

# Helmholtzresonatoren

## Bachelorarbeit

durchgeführt von

**Sebastian Braun**

Institut für Breitbandkommunikation  
der Technischen Universität Graz

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

Begutachter/Betreuer: Prof. Dipl.-Ing. Dr. Gerhard Graber

Graz im September 2009



# Zusammenfassung

In dieser Arbeit werden Helmholtzresonatoren in Theorie und Praxis untersucht und verglichen. Es wurden Resonatoren mit verschiedenen Parametern aufgebaut und im Impedanzrohr nach ISO 10534-2 (Übertragungsfunktionsmethode) gemessen. Aus den erhaltenen Messergebnissen, die in Form des frequenzabhängigen Absorptionsgrads und der akustischen Impedanz vorlagen, wurden Resonanzfrequenz und Güte bestimmt.

Nach Darlegung der Theorie und Erläuterung der Messvorgänge werden die Ergebnisse diskutiert. Der Schwerpunkt liegt hier auf dem Vergleich der Messergebnisse mit den Berechnungsformeln, für die nur die Resonatorabmessungen und Umgebungsvariablen nötig sind. Dabei wurden systematische Abweichungen gefunden, die durch eine modifizierte Berechnungsmethode für die Mündungskorrektur behoben wurden.

Aus den Messergebnissen der Resonanzgüte der akustischen Impedanz und des Absorptionsgrads wurden grobe Näherungsformeln abgeleitet. Außerdem konnte daraus der akustische Reibwiderstand im Resonator errechnet, sowie nützliche Dimensionierungsrichtlinien für eine exakte Abstimmung des Resonators erstellt werden.

## Abstract

In the present thesis Helmholtz resonators are studied and evaluated in theory and practice. Several resonators with varying parameters were built and measured in the impedance tube according to ISO 10534-2 (transfer-function method). The resonance frequency and the quality factor were determined from the obtained measuring results, which were available as absorption coefficient and acoustic impedance.

After presentation of theory and description of the measurement process the results are discussed. The main focus concerns the comparison of the measurement results with the computing formulas, which depend only on the resonator's dimensions and environment variables. There were found some systematic deviations, which could be corrected by a modified computing method for the mouth correction.

From the measurement results of the resonance quality of the acoustical impedance and the absorption coefficient approximative formulas were developed. Further conclusions on the acoustical frictional resistance in the resonator and useful dimensioning guidelines for an exact tuning of the resonator could be derived.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1. Allgemeines . . . . .	1
1.2. Aufgabenstellung . . . . .	1
1.2.1. Ursprüngliche Ziele . . . . .	1
1.2.2. Veränderte Aufgabenstellung . . . . .	2
<b>2. Theoretische Grundlagen</b>	<b>3</b>
2.1. Prinzip des Helmholtzresonators . . . . .	3
2.1.1. Herleitung . . . . .	3
2.1.2. Resonanzfrequenz und Mündungskorrektur . . . . .	4
2.1.3. Halbwertsbreite . . . . .	5
2.2. Das Impedanzrohr . . . . .	5
2.2.1. Funktionsweise des Impedanzrohrs . . . . .	5
2.2.2. Aufbau und Details des verwendeten Messrohres . . . . .	8
2.2.3. Anwendung des Impedanzrohrs auf die Messung von Helmholtzresonatoren . . . . .	11
<b>3. Messungen an Helmholtzresonatoren</b>	<b>13</b>
3.1. Fertigung der Messproben . . . . .	13
3.2. Kalibrierung des Impedanzrohrs . . . . .	15
3.3. Beschreibung des Messvorgangs . . . . .	15
3.3.1. Einbau der Proben . . . . .	15
3.3.2. Messvorgang . . . . .	16
3.3.3. Erstellung von Messreihen . . . . .	16
<b>4. Diskussion der Messergebnisse</b>	<b>19</b>
4.1. Allgemein . . . . .	19
4.2. Analyse der Mündungskorrektur . . . . .	21
4.3. Einfluss der Volumenrückwand . . . . .	25
4.3.1. Messung mit verkleinertem Volumen . . . . .	26
4.4. Auswertung der Resonanzgüte . . . . .	27
4.4.1. Halbwertsbreite des Resonanzkreises . . . . .	27
4.4.2. Halbwertsbreite des Absorptionsgrads . . . . .	32
4.5. Akustischer Reibwiderstand . . . . .	34
4.5.1. Einfluss der Volumenparameter . . . . .	37
4.5.2. Einfluss der Halsparameter . . . . .	37

4.5.3. Maximaler Absorptionsgrad . . . . .	37
4.6. Zusammenfassung der neuen Erkenntnisse . . . . .	38
<b>5. Schluss</b>	<b>39</b>
5.1. Relevanz der Ergebnisse für die Praxis . . . . .	39
5.2. Ausblick . . . . .	39
<b>A. Messprotokolle</b>	<b>43</b>
A.1. Messdaten in Tabellen . . . . .	43
A.1.1. Volumen mit vollem Rohrdurchmesser . . . . .	43
A.1.2. Volumen mit verkleinertem Durchmesser . . . . .	48
A.2. Messdiagramme . . . . .	51
A.2.1. Volumen mit vollem Rohrdurchmesser . . . . .	51
A.2.2. Volumen mit verkleinertem Durchmesser . . . . .	54
<b>B. Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>57</b>

## Vorwort

Ich möchte mich bei meinen Eltern für die volle Unterstützung während meines Studiums bedanken und ihnen diese Arbeit widmen.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. Graber für die Hilfestellungen und Ideen bei der Planung, der Durchführung der Messungen und der Betreuung beim Erstellen der schriftlichen Arbeit.

Außerdem danke ich Herrn Wolfgang Truppe für die Hilfsbereitschaft bei allen auftretenden Problemen mit dem Messrohr, Herrn Peter Nesswald für die Bohrung der Löcher und Herrn Johann Kiefer für das Drehen der Rundscheiben.



# 1. Einleitung

## 1.1. Allgemeines

Helmholtzresonatoren spielen in der Akustik eine wichtige Rolle. Sie sind ein elementarer Bestandteil in vielen alltäglichen Dingen. Seit der deutsche Physiker *Hermann von Helmholtz* (\* 31. August 1821 in Potsdam; † 8. September 1894 in Charlottenburg) [11] das Prinzip des Helmholtzresonators entdeckt hat, hat dieses mittlerweile in zahlreichen Gebieten Anwendung gefunden. So z. B. als akustischer Absorber zur gezielten Bedämpfung von Raummoden, in Bassreflex-Systemen bei Lautsprechern oder auch zur Leistungssteigerung in Automotoren (z. B. Porsche, BMW) durch Resonanzaufladung (Drehmomentüberhöhung, weitere Informationen in [12]).

## 1.2. Aufgabenstellung

### 1.2.1. Ursprüngliche Ziele

Die ursprüngliche Aufgabenstellung war sehr umfassend und sollte darin bestehen, verschiedene Resonatoren aufzubauen und im Impedanzrohr zu messen. Dabei sollte zunächst einmal die Auswirkung der Veränderung der 3 variablen Parameter des Resonators (Volumen, Halslänge, Halsradius) auf die Resonanzfrequenz und die Güte nachvollzogen werden. Weiterhin sollte mit der Beschaffenheit der Oberfläche des Halses experimentiert werden. Dabei waren die Ideen, Resonatoren mit gleichen Abmessungen zu vergleichen, deren Halsoberfläche z. B.

- glatt aus Aluminium,
- aus leicht poröser Oberfläche (Spanplatte, Auskleidung mit Filz),
- rau bzw. uneben (mit eingebohrtem Gewinde)

ausgeführt wird. Durch die Variation nur eines einzigen Parameters, des Luftwiderstandes an der Halsoberfläche, sollten Effekte der Zähigkeitswelle an Oberflächen untersucht werden. Der akustische Reibwiderstand könnte auch verändert werden, indem man ein Akustik-Vlies vor die Mündungsöffnung spannt. Die Bedämpfung des Resonators kann zudem durch Ausfüllen des Volumens mit Dämmmaterial verändert werden.

Ein weiterer Punkt sollte die Untersuchung bei Verwendung mehrerer Halsöffnungen sein, ob sich die Berechnungen exakt auf zwei, drei oder vier Öffnungen anwenden lassen, oder ob etwa nur ein gewisses hinter der Öffnung liegendes Volumen als Federelement zu berücksichtigen ist.

Da schon während der ersten Messungen unerwartet Unterschiede zwischen berechneter und gemessener Resonanzfrequenz erkennbar waren, wurde die Aufgabenstellung abgeändert.

### **1.2.2. Veränderte Aufgabenstellung**

In der Arbeit sollen die Abweichung zwischen den Berechnungsformeln von Resonanzfrequenz und Güte des Helmholtzresonators und den Messergebnissen im Impedanzrohr untersucht werden. Es soll untersucht werden, ob in den Abweichungen eine Systematik erkennbar ist, die sich durch eine Modifikation der Berechnungsformeln beheben lässt. Aus der Resonanzgüte ist der akustische Reibwiderstand der Wandoberfläche des Resonators zu errechnen und zu evaluieren.

## 2. Theoretische Grundlagen

Um eine Einführung in die zum Verständnis nötigen Grundlagen zu geben, wird in diesem Kapitel auf das Prinzip des Helmholtzresonators und folgend auf die Theorie des verwendeten Messsystems eingegangen.

