma=8,7\%$			
$f_0 \downarrow$	$R_0 \downarrow$	$\alpha_0 \downarrow$	$\Delta f_H \downarrow$

Tab. 3.5: Tendenzen der Absorberparameter bei variablem Wandabstand

Der Wandabstand d kann somit als zusätzlicher Dimensionierungsparameter genutzt werden, um den Wirkungsbereich des Absorbers einzustellen.

Für größer werdenden Wandabstand sinkt die Federsteife und somit auch die Resonanzfrequenz [Gl.(1.7)].

Die starke Änderung von α_0 an der Stelle f_0 ist auf den Strömungswiderstand R_0 zurückzuführen, der mit steigendem Wandabstand immer weiter sinkt.

Laterale Federn

Um nun die Auswirkungen der lateralen Federn auf die Messung mit Luftpolster zu untersuchen, wurden für das Beispiel aus Abb. 3.1 bzw. Abb. 3.2 die nach [Gl.(1.11)] berechneten Resonanzfrequenzen ($f_{0,ber}$) mit den gemessenen ($f_{0,gem}$) verglichen. Wie in Tab. 3.6 zu sehen, weichen die Resonanzfrequenzen stark voneinander ab.

Für dieses Messobjekt konnte in Kap. 2.1 eine laterale Feder von ca. 5,1mm berechnet werden. Geht man nun von dem Ansatz aus, dass sich die akustische Feder, die durch den Wandabstand eingestellt wurde, um diesen Anteil der lateralen Federn vergrößert, können über [Gl.(1.11)] wiederum neue Resonanzfrequenzen ($f_{0,(d+dlat)}$) berechnet werden. Vergleicht man nun die gemessenen Resonanzfrequenzen mit den so berechneten Resonanzfrequenzen, ist zu erkennen, dass diese nun sehr ähnlich sind.

d [mm]	σ [%]	$f_{0,ber}$ [Hz]	$f_{0,gem}$ [Hz]	$f_{0,(d+dlat)}$ [Hz]
1	2,2	1861	780	754
3	2,2	1074	680	654
5	2,2	832	580	586
10	2,2	588	460	478
50	2,2	263	230	250
100	2,2	186	160	181
250	2,2	117	100	116

Tab. 3.6: Vergleich der gemessenen und berechneten Resonanzfrequenzen

Ab einem Abstand von 50mm relativiert sich der Einfluss der lateralen Federn zunehmend, da diese relativ zum eingestellten Wandabstand sehr klein werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden verschiedene gelochte Holzplatten hinsichtlich ihres Absorptionsgrades im Impedanzrohr untersucht.

In Kapitel 1.1 wurde kurz auf das Auswahlverfahren und auf die Messobjekte selbst eingegangen.

Es boten sich generell zwei Messverfahren an (Kap. 1.2). Da die Ein-Tormessung den Vorteil der geringeren Messzeit und des einstellbaren Luftpolsters mit sich bringt, wurde diese Methode für die Untersuchungen festgelegt.

Kapitel 2 beschäftigte sich mit dem schallharten Abschluss. In Kap. 2.1 stand der Vergleich der 3 Materialien im Vordergrund. Als geeignetstes Material hat sich die Maisplatte herausgestellt.

In Kapitel 2.2 wurden die Auswirkungen durch Änderungen der Konstruktionsparameter untersucht und die Ergebnisse diskutiert.

In Kapitel 3 wurden die Auswirkungen verschiedener Luftpolster hinter den Messobjekten untersucht und die Ergebnisse diskutiert.

Um die Gültigkeit der Rohrmessungen in Bezug auf reale Möbelstücke besser abschätzen zu können, wären Vergleichsmessungen solcher gelochten Holzplatten im Hallraum sehr interessant.

In einer weiteren Arbeit könnten geeignete Messobjekte gebaut und ebenfalls im Hallraum hinsichtlich Absorption vermessen werden.

.

5 Anhang

5.1 Zwei-Parametervariation bei schallhartem Abschluss

Nach den ersten Beobachtungen zur Ein-Parametervariation soll nun noch gezeigt werden, wie sich die Materialien verhalten, wenn beide Konstruktionsparameter in einem bestimmten Verhältnis zueinander variiert werden ([TA] Kap. 3.2.5). Dabei wurde zuerst das Perforationsverhältnis konstant gehalten und danach versucht den Strömungswiderstand konstant zu halten.

Konstantes Perforationsverhältnis

Ein konstantes Perforationsverhältnis lässt sich erreichen, indem der Lochdurchmesser und der Lochabstand gleichermaßen verändert werden. Die Resonanzfrequenz sollte dabei in etwa gleich bleiben oder sich für größere Lochdurchmesser durch den vergrößerten Massenbelag nur geringfügig verringern. Der Absorptionsgrad sollte sich für größere Lochdurchmesser verringern, da der Strömungswiderstand kleiner wird. Um einen konstanten Strömungswiderstand zu erreichen, müsste der Lochabstand laut der Theorie für Resonanzabsorber bei Verdopplung des Lochdurchmessers vervierfacht werden.