### 2.1. Prinzip des Helmholtzresonators

#### 2.1.1. Herleitung

Dem physikalischen Prinzip des Helmholtzresonators liegt ein schwingungsfähiges akustisches Masse-Feder-System zu Grunde. Ein in einem Gehäuse eingeschlossenes Volumen bildet die akustische Feder, beschrieben durch die akustische Steifigkeit  $s_a$ <sup>1</sup>, bzw. deren Kehrwert, die akustische Nachgiebigkeit  $C_a$  (engl. „*compliance*“). Das Gehäuse besitzt eine als Hals bezeichnete kanalförmige Öffnung, in der eine akustische Masse  $m_a$  schwingt. Dieser Luftpfropfen in der Öffnung wird durch Schall zum Schwingen angeregt und federt auf dem dahinterliegenden Volumen, das die akustische Feder darstellt. Wie jedes physikalische schwingungsfähige System hat auch der Helmholtzresonator eine Resonanzfrequenz, bei der seine Effektivität maximal ist. Durch bewusste Wahl der Werte der Steifigkeit und der schwingenden Masse kann man den Resonator auf eine bestimmte Frequenz abstimmen. Benötigt werden dazu nur folgende drei Parameter:

- das Gehäusevolumen  $V$
- der Radius  $r_H$  des Halses
- die Halslänge  $l_H$

Die akustische Masse des Luftpfropfens ist beschrieben durch ([6], S. 115 ff.)

$$m_{a,H} = \frac{\rho \cdot l_H}{A_H} \quad (2.1)$$

und die akustische Steifigkeit des dahinter liegenden Luftvolumens mit

$$s_{a,H} = \frac{\rho \cdot c^2}{V} \quad (2.2)$$

---

<sup>1</sup>Eine Liste der verwendeten Formelzeichen und Abkürzungen findet sich im Anhang B, S. 57

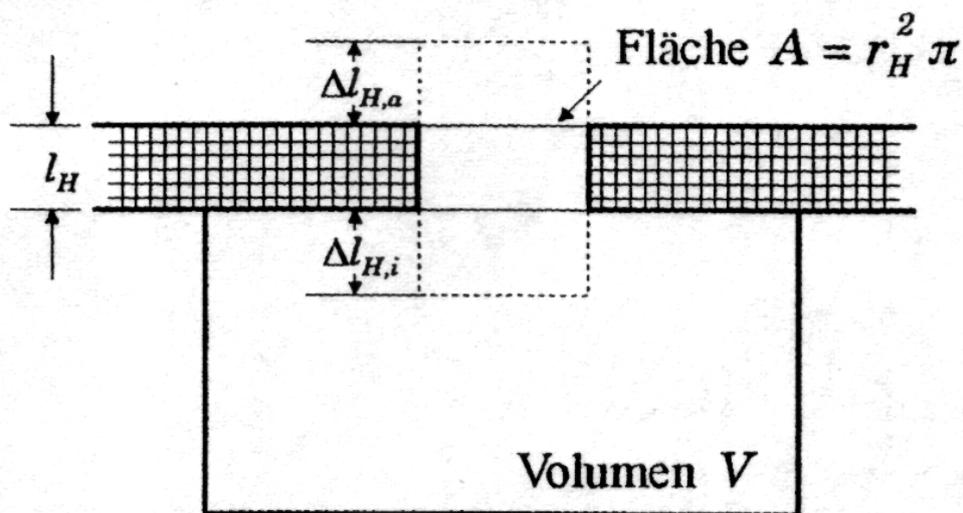


Abb. 2.1.: Querschnitt eines Helmholtzresonators

Damit der Luftpfropfen als kompakte inkompressible Masse angenommen werden kann, müssen die Abmessungen des Halses klein gegenüber der Wellenlänge sein:

$$l_{H,eff} \leq \frac{\lambda}{16} \quad (2.3)$$

### 2.1.2. Resonanzfrequenz und Mündungskorrektur

Da die schwingende Luftmasse nicht exakt dem Volumen der Halsöffnung entspricht, sondern etwas größer ist, muss eine Mündungskorrektur eingeführt werden. Aus dieser ergibt sich die effektive Halslänge  $l_{H,eff}$ . In der Literatur finden sich unterschiedliche Angaben zur Mündungskorrektur, da diese nur experimentell zu bestimmen ist.

Die Gemeinsamkeit ist, dass die Mündungskorrektur  $\Delta l_H$  nur vom Halsradius abhängt. Es wird angenommen, dass die Korrektur auf der Innen- und Außenseite des Halses gleich groß ist.

$$\Delta l_H = k_c \cdot r_H \quad (2.4)$$

$$l_{H,eff} = l_H + 2\Delta l_H \quad (2.5)$$

wobei  $k_c$  ein konstanter Wert ist. In älterer Literatur [1] findet sich der Wert  $k_c = 0,8$ , in aktueller Literatur [3, 6] meistens  $k_c = 0,85$ . Manchmal ist auch  $k_c = \frac{\pi}{2} = 1,57$  zu finden [13]. [2] unterscheidet zwischen hervorstehendem Rohr  $k_c = 0,85$  und geflanschem Rohr  $k_c = 0,615$ .

Die Resonanzfrequenz ergibt sich durch Einsetzen von (2.1) und (2.2) in folgende Gleichung

$$\omega_H = \sqrt{\frac{s_{a,H}}{m_{a,H}}}$$

$$f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s_{a,H}}{m_{a,H}}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\rho \cdot c^2}{V} \frac{A_H}{\rho \cdot l_{H,eff}}}$$

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{A_H}{V l_{H,eff}}}; \quad l_{H,eff} = l_H + 2\Delta l_H$$

(2.6)

### 2.1.3. Halbwertsbreite

Die Resonanzgüte des Helmholtz-Resonators ergibt sich zu

$$Q_H = \frac{X_0}{R} = \frac{\omega_H m_{a,H}}{\Re_{a,H}^*} = \frac{\sqrt{m_{a,H} s_{a,H}}}{\Re_{a,H}^*} = \frac{\rho \cdot c}{\Re_{a,H}^*} \sqrt{\frac{l_{H,eff}}{A_H V}}$$
(2.7)

Der akustische Reibwiderstand  $\Re_{a,H}^*$  setzt sich aus dem Realteil der Strahlungsimpedanz und aus Reibungsverlusten im Hals und Volumen zusammen. Wie in [6, S. 117] gibt es eine Näherung für  $Q_H$ , bei der die Reibungsverluste vernachlässigt werden und nur eine Belastung durch den Realteil der Strahlungsimpedanz angenommen wird. Hierbei muss  $k_H r_H \ll 1$  gelten. Der Realteil der Strahlungsimpedanz ergibt sich zu

$$\Re_{a,H,A} \approx \Re_{a,H,I} \approx \Re_{a,uS} \approx \frac{2\pi \cdot \rho}{c} \cdot f^2$$
(2.8)

Damit ist die Güte

$$Q_H \approx 2\pi \sqrt{V_H \left( \frac{l_{H,eff}}{A_H} \right)^3} = \frac{2\pi}{k_H^3 V}$$
(2.9)

## 2.2. Das Impedanzrohr

Als Messsystem, mit dem die Resonanzfrequenz und die Güte der Resonatoren gemessen wurden, wurde ein Impedanzrohr verwendet. Folgend wird die zugehörige Theorie und die Messmethode erläutert.

### 2.2.1. Funktionsweise des Impedanzrohrs

Es gibt zwei Methoden, nach denen akustische Materialparameter im Impedanzrohr gemessen werden können: Die Stehwellenmethode nach EN ISO 10534-1 und die Übertragungsfunktionsmethode nach EN ISO 10534-2. Da die zweite wesentliche Vorteile gegenüber der ersten im Bezug auf Messdauer und beschränkende Rohrabmessungen aufweist

und diese auch im verwendeten Messrohr implementiert ist, wird auf die Stehwellenmethode hier nicht weiter eingegangen.

## Übertragungsfunktionsmethode

Bei der Übertragungsfunktionsmethode wird ein Lautsprecher, der am Ende des Rohres sitzt, mit breitbandigem weißen Rauschen beschickt. Am anderen Ende wird die Messprobe vor einer schallharten Kolbenscheibe angebracht. Die Kolbenscheibe lässt sich in ihrer Position nach außen verschieben, so dass die Probe immer am Fixpunkt  $x = 0$  beginnt. Je nach Dicke der Probe muss der Kolben weiter nach hinten verschoben werden. Es können somit auch hinter der Probe befindliche Luftpolster simuliert werden. An die Rohrwand sind zwei Mikrofone an den Positionen  $x_1$  und  $x_2$  montiert, die dort die Schalldrücke  $p_1$  und  $p_2$  messen. Daraus lässt sich eine komplexe Übertragungsfunktion berechnen, aus der sich der Reflexionsfaktor  $r$ , der Absorptionsgrad  $\alpha$  und die akustische Impedanz  $Z_a$  berechnen lassen. [7, 9]

Die Messmethode basiert darauf, dass der Reflexionsfaktor  $r$  aus der Übertragungsfunktion  $H_{12}$  zwischen zwei Mikrofonen  $M_1$  und  $M_2$  bestimmt werden kann.

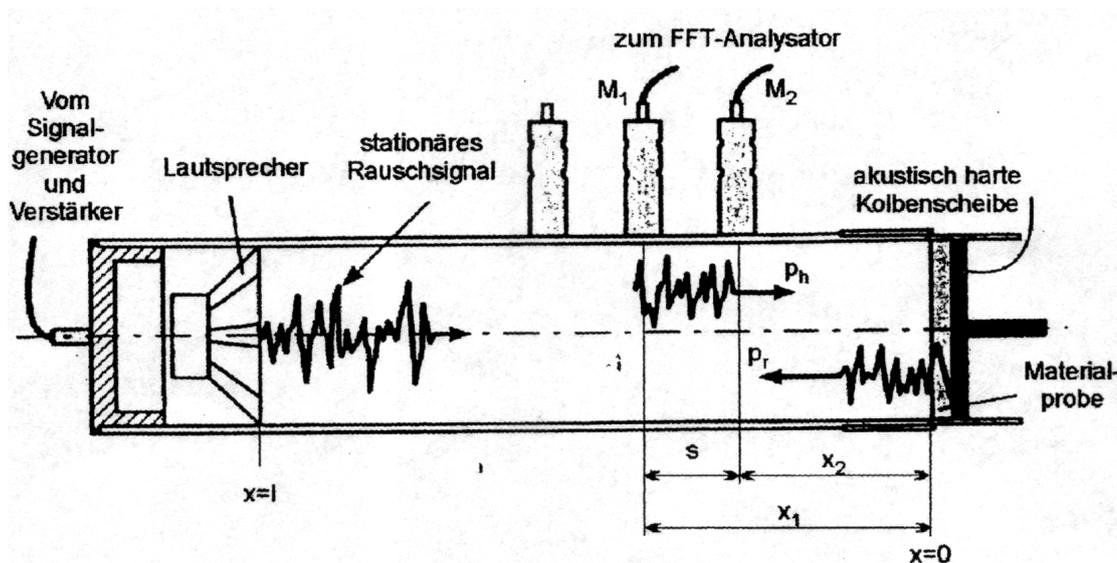


Abb. 2.2.: Schnittzeichnung des Impedanzrohres mit hinlaufender ( $p_i$ ) und rücklaufender ( $p_r$ ) Komponente des stationären Rauschsignals [7]

Abb. 2.2 zeigt die Schnittzeichnung eines Impedanzrohres mit zwei Mikrofonen. Der Lautsprecher erzeugt ein stationäres Rauschsignal, das an der Probeoberfläche teilweise reflektiert wird. Es entsteht ein resultierendes Wellenfeld, das sich aus der Überlagerung der hinlaufenden und der rücklaufenden Welle ergibt. Die Mikrofone  $M_1$  und  $M_2$  messen

den resultierenden Schalldruck an ihren jeweiligen Positionen.“ ([7], S. 77)

Die Beschreibung des Wellenfeldes erfolgt über die hinlaufende Welle  $\underline{p}_h$  und die reflektierte Welle  $\underline{p}_r$  an der Position  $x$ . Für die Überlagerung dieser Wellen zu einem Zeitpunkt  $t$  ergeben sich an den Mikrofonen  $x_1$  und  $x_2$  folgende Beziehungen:

$$\underline{p}_1 = \underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_1} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_1} \quad (2.10)$$

und

$$\underline{p}_2 = \underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_2} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_2} \quad (2.11)$$

Aus der Übertragungsfunktion für den Schalldruck zwischen den zwei Mikrofonpositionen, die sich aus den Fouriertransformierten von (2.10) und (2.11) ergibt,

$$\underline{H}_{12} = \frac{\underline{p}_2(x, \omega)}{\underline{p}_1(x, \omega)} = \frac{\underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_2} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_2}}{\underline{p}_h(0) \cdot e^{jkx_1} + \underline{p}_r(0) \cdot e^{-jkx_1}} \quad (2.12)$$

sowie der Übertragungsfunktionen der hinlaufenden Welle

$$\underline{H}_h = \frac{\underline{p}_{2h}}{\underline{p}_{1h}} = e^{-jk(x_1 - x_2)} \quad (2.13)$$

und der rücklaufenden Welle

$$\underline{H}_r = \frac{\underline{p}_{2r}}{\underline{p}_{1r}} = e^{jk(x_1 - x_2)} \quad (2.14)$$

lässt sich nun der Reflexionsfaktor berechnen:

$$\underline{r} = \frac{(\underline{H}_{12} - \underline{H}_h)}{(\underline{H}_r - \underline{H}_{12})} \cdot e^{j2kx_1} \quad (2.15)$$

Der Reflexionsfaktor  $\underline{r}$  an der Stelle  $x = 0$  ist nun durch Messung der Abstände  $x_1$ ,  $x_2$  und der Wellenzahl  $k$  zu errechnen. Eine detaillierte Herleitung der Gleichungen findet sich in [5] S. 214 ff. und in [7] S. 47 ff.

### Frequenzbereich des Impedanzrohrs

Damit sich im Rohr nur ebene Wellen ausbreiten können, ist der verwendbare Frequenzbereich des Messrohres nach oben hin dadurch beschränkt, dass der Rohrdurchmesser  $d < \frac{\lambda}{2}$  sein muss. Daraus ergibt sich für die obere Grenzfrequenz

$$f_o = \frac{c}{2 \cdot d} \quad (2.16)$$

Bei einem Rohrdurchmesser von  $d = 10$  cm ergibt sich somit  $f_o = 1715$  Hz.

Die obere Grenzfrequenz des Messrohres wird zum einen durch Gl. (2.16) beschränkt, zum anderen durch den Mikrofonabstand  $s = x_1 - x_2$  der beiden Druckempfänger. Es muss  $s < \frac{\lambda}{2}$  gelten. Wird der Abstand zu groß, ergibt sich quasi räumliches Aliasing. Wählt man den Mikrofonabstand zu klein, können die Druckunterschiede bei tiefen Frequenzen nicht mehr exakt genug aufgelöst werden.

Die Bedingungen hierfür sind in [9, S. 34] gegeben durch

$$0,1 \cdot \pi < k \cdot s < 0,8 \cdot \pi \quad (2.17)$$

Bei einem Mikrofonabstand von  $s = 10$  cm ergibt sich somit ein nutzbarer Frequenzbereich von etwa 180 Hz bis 1400 Hz. Die erste Bedingung für die obere Grenzfrequenz in Gl. (2.16) ist somit irrelevant, da sie höher als die obere Grenzfrequenz der zweiten Bedingung (2.17) liegt.

### Bestimmung der akustischen Materialparameter

Der Reflexionsfaktor  $\underline{r}$  ist das Verhältnis von rücklaufender zu hinlaufender Welle

$$\underline{r} = \frac{\underline{p}_r}{\underline{p}_h} \quad (2.18)$$

und errechnet sich aus den Übertragungsfunktionen der Mikrofonpositionen, wie bereits in Gl. (2.15) gegeben.

Das Verhältnis von absorbiertener und reflektierter Energie wird durch den Reflexionsgrad  $R$  beschrieben:

$$R = |\underline{r}|^2 \quad (2.19)$$

Die von der Messprobe absorbierte Schallenergie gibt der Absorptionsgrad  $\alpha$  an.

$$\alpha = 1 - R \quad (2.20)$$

Letztlich lässt sich noch die akustische Impedanz direkt vor der Probe an der Stelle  $x = 0$  aus dem Reflexionsfaktor berechnen:

$$\underline{Z}(0) = Z_0 \cdot \frac{1 + \underline{r}}{1 - \underline{r}} \quad (2.21)$$

### 2.2.2. Aufbau und Details des verwendeten Messrohres

Das Impedanzrohr der Technischen Universität Graz wurde im Rahmen einer Diplomarbeit [9] an der TU Graz von Dipl. Ing. Rudolf Brunnader gebaut und die Software-Bedienungsoberfläche *CATS* in Matlab programmiert.

Die Software wurde im Zuge einer weiteren Diplomarbeit von Dipl. Ing. Wolfgang Truppe und Dipl. Ing. Felix Kappler um die 4-Mikrofon-Methode auf *CATS8* erweitert. Damit

ist z. B. die Messung der Durchgangsdämpfung möglich, was in unserem Fall aber keine Anwendung findet.



Abb. 2.3.: Das Impedanzrohr der TU Graz am Messplatz

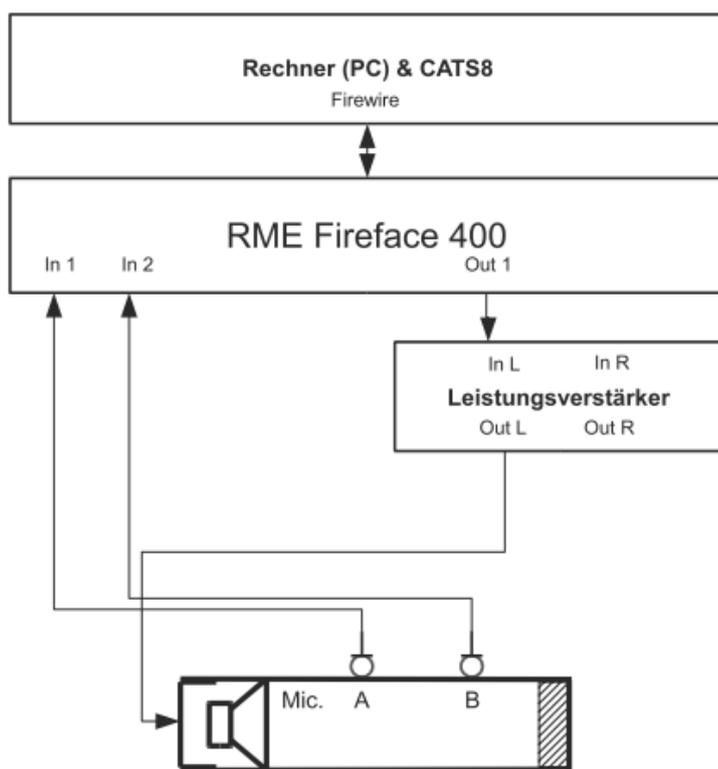


Abb. 2.4.: schematischer Aufbau des Messsystems [10]

Das Rohr ist komplett aus Metall gefertigt und an allen Öffnungs- und Verbindungsstellen mit Gummidichtungen versehen. Auf Abb. 2.3 links zu sehen ist das für den Lautsprecher *Visaton W 100 S* entworfene Holzgehäuse, dessen Rückwand um  $16^\circ$  angeschrägt ist, um Resonanzen im Gehäuse entgegenzuwirken. Damit das zusammengesteckte Rohr nicht während der Messung in der Horizontalen herausrutscht, was eine Positionsänderung der Probe nach sich zieht, sind Verschlüsse auf der Rohraussenwand montiert. Als Messmikrofone werden *C480* von *AKG* verwendet. Als Soundkarte wurde ein *Fireface 400* von *RME* zur Vorverstärkung und Aufnahme der Mikrofonsignale und zur Ausgabe des Anregungssignals verwendet. Der Leistungsverstärker, der den Lautsprecher antreibt, ist auf Abb. 2.5 mit der Soundkarte abgebildet. Eine schematische Skizze des Messaufbaus ist in Abb. 2.4 zu finden.