Mais

Abb. 5.1, Abb. 5.2 und Abb. 5.3 zeigen Beispiele für jeweils 3 Messobjekte mit gleichem Perforationsverhältnis aber unterschiedlichem Lochraster. Zusätzlich zum Absorptionsgrad sind auch die Strömungswiderstände und die Resonanzfrequenzen angegeben.

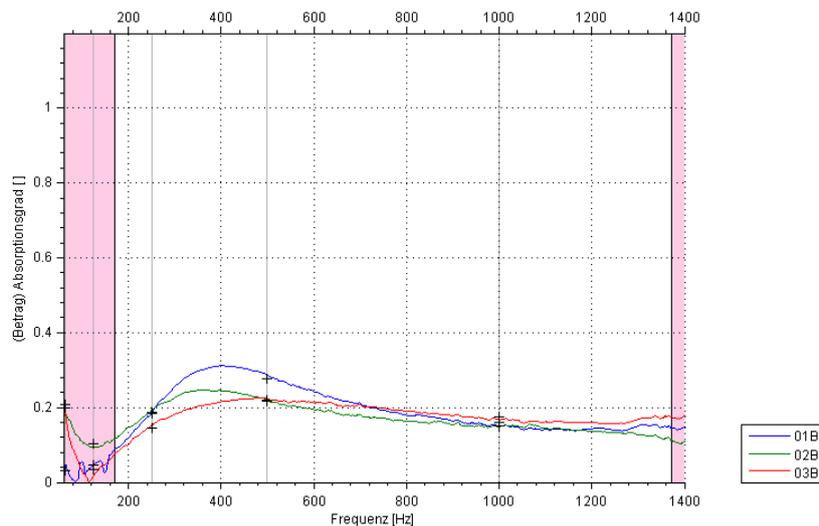


Abb. 5.1: Mais, konstantes Perforationsverhältnis $\sigma=0,5$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	1	12	0,5	400	0,32	4185
02B	Mais	3	36	0,5	340	0,24	5485
03B	Mais	2	24	0,5	500	0,22	6408

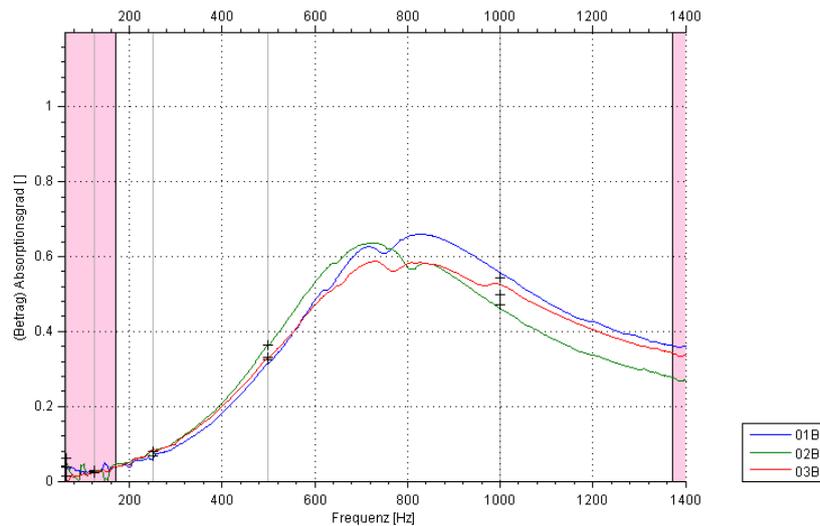


Abb. 5.2: Mais, konstantes Perforationsverhältnis $\sigma=2,2$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	1,0	6	2,2	830	0,66	1500
02B	Mais	1,5	9	2,2	720	0,64	1590
03B	Mais	2,0	12	2,2	800	0,60	1892

Für die ersten beiden Abbildungen ist der Verlauf des Absorptionsgrades noch sehr ähnlich. Eine Auswertung des Strömungswiderstandes für die Messobjekte aus Abb. 5.2 hat gezeigt, dass auch R_0 für alle 3 Funktionen sehr ähnlich ist. Im Vergleich zur Schallkennimpedanz der Luft Z_0 sind alle Messobjekte überangepasst, weshalb der Absorptionsgrad auch an der Resonanzfrequenz deutlich unter 1 liegt.