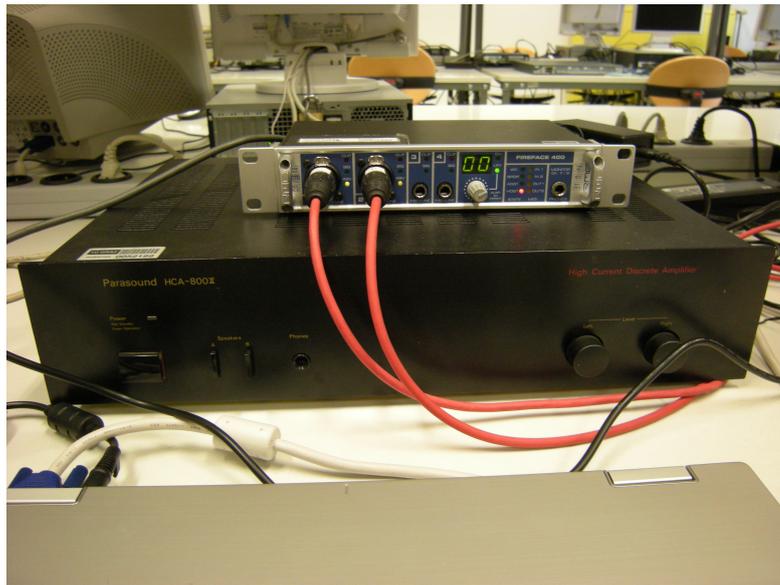


Abb. 2.5.: Leistungsverstärker Parasound HCA-800II und Audiointerface RME Fireface 400

Wie auf Abb. 2.3 zu sehen ist, besitzt das Rohr eine dritte zusätzliche Öffnung (beschriftet mit „2“) für ein Mikrofon, die mit einem Deckel verschlossen ist. Sie dient der Variation auf einen kürzeren Mikrofonabstand, mit dem sich die Grenzfrequenzen des Messrohres erhöhen. Der kurze Mikrofonabstand von 10 cm ermöglicht eine Auswertung der Messung von 171 bis 1372 Hz, mit weitem Abstand von 20 cm reicht der Frequenzbereich von 85 bis 686 Hz.

### **2.2.3. Anwendung des Impedanzrohrs auf die Messung von Helmholtzresonatoren**

Die Messung im Impedanzrohr erfolgt mit ebenen Wellen, was einem Schallfeld mit senkrechtem Schalleinfall bzw. einer unendlich weit entfernten Schallquelle entspricht.

Durch die verstellbare Kolbenscheibe des Rohrs können verschiedene Resonatoren in einfacher Weise aufgebaut werden, indem man Frontplatten mit variablen Stärken und Lochradien in das Rohr einsetzt und den Raum zwischen Frontplatte und Kolbenscheibe als variables Volumen nutzt.



### 3. Messungen an Helmholtzresonatoren

Nachdem nun die Grundlagen der Theorie abgehandelt wurde, werden in diesem Kapitel die Details zur Fertigung der Messproben, die Kalibrierung und der Messvorgang erläutert.

#### 3.1. Fertigung der Messproben

Das schallharte Ende des Impedanzrohrs besteht aus einem Kolben, der sich um bis zu 20 cm verschieben lässt. Daher bietet es sich an, mit diesem Kolben das Volumen der Resonatoren zu bilden, da sich so die Volumina stufenlos variieren lassen. Damit ist es möglich Volumina von  $r^2\pi \cdot l_V = (10 \text{ cm})^2\pi \cdot 1 \text{ cm} = 0,3 \text{ l}$  bis  $(10 \text{ cm})^2\pi \cdot 20 \text{ cm} = 6,28 \text{ l}$  zu realisieren. Es mussten lediglich Frontplatten gefertigt werden, die passgenau den Innendurchmesser des Rohrs von 10 cm besitzen. Als Baumaterial wurden MDF-Platten von 10 und 19 mm Stärke gewählt. Aus den Platten wurden Rundlinge mit 10 cm Durchmesser gedreht und mittig mit verschiedenen zylindrischen Löchern aufgebohrt. Um längere Halsradien als 19 mm zu erhalten, wurden mehrere Rundlinge zusammengeleimt, bzw. beim Messprozess im Rohr hintereinander geschichtet, was bei sorgfältigem Einbau keinen merklichen Unterschied macht.



Abb. 3.1.: Aus MDF-Platten gefertigte Frontscheiben



Abb. 3.2.: Ringe aus MDF zur Verkleinerung des Volumens

Die Proben haben folgende Abmessungen:

Messprobe Nr.	$r_H$ [mm]	$l_H$ [mm]
1	2,00	10,1
2	1,95	10,2
3	1,95	10,2
4	3,00	10,1
5	2,98	19,6
6	2,98	19,6
7	4,00	10,2
8	3,90	19,6
9	3,95	29,8
10	6,00	10,1
11	6,00	10,1
12	6,00	29,8
13	8,10	10,3
14	8,15	19,6
15	8,10	39,2
16	9,75	29,7

Tab. 3.1.: Daten der Messproben

Wie aus den ungeraden Abmessungen zu ersehen ist, mussten die Proben sehr exakt vermessen werden. Ein Messfehler bei  $r_H$  von 0,05 mm verfälschen das Rechenergebnis der Resonanzfrequenz bereits um etwa 1 %. Daher wurden zu allen angestellten Berechnungen die in Tab. 3.1 gegebenen Maße in gleicher Genauigkeit herangezogen.

Messproben mit gleichen Halsradien wurden zur Schichtung verwendet, um noch weitere Halslängen zu erhalten.

### Veränderung des Rohrdurchmessers

Um Einflüsse der Form des hinter dem Hals liegenden Volumens, das die akustische Feder bildet, auf die Resonanzfrequenz zu untersuchen, wurden aus dem gleichen MDF-Material zusätzlich Scheiben mit ebenfalls 10 cm Aussendurchmesser gedreht und in der Mitte Löcher von 5 cm Durchmesser herausgedreht. Die Ringe haben die Stärken 19 mm (A), 29 mm (B) und 38 mm (C), zu sehen in Abb. 3.2. Damit lassen sich die ursprünglich möglichen Volumina  $V = 0,3 \dots 6,28$  l (mit  $r_{Rohr} = \frac{10}{2}$  cm und  $l_V = 1 \dots 20$  cm) auf den Bereich  $V = 0,07 \dots 1,57$  l (mit  $r_{Rohr} = \frac{5}{2}$  cm und  $l_V = 1 \dots 20$  cm) verkleinern.

## 3.2. Kalibrierung des Impedanzrohrs

Vor dem Start einer Messserie ist eine Kalibrierung des Messrohrs notwendig. Zunächst werden die elektrischen Pegel am Eingang des Verstärkers und am Lautsprecher mit einem Multimeter überprüft, damit immer mit dem gleichen Pegel angeregt wird. Die Mikrofonvorverstärker sind entsprechend einzupegeln. Zur Kalibrierung wird ein bestimmtes Stück Melaminharzschaum mit 10 cm Stärke als Referenzprobe verwendet. Beim Einbau von Proben ist generell darauf zu achten, dass die Probe bündig mit dem auf Abb. 3.3 rechts zu sehenden Rohrteil abschließt, da die Anfangsposition der Probe  $x = 0$  wesentliche Bedeutung für die von der Software durchgeführten Berechnungen hat. Bei der Kalibrierung wird die „Sensor-Switching Methode“ [9, S. 17 ff] verwendet, bei der die Übertragungsfunktion zwischen den Mikrofonen einmal mit vertauschten Mikrofonpositionen und einmal normal gemessen wird.

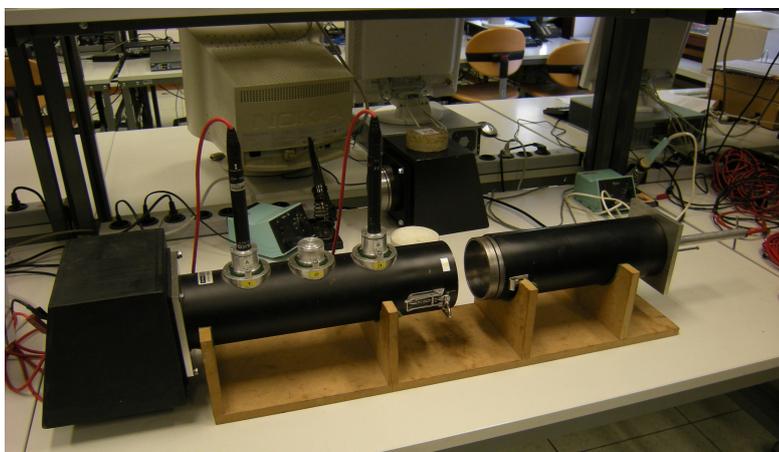


Abb. 3.3.: Impedanzrohr im geöffneten Zustand

## 3.3. Beschreibung des Messvorgangs

### 3.3.1. Einbau der Proben

Die Rundlinge wurden in den Werkstätten der TU Graz auf exakt 10 cm Durchmesser gedreht, so dass diese bei der gegebenen Passgenauigkeit ins Rohr als luftdicht angenommen werden können. Die Proben 4, 10 und 11 (siehe Abb. 3.1) saßen etwas locker, da sie in einem weiteren Durchgang nachgefertigt wurden. Mit einer Schicht Klebeband um den Rand herum wurde hier Abhilfe geschaffen.

Vor Einbau einer Probe wurde der Halsradius und die Halslänge mit einer Schublehre abgenommen. Da sich einige Proben sehr streng in das Rohr stecken lassen, hat sich die Methode, das Rohr auf den liegenden Rundling zu stülpen, als geeignet bewährt. Außerdem garantiert es einen planen Abschluss der Probe mit dem Rohrende. Nach dem

Einstellen des Volumens durch die Kolbenscheibe und deren Fixierung wurde die Tiefe  $l_{\text{gemessen}}$  von der Probe bis zur Rückwand des Rohres mit der Schublehre abgenommen. Die Länge des Volumens  $l_V$  ergibt sich somit, wie in Abb. 3.4 zu sehen, aus

$$l_V = l_{\text{gemessen}} - l_H \quad (3.1)$$

und das Volumen  $V$  zu

$$V = A_{\text{Rohr}} \cdot l_V = r_{\text{Rohr}}^2 \pi \cdot l_V \quad (3.2)$$

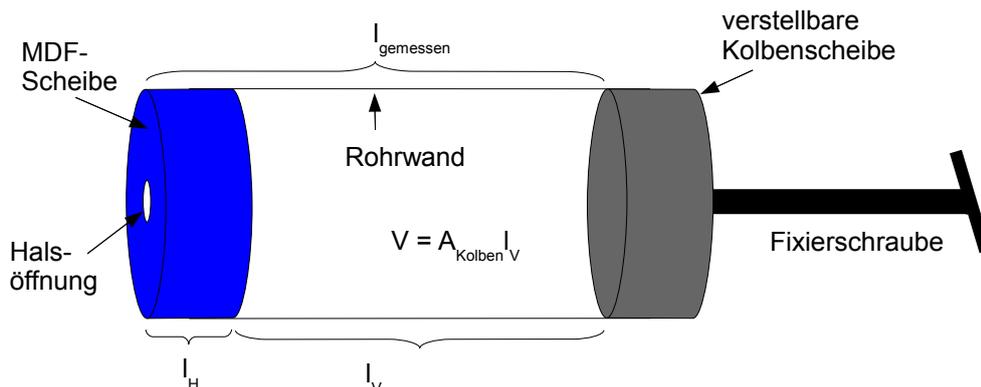


Abb. 3.4.: schematische Skizze für die Messung des Volumens

### 3.3.2. Messvorgang

Der Messvorgang an sich verläuft eher unproblematisch. Da eine MLS-Messung verwendet wird, haben impulshaltige Störgeräusche keinen Einfluss auf das Messergebnis. Bei jeder Messung muss nur die Temperatur und Luftfeuchtigkeit mitprotokolliert werden. Nach dem Einbau der Messprobe ins Rohr wird die Tiefe des Volumens  $l_{\text{gemessen}}$  mit einer Schublehre abgenommen und das Rohr verschlossen. Nach dem Messvorgang wird sofort die Resonanzfrequenz zur Kontrolle ausgelesen und mit der berechneten  $f_H$  verglichen, um bei gravierenden Abweichungen die Messung gegebenenfalls wiederholen zu können.

### 3.3.3. Erstellung von Messreihen

Bei der Durchführung der ersten Messungen hat sich gezeigt, dass die berechnete Resonanzfrequenz manchmal fast perfekt mit den Messergebnissen übereinstimmt und manchmal sehr große Abweichungen von bis zu  $\pm 7\%$  aufweist. Die verwendete Mündungskorrektur war  $\Delta l_H = 0,85 r_H$ . Außerdem wurde eine Beeinträchtigung der Resonanzfrequenz bei den kleinsten verwendeten Volumina festgestellt, also bei kurzen Längen des Volumens im Bereich  $l_V < 20$  mm.

Um diese Effekte genauer zu untersuchen, wurden Messreihen von jeder Probe erstellt,

bei der die Volumenlänge von 1 cm ab vergrößert wurde, bis der untere Messbereich des Rohres erreicht wurde. Die Schrittweite betrug meistens 1 cm, oft wurden aber Schritte ausgelassen bzw. die Schrittweite verdoppelt oder verdreifacht, wenn sofort ersichtlich war, in welche Richtung die Messserie lief und keine Besonderheiten auftraten. Dies konnte kontrolliert werden, indem bei jeder Messung sofort die Resonanzfrequenz herausgelesen und mit der berechneten Frequenz verglichen wurde. Außerdem wurde auch die Temperatur mitprotokolliert, da diese über die Schallgeschwindigkeit in die Formel mit eingeht und so Fehler weiter minimiert werden. Die vollständigen Messreihen sind im Anhang A zu finden.



## 4. Diskussion der Messergebnisse

Im folgenden Kapitel geht es um die Interpretation der Messungen und Ableitung von Formeln aus den auftretenden systematischen Abweichungen.

Die Messdaten liegen im Fließtext in Form von Diagrammen vor, detaillierte Tabellen befinden sich im Anhang A ab S. 43.

### 4.1. Allgemein

Da zu Beginn der Messserien schnell ersichtlich war, dass die gemessenen Resonanzfrequenzen manchmal sehr exakt mit der Berechnungsformel übereinstimmen und manchmal sehr grobe Abweichungen von über  $\pm 6\%$  aufweisen, wurde zunächst der Fokus auf diese Diskrepanz gelegt. Abb. 4.1, 4.2 und 4.3 zeigen die Abweichung der gemessenen Resonanzfrequenz  $f_M$  von der berechneten  $f_H$  für verschiedene Halsradien nach

$$\text{Abweichung} = \frac{f_M - f_H}{f_H} \cdot 100\% \quad (4.1)$$

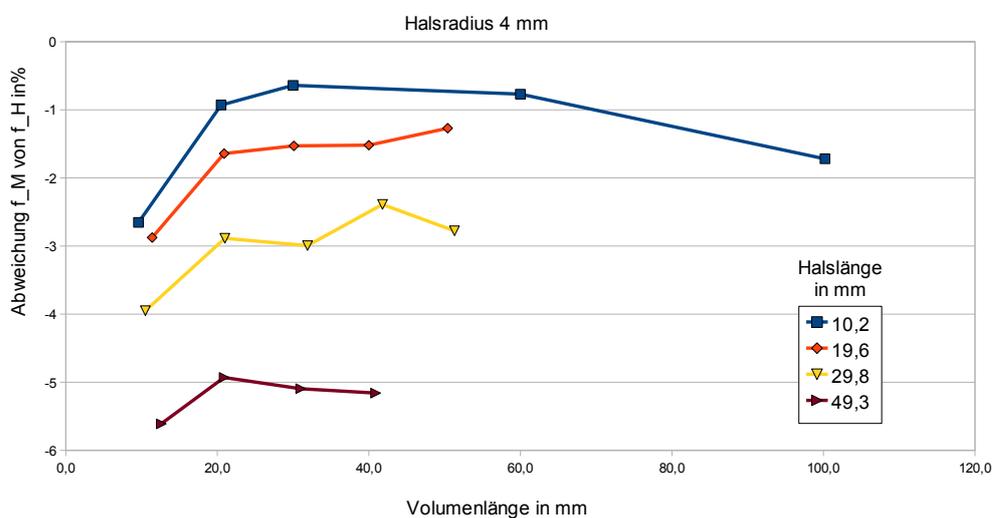


Abb. 4.1.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit Mündungskorrektur  $\Delta l_H = 0,85r_H$  für alle Proben mit  $r_H = 4$  mm

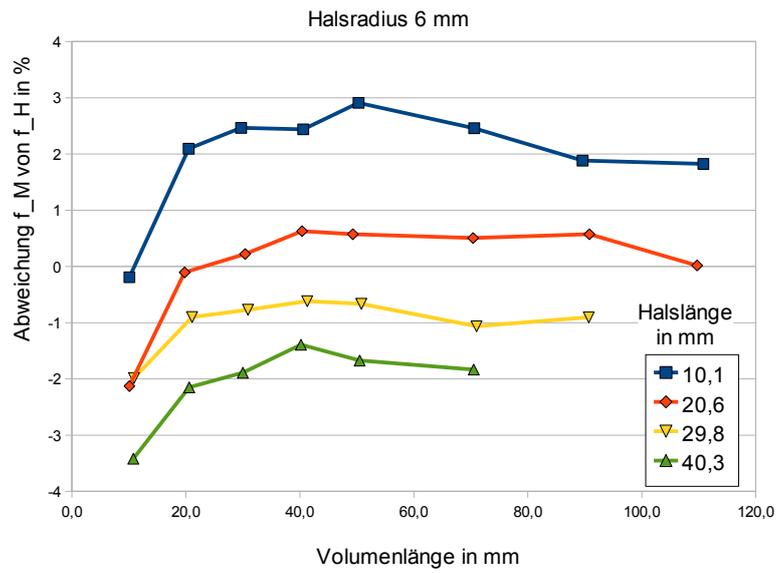


Abb. 4.2.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit Mündungskorrektur  $\Delta l_H = 0,85r_H$  für alle Proben mit  $r_H = 6$  mm