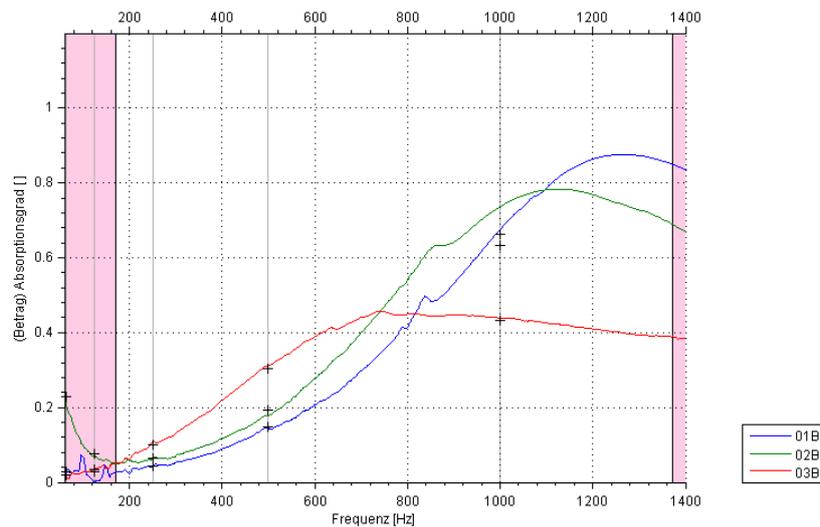


Abb. 5.3: Mais, konstantes Perforationsverhältnis $\sigma=4,9$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	Mais	2,0	8	4,9	1280	0,88	825
02B	Mais	1,5	6	4,9	1120	0,76	1082
03B	Mais	8,0	32	4,9	880	0,44	2556

In Abb. 5.3 hingegen unterscheiden sich die 3 Funktionen trotz gleichem Perforationsverhältnis stark. Vergleicht man die gemessenen Strömungswiderstände, so fällt zunächst auf, dass sich die Funktionen 01B schon dem Bereich der Anpassung an die Schallkennimpedanz der Luft nähert und das lässt sich auch im Absorptionsgrad erkennen, der hier schon ca. 0,9 erreicht. Zudem fällt auf, dass für die Funktion 03B der Strömungswiderstand trotz des großen Lochdurchmessers und des konstanten Perforationsverhältnisses stark angestiegen ist.

FPY

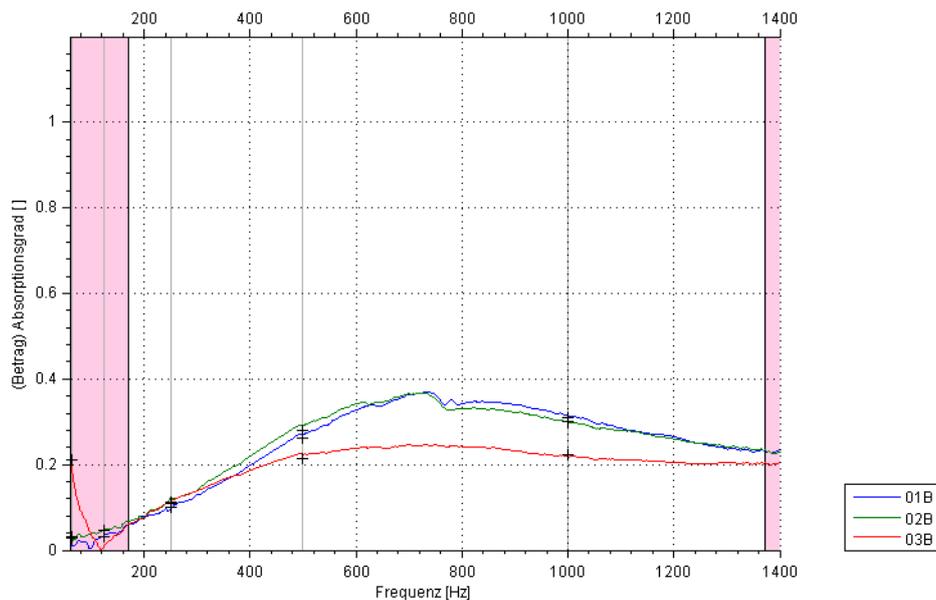


Abb. 5.4: FPY, konstantes Perforationsverhältnis $\sigma=2,2$

Legende

Fkt. Nr.	Material	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]	f_0 [Hz]	$\alpha(f_0)$ []	$R_0(f_0)$ [Ns/m ³]
01B	FPY	1,0	6	2,2	730	0,36	3500
02B	FPY	1,5	9	2,2	740	0,36	3596
03B	FPY	2,0	12	2,2	740	0,26	5680

Für die ersten beiden Messobjekte ist der Absorptionsgradverlauf noch sehr ähnlich, werden $2a$ und e weiter gesteigert, wird der Absorptionsgrad immer niedriger. Während für die ersten beiden Proben R_0 relativ konstant bleibt bzw. nur leicht fällt, steigt er für die dritte Probe stark an. Aus Gl.(1.2) geht hervor, dass der Lochabstand und der Lochdurchmesser R_0 in umgekehrter Proportionalität beeinflussen. Da hier nun R_0 für die Funktion 03B ansteigt, obwohl im Vergleich zu Funktion 01B beide Parameter verdoppelt wurden, scheint hier der Lochabstand mehr Einfluss auf den Strömungswiderstand und somit auf das Absorptionsverhalten zu haben.

Konstanter Strömungswiderstand

Um das Kapitel der Zweiparametervariationen zu komplettieren, wird hier noch kurz ein Beispiel für einen laut der Theorie für Resonanzabsorber konstanten Strömungswiderstand gezeigt. Der Grund, den Strömungswiderstand konstant halten zu wollen, ist auch für größere Löcher den gleichen Absorptionsgrad zu erzielen. Das kann erreicht werden, wenn bei Verdopplung des Lochdurchmessers der Lochabstand vervierfacht wird. Dies gilt allerdings nur für die Annahme „enges Rohr“ oder „enge“ Mündungsöffnung. Eine Abschätzung, ob es sich um ein enges oder weites Rohr handelt, liefern folgende Grenzen ([TA] Kap. 3.2.4.3):

$$\begin{aligned} a &\geq 0,63 \cdot \lambda_\eta && \dots \text{"weites Rohr"} \\ a &\leq 0,63 \cdot \lambda_\eta && \dots \text{"enges Rohr"} \end{aligned}$$

Wobei λ_η der Zähigkeitswellenlänge der Luft entspricht ([TA] Kap. 1.1.1.1). Die Grenze ist somit abhängig vom Lochdurchmesser und von der Frequenz. Tab. 5.1 zeigt die Zähigkeitswellenlängen für den betrachteten Frequenzbereich.

f [Hz]	λ_η [mm]	f [Hz]	λ_η [mm]
50	2,0	700	0,6
80	1,6	800	0,5
100	1,4	900	0,5
200	1,0	1000	0,5
300	0,8	1100	0,4
400	0,7	1200	0,4
500	0,6	1300	0,4
600	0,6	1400	0,4

Tab. 5.1: Zähigkeitswellenlänge in Abhängigkeit der Frequenz

Die Annahme „enges“ Rohr gilt somit nur für Lochdurchmesser kleiner 1mm, und das auch nur für Frequenzen unterhalb 300Hz. Deshalb kann für die Messobjekte laut Theorie kein konstanter Strömungswiderstand erreicht werden. Dazu ein Beispiel für die Maisplatte.

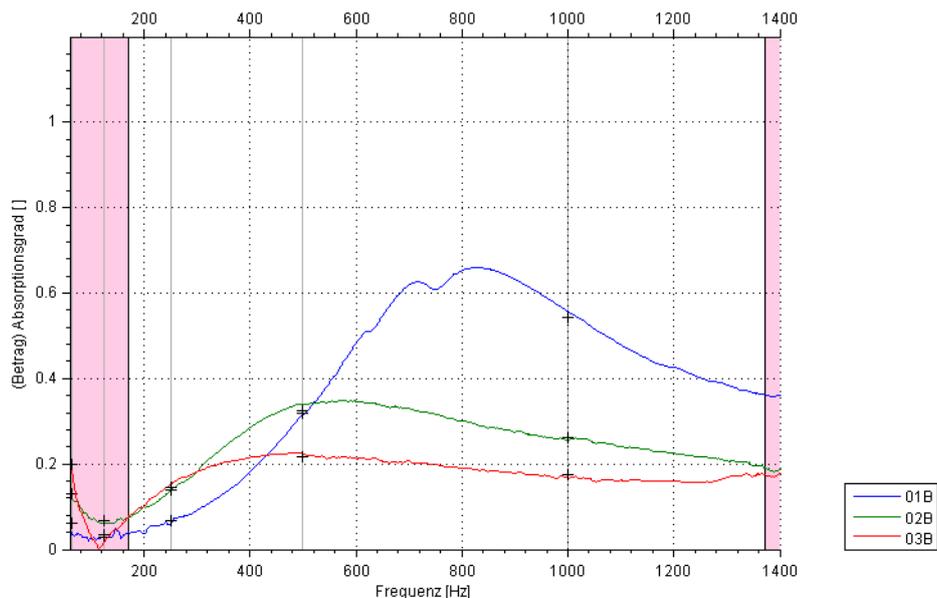


Abb. 5.5: Mais, mit theoretisch konstantem Strömungswiderstand

Legende

Fkt. Nr.	Material	2a [mm]	e [mm]	σ [%]	f ₀ [Hz]	α(f ₀) []	R ₀ (f ₀) [Ns/m ³]
01B	Mais	1,0	6	2,2	830	0,66	1500
02B	Mais	1,5	12	1,2	580	0,34	3718
03B	Mais	2,0	24	0,5	480	0,22	6130

Durch den Herstellungsprozess war der Lochdurchmesser beschränkt und die Bedingung für „enge“ Rohre wird erst unter 80Hz für alle 3 Messobjekte erfüllt. Auch in der Messung kann kein konstanter Strömungswiderstand bzw. konstanter Absorptionsgrad erreicht werden. Vielmehr steigt R_0 immer weiter an.

Diese Form der Zweiparametervariation wurde nicht weiter untersucht, da die Bedingung für „enges Rohr“ nur für einige wenige Messobjekte in einem kleinen Frequenzbereich erfüllt ist.