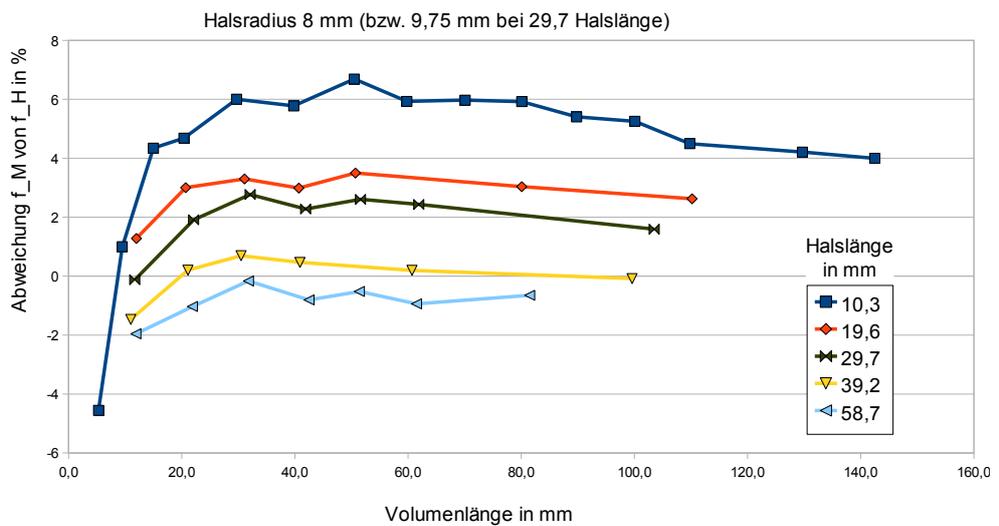


Abb. 4.3.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit Mündungskorrektur  $\Delta l_H = 0,85r_H$  für alle Proben mit  $r_H = 8$  mm

Als auffälliges systematisches Verhalten lässt sich festhalten, dass die Kurven der Abweichung

- mit zunehmender Halslänge immer tiefer liegen.
- mit zunehmendem Halsradius bei gleichbleibender Halslänge höher liegen. (Vergleiche z. B. die Kurven für  $r_H = 10$  mm der Diagramme)
- bei kleinen Volumenlängen ( $l_V < 20$  mm) einen starken Abfall aufweisen.

Dies sind 3 systematische Beobachtungen, eine für jeden Parameter, die den Helmholtzresonator definieren. Der Abfall für kleine Volumina hat offenbar mit der Form des Volumens zu tun und wird später in Kap. 4.3 behandelt.

Es wird nun nach einem Grund für diese Abweichungen gesucht. Alle Parameter der Berechnungsformel der Resonanzfrequenz wurden mit größtmöglicher Genauigkeit vermessen und aufgenommen: Die Abmessungen  $r_H$ ,  $l_H$  und  $V_H$  und die Temperatur zur Berechnung der Schallgeschwindigkeit. Als einziger ungewisser Parameter bleibt die Mündungskorrektur übrig, die eine empirische Formel ist, zu der unterschiedliche Angaben in der Literatur (siehe Kap. 2.1.2, S. 4) zu finden sind. Unter Annahme, dass alle anderen Parameter in entsprechender Genauigkeit vorliegen, wird daher die Hypothese aufgestellt, dass sich die Genauigkeit der Formel für  $f_H$  durch eine Modifikation der Mündungskorrektur verbessern lässt.

## 4.2. Analyse der Mündungskorrektur

Offenbar hängt die Mündungskorrektur nicht nur von  $r_H$  ab, sondern auch von  $l_H$ . Diese Abhängigkeit in Abb. 4.4 und 4.5 dargestellt. Hierzu wurde mit Hilfe der gemessenen Resonanzfrequenz  $f_M$  auf die reale Mündungskorrektur, d. h. wie sie bei einer perfekt funktionierenden Formel und unter Annahme von 100 %iger Richtigkeit aller Daten sein müsste, zurückgerechnet. Sie ergibt sich zu

$$\Delta l_{H,real}(r_H, l_H) = \frac{1}{2} \left( \frac{c^2 \cdot A_H}{4\pi^2 \cdot f_M^2 V_H} - l_H \right) \quad (4.2)$$

Die realen Mündungskorrekturen wurden dann über alle gemessenen Volumina für jede Probe arithmetisch gemittelt. Die Messungen mit den kleinsten Volumina mit  $l_V \leq 20$  mm sind dabei nicht berücksichtigt, da hier noch ein anderer Effekt auftritt, auf den in Kap. 4.3 eingegangen wird. Die gemittelten Mündungskorrekturen sind einmal über dem Halsradius in Abb. 4.4 aufgetragen und einmal über der Halslänge in Abb. 4.5.

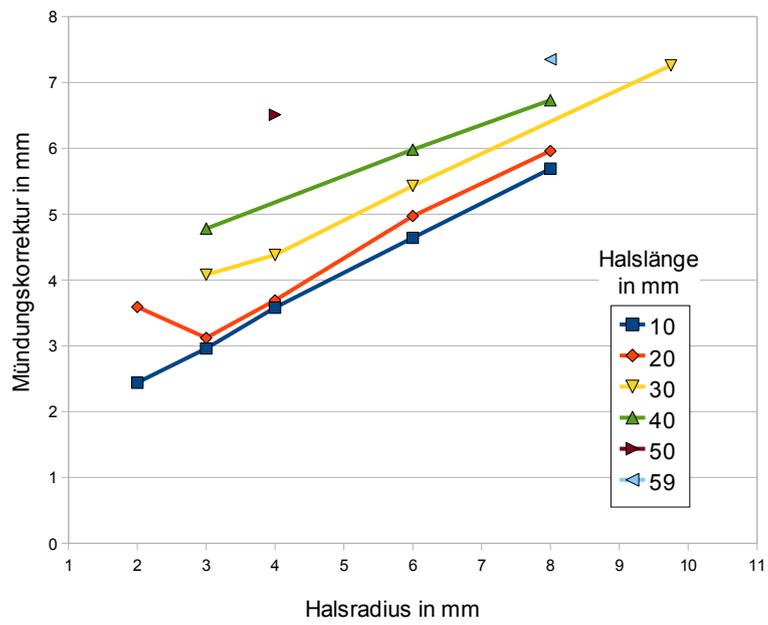


Abb. 4.4.: Über Volumen gemittelte Mündungskorrekturen in Abhängigkeit des Halsradius

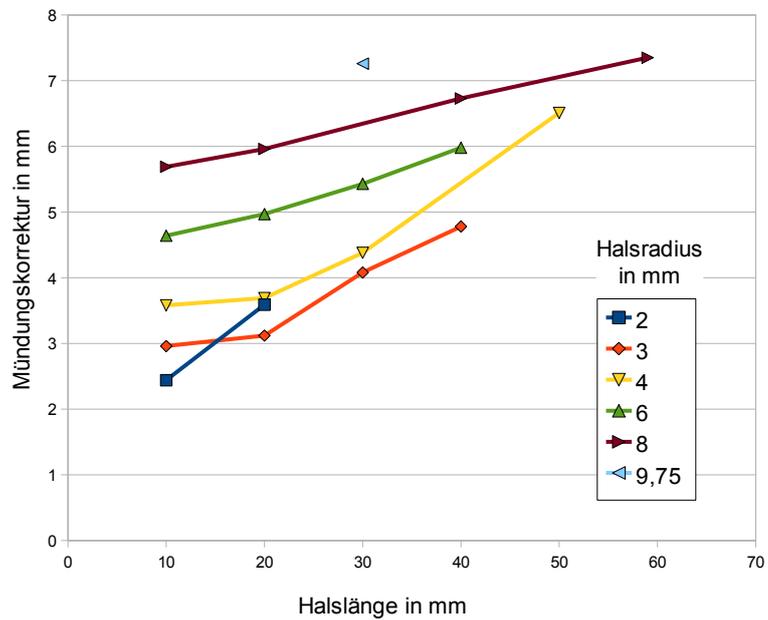


Abb. 4.5.: Über Volumen gemittelte Mündungskorrekturen in Abhängigkeit der Halslänge

Abb. 4.4 zeigt eine lineare Abhängigkeit der Mündungskorrektur von  $r_H$  mit Ausnahme der Punkte für  $l_H = 20$  mm mit  $r_H = 2$  mm und  $l_H = 30$  mm mit  $r_H = 3$  mm. Diese „Ausreißer“ werden hier nicht berücksichtigt. Es wurde die Steigung der parallelen Geraden ausgelesen und gemittelt, womit sich nun die Steigung von  $\Delta l_{H,neu}$  beschreiben lässt. Zusätzlich weisen die Geraden einen Offset auf, der von einem weiteren Parameter, der Halslänge, abhängt. Der Offset wird hier als  $\zeta(l_H)$  bezeichnet.

$$\Delta l_{H,neu}(r_H) = 0,54 \cdot r_H + \zeta(l_H) \tag{4.3}$$

Den von  $l_H$  abhängigen Offset  $\zeta(l_H)$  können wir nun aus Abb. 4.5 herauslesen. Die beiden Ausreißer  $l_H = 20$  mm mit  $r_H = 2$  mm und  $l_H = 30$  mm mit  $r_H = 3$  mm sind auch hier zu sehen und wurden wieder vernachlässigt. Hier ergibt sich in etwa ein exponentieller Verlauf von  $\Delta l_{H,real}(l_H)$ . Der lineare Zusammenhang zwischen  $\Delta l_{H,real}$  und  $r_H$  zeigt sich in den näherungsweise gleich großen Abständen zwischen den Kurven in Abb. 4.5. Der Linearitätätfaktor ist mit 0,54 aus Gl. (4.3) bereits bekannt.

Zur Bestimmung von  $\zeta(l_H)$  wurde die Gl. (4.3) für  $\Delta l_{H,neu}$  in das Tabellenkalkulationsprogramm eingegeben und für den Offset ein exponentieller Zusammenhang mit einer Konstante  $c_k$  angenommen:

$$\zeta(l_H) = e^{c_k \cdot l_H} \tag{4.4}$$

$c_k$  wurde nun durch Experimentieren so gewählt, dass die Abweichungen der Resonanzfrequenzen minimal werden und sich die Kurven der Abweichung um 0 % herum bewegen. Die somit erhaltene Näherungsformel für die Mündungskorrektur ergibt sich mit  $c_k = \frac{1}{36000}$  zu

$$\Delta l_{H,neu} \approx 0,54r_H + e^{\frac{l_H}{36000}} \tag{4.5}$$

Alle Längen sind hier in m einzusetzen.