Werden beide Konstruktionsparameter gleichermaßen verändert, ergeben sich bei schallhartem Rohrabschluss folgende Tendenzen der Absorberparameter:

Lochabstand e und Lochabstand $2a$ werden gleichermaßen erhöht

$\sigma \leq 2,2\%$	$f_0 \approx$	$R_0 \approx$	$m \approx$	$\sigma =$	$\alpha_0 \approx$
$\sigma > 2,2\%$	$f_0 \downarrow$	$R_0 \uparrow$	$m \uparrow$	$\sigma =$	$\alpha_0 \downarrow$

Tab. 5.2: Absorberparameter wenn beide Konstruktionsparameter gleichermaßen erhöht werden

Hier ändert sich somit das Verhalten des Materials für größere Perforationsverhältnisse.

Wird hingegen der Lochabstand stärker gesteigert als der Lochdurchmesser, ergeben sich bei schallhartem Rohrabschluss folgende Tendenzen der Absorberparameter.

Lochabstand e wird stärker erhöht als der Lochabstand $2a$

$f_0 \downarrow$	$R_0 \uparrow$	$m \uparrow$	$\sigma \downarrow$	$\alpha_0 \downarrow$
------------------	----------------	--------------	---------------------	-----------------------

Das Perforationsverhältnis wird kleiner und der Massenbelag und der Strömungswiderstand größer. Das hat zur Folge, dass f_0 und α_0 sinken.

5.2 Rohr-Eigenfrequenzen

In Kapitel 3 wurde gezeigt, dass in den Messergebnissen für einen Wandabstand von 250mm zusätzliche Resonanzen auftauchen. Genauere Untersuchungen haben ergeben, dass es sich hier um Rohrresonanzen handelt. Aufgrund der geometrischen Abmessungen und dem näherungsweise schallharten Abschluss am Anfang und am Ende des Rohres ($\lambda/2$ -Resonator), ergeben sich bestimmte diskrete Eigenfrequenzen, die berechnet werden können.

Berechnung der Eigenfrequenzen

Das Rohr ist so konzipiert, dass es innerhalb des Messfrequenzbereiches nur zu ebener Schallausbreitung entlang der Längsachse des Rohres kommt. Hinter dem Prüfling ergibt sich wegen der geometrischen Abmessungen des Rohres als größtmöglicher Luftpolster ein Abstand von 546mm. Dafür lassen sich die ersten vier axialen Eigenmoden in x-Richtung über folgende Beziehung berechnen:

$$f_x = \frac{n \cdot c}{2 \cdot l_x} \quad n = 1, 2, \dots \quad (5.1)$$

Das ergibt für die ersten 4 axialen Eigenmoden:

Moden Nr.	c [m/s]	l_x [mm]	f_x [Hz]
1	346,5	546	317
2	346,5	546	635
3	346,5	546	952
4	346,5	546	1269

Tab. 5.3: Berechnete Eigenfrequenzen für das Messsystem bei einem Luftpolster von 546mm

Wird nun eine dieser Eigenfrequenzen angeregt, gerät das System in Resonanz. Da die Messungen mit breitbandigem Rauschen erfolgen, werden alle Resonanzfrequenzen angeregt. Ist zusätzlich der Abstand hinter dem Prüfling genügend groß, bilden sich die zu der jeweiligen Eigenfrequenz gehörigen axialen Rohr-Moden aus.

Messung der Rohr-Moden

Um die Messung der ersten 4 Rohr-Moden zu ermöglichen, wurde das Messrohr um ein Zwischenstück erweitert. So kann ein Luftpolster von 546mm eingestellt werden. Für die Maisplatte und die herkömmliche Spanplatte wurden so die Rohr-Moden für jeweils 4 Abstände gemessen.

Abb. 5.6 zeigt das Ergebnis für die Maisplatte. Dabei wurde der Abstand jeweils durch n geteilt ($n=1, 2, 3, 4$).

Für den größten Abstand von 546mm sind 4 Resonanzen zu erkennen, die gut mit den berechneten Eigenfrequenzen zusammen passen. Die leichten Abweichungen lassen sich durch den nicht ideal schallharten Abschluss durch die Lautsprechermembran und Ungenauigkeiten im Messaufbau (Abstandseinstellung) erklären. Die Helmholtz-Resonanzfrequenz des Absorbers liegt hier bereits außerhalb des gültigen Mess-Frequenzbereichs.

Auch für die anderen Wandabstände lassen sich über Gl.(5.1) die Eigenfrequenzen berechnen (Tab. 5.4). Im Vergleich mit Abb. 5.6 zeigt sich wiederum, dass die berechneten Eigenfrequenzen mit den gemessenen Resonanzfrequenzen gut übereinstimmen.

Beim Messen solcher Absorber werden somit bei großen Wandabständen auch Resonanzen des angekoppelten Rohrresonators mit gemessen. Im System kommt es zu einer Impedanz Transformation, die ein Druckmaximum an der Rückseite des Absorbers erzwingt. Dadurch steigen die Wandimpedanz und der Strömungswiderstand R_0 an der Vorderseite des Absorbers. Da FPY generell schlechter an die Schallkennimpedanz der Luft Z_0 angepasst ist, ist hier der Absorptionsgrad an den Resonanzen deshalb auch weniger hoch als für die Maisplatte (vgl. Abb. 5.6 und Abb. 5.7).