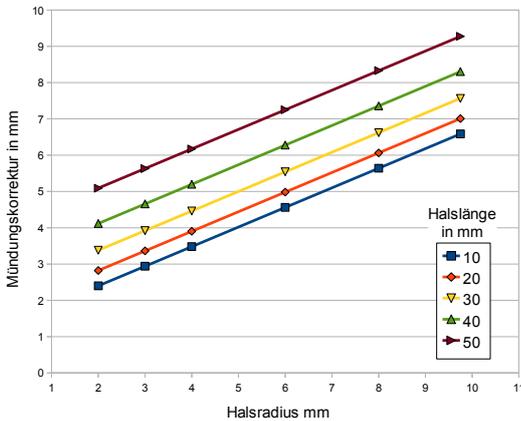


Abb. 4.6.: Näherungsformel für die Mündungskorrektur in Abhängigkeit des Halsradius

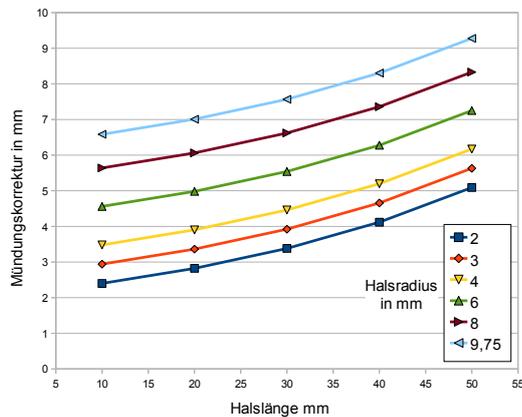


Abb. 4.7.: Näherungsformel für die Mündungskorrektur in Abhängigkeit der Halslänge

Die Näherungsformel für  $\Delta l_{H,neu}$  in Abb. 4.6 und 4.7 lassen sich gut mit den realen Mündungskorrekturen  $\Delta l_{H,real}$  (Abb. 4.4, 4.5) vergleichen.

Nun können wir noch einmal die Abweichung der gemessenen von der jetzt mit neuer Mündungskorrekturformel berechneten Resonanzfrequenz graphisch in Abb. 4.8, 4.9 und 4.10 darstellen.

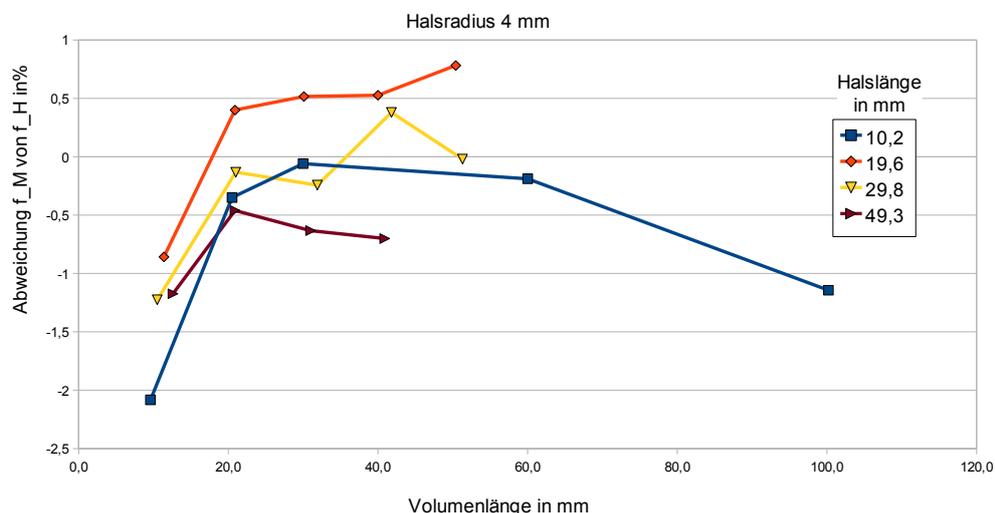


Abb. 4.8.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit neuer Mündungskorrektur  $\Delta l_{H,neu}$  für alle Proben mit  $r_H = 4$  mm

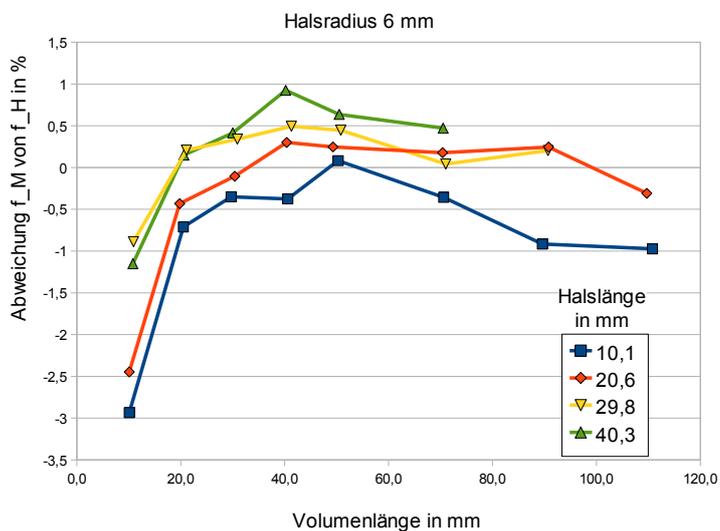


Abb. 4.9.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit neuer Mündungskorrektur  $\Delta l_{H,neu}$  für alle Proben mit  $r_H = 6$  mm

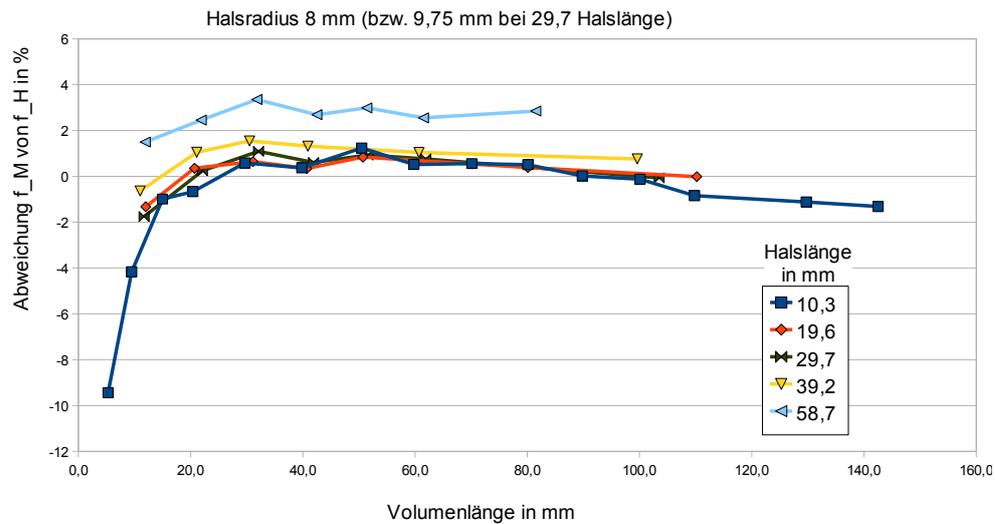


Abb. 4.10.: Abweichung der Resonanzfrequenz mit neuer Mündungskorrektur  $\Delta l_{H,neu}$  für alle Proben mit  $r_H = 8$  mm

Die Streuung der Abweichung ist durch die Modifikation der Formel weitaus geringer geworden. Die meisten Kurven weichen größtenteils nicht mehr als  $\pm 2\%$  von der Messung ab. Lediglich bei kleinen Volumina fällt die Kurve ab, was wir nun genauer untersuchen werden.

### 4.3. Einfluss der Volumenrückwand

Wie bereits in 4.1 angesprochen fallen die Abweichungskurven der Resonanzfrequenzen sowohl mit der neu aufgestellten Formel (Abb. 4.8, 4.9 und 4.10) als auch mit der ursprünglichen Formel (Abb. 4.1, 4.2 und 4.3) bei Volumina  $V \leq 0,063$  l stark ab. Der Abstand zwischen dem Halsende der MDF-Platte und der Rückwand des Resonatorvolumens, der Kolbenscheibe des Rohres, ist hier  $l_V \leq 20$  mm.

Da bei größerem Abstand die Resonanzfrequenzen nun mit der neuen Mündungskorrektur sehr genau berechnet werden kann, wird die Hypothese aufgestellt, dass die Form des Volumens für den Abfall der Kurve verantwortlich ist. Das Verhältnis von Grundfläche zur Höhe des Zylindervolumens ist hierbei sehr unausgeglichen, wodurch die gemessene Resonanzfrequenz weitaus tiefer als berechnet liegt. Besonders gut ist dieser Effekt in Abb. 4.3 bei der Kurve  $l_H = 10,3$  mm (blau) zu sehen, da hier mehrere Messpunkte im Bereich  $5 \text{ mm} \leq l_V \leq 20$  mm aufgenommen wurden.

### 4.3.1. Messung mit verkleinertem Volumen

Um den vermuteten Einfluss der Rückwand auf die akustische Masse zu untersuchen sind Messungen mit verkleinertem Volumen realisiert worden. Der Durchmesser des Rohrs wurde deshalb hinter den Messproben mit den Ringen A, B, C halbiert. Wenn nun bei gleichbleibendem Volumen ein - durch den verkleinerten Durchmesser bedingt - nicht so extremes Verhältnis von Zylindergrundfläche zu dessen Höhe ( $l_V$ ) keine Beeinträchtigung der Resonanzfrequenz feststellbar ist, so ist die Ursache für den Effekt gefunden.