Für die Messungen solcher Materialien sollten somit Wandabstände größer als 133mm vermieden werden, da die so angeregten Eigenfrequenzen des Rohr-Resonators bereits außerhalb des Messbereiches liegen (vgl. Tab. 5.4).

Moden Nr.	c [m/s]	l_x [mm]	f_x [Hz]
1	346,5	273	635
2	346,5	273	1269
1	346,5	182	952
1	346,5	136	1273

Tab. 5.4: Berechnete Eigenfrequenzen für 3 Wandabstände; Mais

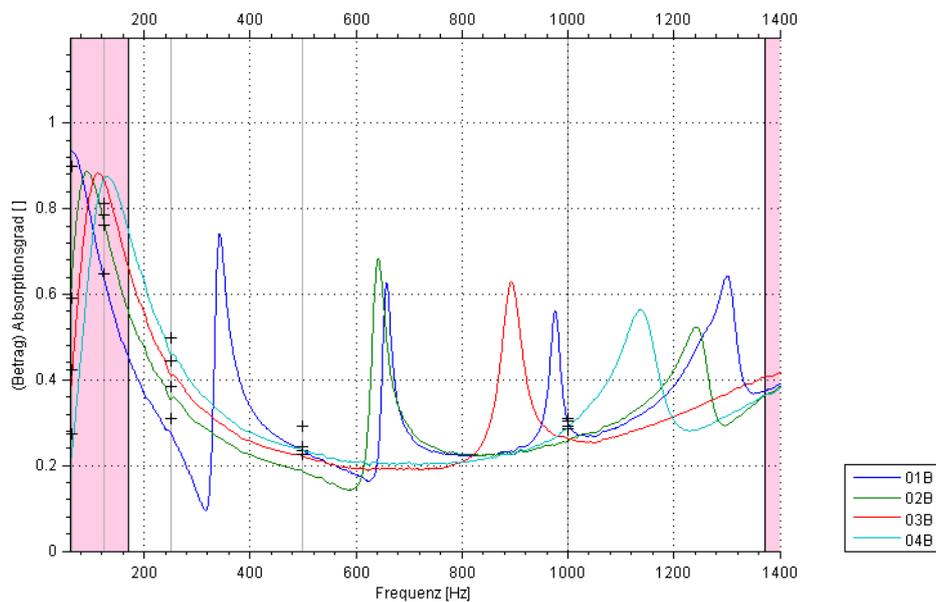


Abb. 5.6: Rohr-Resonanzfrequenzen für 4 Wandabstände; Mais

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	546	1	6	2,2
02B	Mais	273	1	6	2,2
03B	Mais	182	1	6	2,2
04B	Mais	136	1	6	2,2

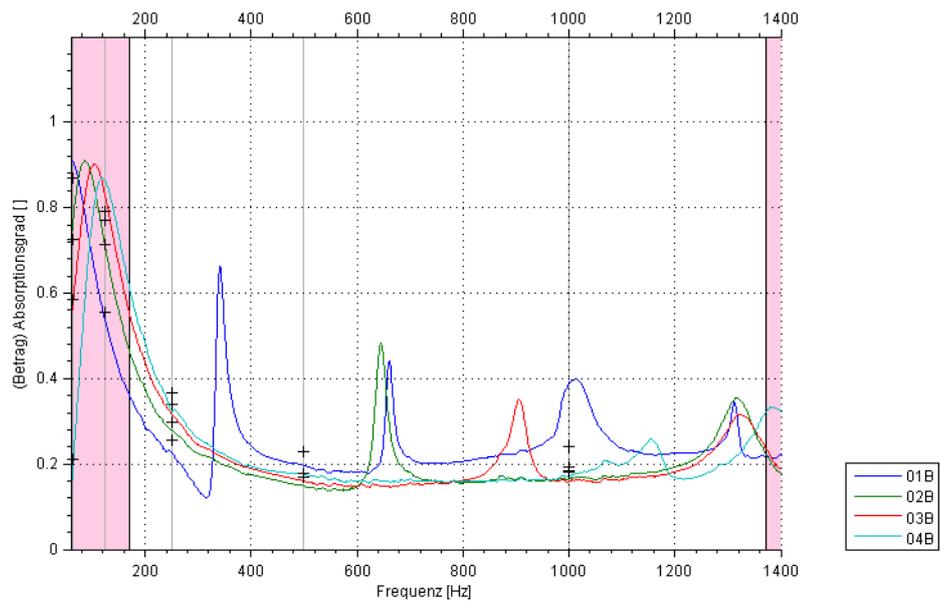


Abb. 5.7: Rohr-Resonanzfrequenzen für 4 Wandabstände; FPY

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	546	1	6	2,2
02B	FPY	273	1	6	2,2
03B	FPY	182	1	6	2,2
04B	FPY	136	1	6	2,2

5.3 Ein-Tormessung vs. Zwei-Tormessung

Abb. 5.8 zeigt dasselbe Messobjekt wie in Abb. 3.1 und Abb. 3.2 wenn es mit der Zwei-Tormessung geprüft wurde. Die Luftpolster wurden hier mit Hilfe der Software simuliert ([DENDA] Kap. 3). Die gemessenen und die simulierten Absorptionsgrade stimmen sehr gut überein.

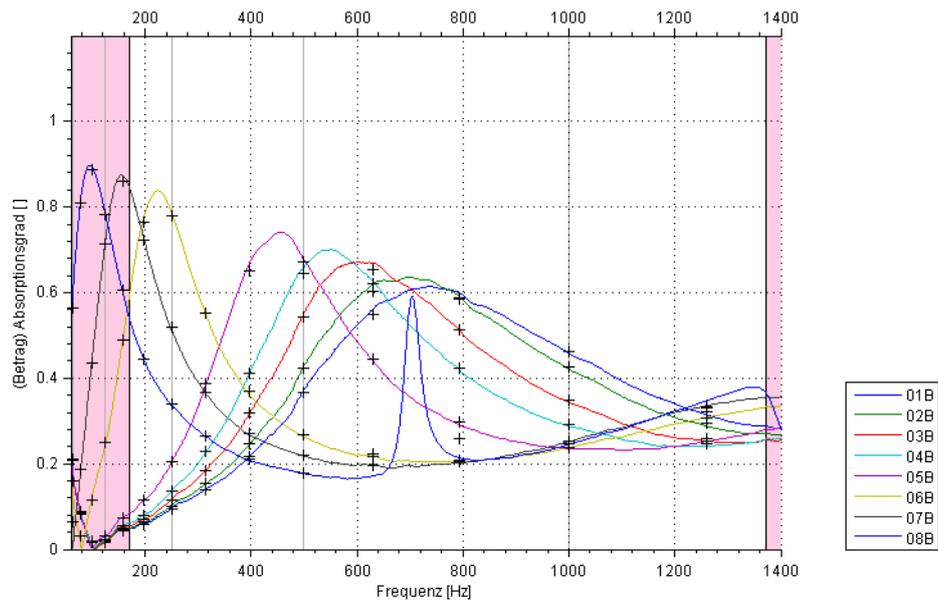


Abb. 5.8: Mais mit verschiedenen simulierten Luftpolstern

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	0	1	6	2,2
02B	Mais	1	1	6	2,2
03B	Mais	3	1	6	2,2
04B	Mais	5	1	6	2,2
05B	Mais	10	1	6	2,2
06B	Mais	50	1	6	2,2
07B	Mais	100	1	6	2,2
08B	Mais	250	1	6	2,2

Simulierte Kurven zum Vergleich mit Abb. 3.7 und Abb. 3.8 finden sich in Abb. 5.9. Auch hier ist gut zu erkennen, dass Simulation und Messung übereinstimmen.

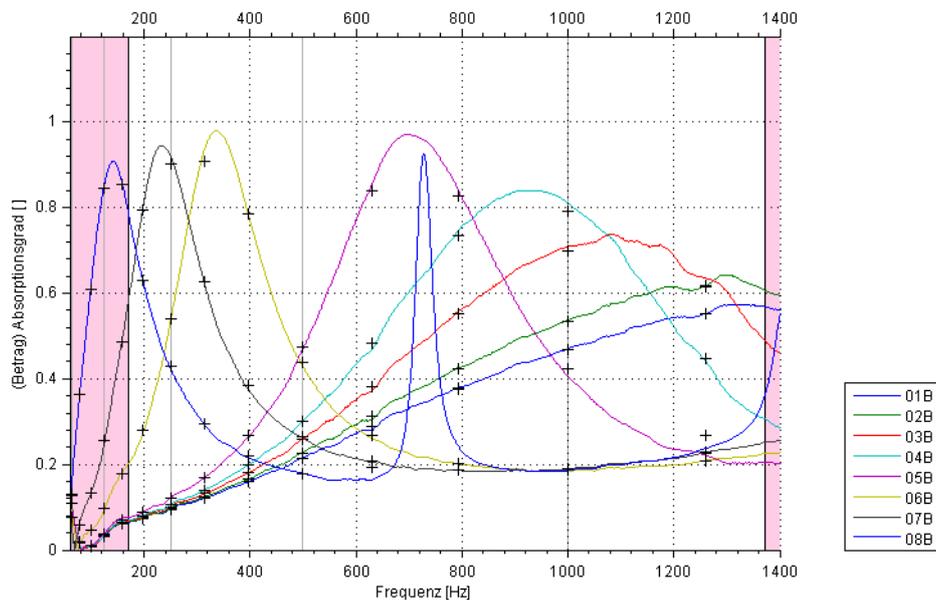


Abb. 5.9: FPY mit verschiedenen simulierten Luftpolstern

Legende

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	FPY	0	1,5	6	4,9
02B	FPY	1	1,5	6	4,9
03B	FPY	3	1,5	6	4,9
04B	FPY	5	1,5	6	4,9
05B	FPY	10	1,5	6	4,9
06B	FPY	50	1,5	6	4,9
07B	FPY	100	1,5	6	4,9
08B	FPY	250	1,5	6	4,9

Als abschließendes Beispiel wurde in Abb. 5.11 noch versucht die Resonanzfrequenzen des Messsystems zu simulieren. Dabei wurde dasselbe Messobjekt wie in Abb. 5.6 mit der 4-Mikrofonmethode gemessen und dann die 4 Wandabstände laut Tab. 5.5 simuliert.

Fkt. Nr.	Material	d [mm]	$2a$ [mm]	e [mm]	σ [%]
01B	Mais	546	1	6	2,2
02B	Mais	273	1	6	2,2
03B	Mais	182	1	6	2,2
04B	Mais	136	1	6	2,2

Tab. 5.5: Wandabstände für Rohr-Moden

Hier weicht das gemessene Ergebnis vom simulierten für einige Resonanzstellen ab. Diese Abweichungen sind aber wohl auf Ungenauigkeiten im Messaufbau zurückzuführen.

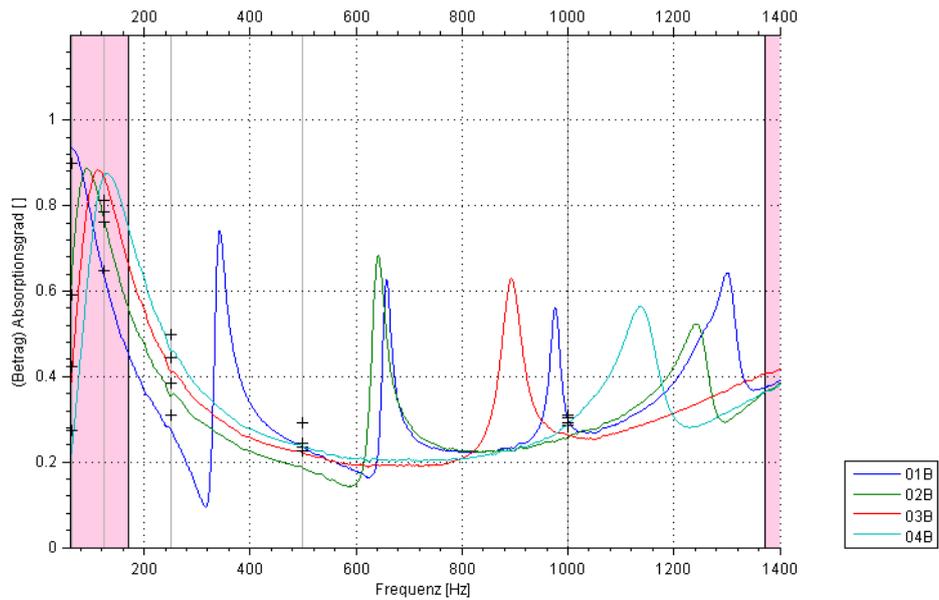


Abb. 5.10: gemessene Rohr-Moden für 4 Wandabstände

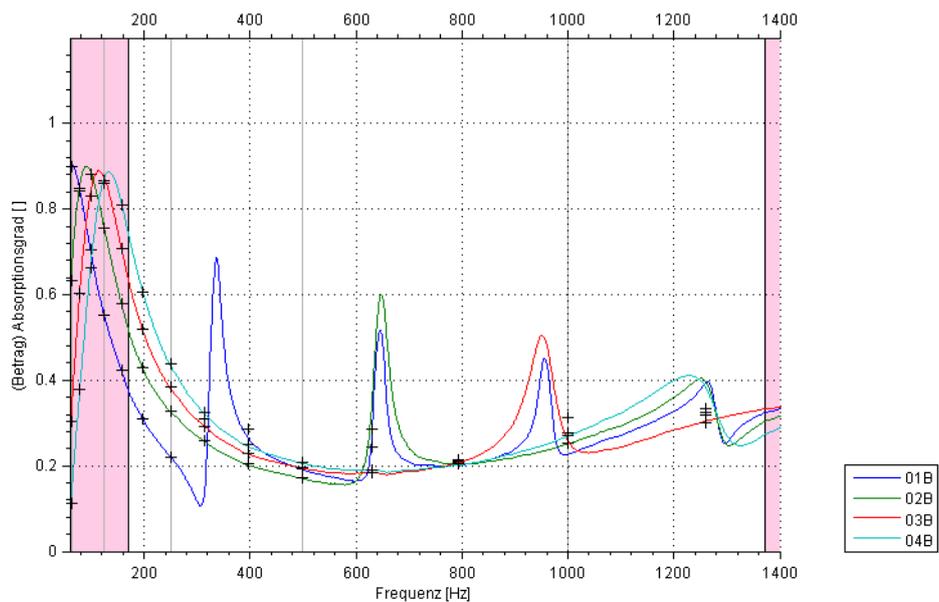


Abb. 5.11: simulierte Rohr-Moden für 4 Wandabstände

Generell konnte festgestellt werden, dass Messung und Simulation auch für diese Messobjekte übereinstimmen. Wird somit die Zwei-Tormessung verwendet, kann die Simulation für die Dimensionierung der Messobjekte herangezogen werden.