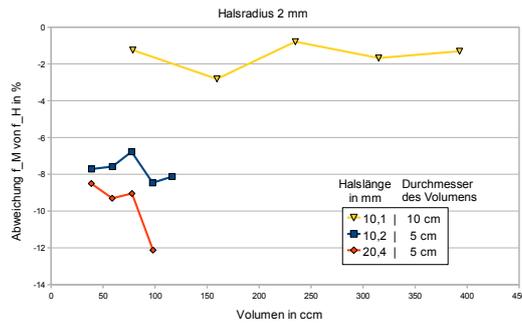


Abb. 4.11.: Vergleich der Abweichung der Resonanzfrequenz bei Messungen mit normalem (10 cm) und verkleinertem Durchmesser (5 cm) des Volumens, mit  $r_H = 2$  mm

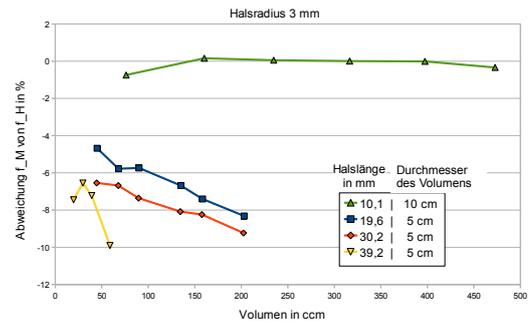


Abb. 4.12.: Vergleich der Abweichung der Resonanzfrequenz bei Messungen mit normalem (10 cm) und verkleinertem Durchmesser (5 cm) des Volumens, mit  $r_H = 3$  mm

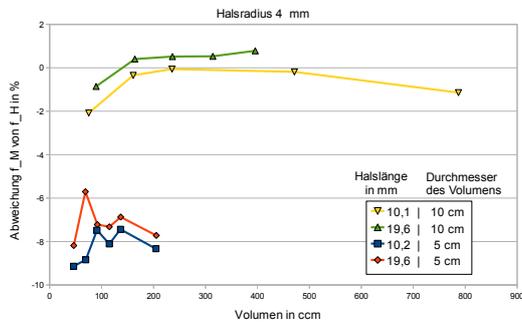


Abb. 4.13.: Vergleich der Abweichung der Resonanzfrequenz bei Messungen mit normalem (10 cm) und verkleinertem Durchmesser (5 cm) des Volumens, mit  $r_H = 4$  mm

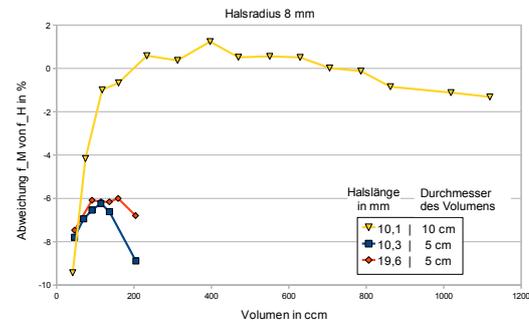


Abb. 4.14.: Vergleich der Abweichung der Resonanzfrequenz bei Messungen mit normalem (10 cm) und verkleinertem Durchmesser (5 cm) des Volumens, mit  $r_H = 8$  mm

Abb. 4.11, 4.12, 4.13 und 4.14 zeigen die Abweichung der gemessenen von der berechneten Resonanzfrequenz. Zum Vergleich wurden vorige Messungen mit vollem Rohrdurchmesser herangezogen und über dem tatsächlichen Volumen aufgetragen. Es wurde bereits mit der neuen Formel für die Mündungskorrektur Gl. (4.5) gerechnet.

Die Messergebnisse bringen allerdings keine offensichtliche Klärung des Effekts. Die berechneten Resonanzfrequenzen liegen in einem Bereich von ca. 5 bis 9 % unter den gemessenen. Die Schwankungen innerhalb einer Messserie sind ebenfalls nicht unerheblich. Dies könnte an Fehlern bei der Vermessung des Volumens liegen, wobei die Methode hierfür die gleiche wie bei allen anderen Messungen war, siehe Kap. 3.3.1. Da die Halsparameter die gleichen wie bei den Messungen mit großen Rohrdurchmesser sind, bleibt als einziger Parameter das Volumen, in dem nach dem Grund für den Offset zu suchen ist. Die Rohrrinnenwand aus Metall wurde hier durch die Ringe aus MDF-Platten ersetzt. Eventuell führt die Porösität des Materials zu einer Vergrößerung des Volumens, wodurch eine zu hohe  $f_H$  erklärbar wäre.

## 4.4. Auswertung der Resonanzgüte

Außer der Resonanzfrequenz ist die Güte das zweite wichtige Kriterium eines Resonators. Sie beschreibt, wie breit- bzw. schmalbandig der Resonator wirkt.

### 4.4.1. Halbwertsbreite des Resonanzkreises

Da anfangs unklar war, woraus die Güte des Helmholtzresonators abzulesen ist und in der Literatur dazu nichts Eindeutiges gefunden werden konnte, werden hier folgende Überlegungen angestellt:

- Der Absorptionsgrad ist ein Verhältnis von Schallintensitäten.
- Die Resonanzgüte wird in der Elektrotechnik aus der elektrischen Impedanz abgelesen.

Somit ist klar, dass die berechnete Güte nur der aus der Impedanz abgelesenen Güte entsprechen kann. Da das Interesse bei der Beschreibung von Absorbern aber eher am Absorptionsgrad liegt, wird dies ebenfalls in Kap. 4.4.2 behandelt. Zunächst wenden wir uns aber der Vorgehensweise bei der Bestimmung der Güte der Impedanzkurve zu.

### Erläuterung der Vorgehensweise

Da Helmholtzresonatoren Serienschwingkreise sind, hat die Impedanz bei der Resonanzfrequenz ein Minimum. Die Güte kann ebenfalls beim Maximum der Admittanz abgelesen werden, da sie der Kehrwert der Impedanz ist. Die Messsoftware *CATS8* bietet eine Darstellung des Betrags beider Größen an, weshalb hierfür die Admittanz herangezogen wurde.

Es werden die Punkte gesucht, wo der Betrag der Admittanz auf das  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fache seines Maximums abgesunken ist. Mit dem Maximum, bei dem die Resonanzfrequenz liegt, kann

nun die Güte nach [4, S. 69] berechnet werden.

$$Q_Z = \frac{f_M}{\Delta f} = \frac{f_M}{f_{g,o} - f_{g,u}} \quad (4.6)$$

Wir sehen uns das anhand des Beispiels in Abb. 4.15 an. Es zeigt eine Resonanzkurve aus Messserie 2, die wir in der Messsoftware *CATS8* erhalten. Um das Ablesen zu erleichtern, wurde hierfür immer eine Kurvenglättungsfunktion der Software mit dem Faktor 3 benutzt.

Die Resonanzfrequenz  $f_M$  liegt beim Maximum der Kurve, hier bei 151 Hz. Man liest nun den Wert der Impedanz beim Maximum ab, im Beispiel ist  $Y_{a,max} = 0,85 \frac{m^3}{Ns}$ . Wir suchen nun die Frequenzen, bei denen  $Y_a$  um -3 db vom Maximum abgesunken ist. Also suchen wir  $Y_{a,g} = \frac{Y_{a,max}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{\sqrt{2}} 0,85 \frac{m^3}{Ns} = 0,60 \frac{m^3}{Ns}$ . Dort lesen wir die Grenzfrequenzen  $f_{g,u} = 144$  Hz und  $f_{g,o} = 159$  Hz ab und können  $Q_Z$  nach Gl. (4.6) errechnen.

$$Q_Z = \frac{151 \text{ Hz}}{159 \text{ Hz} - 144 \text{ Hz}} = 10,07$$

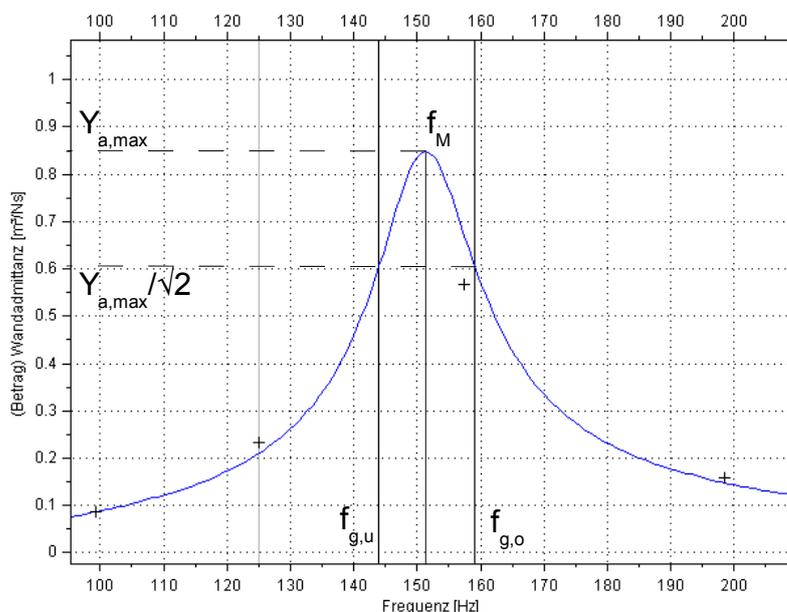


Abb. 4.15.: Messgraphik aus *CATS8* zum Auslesen der Güte aus der Wandadmittanz mit der Messung  $r_H = 3$  mm,  $l_H = 10,1$  mm,  $l_V = 29,9$  mm aus Messserie 2 (Probe 4)

### Evaluierung der Messergebnisse

Für Abb. 4.16, 4.17 und 4.18 wurde die Resonanzgüte der akustischen Impedanz ausgelesen und über dem Volumen (bzw. der Länge des Volumens  $l_V$ ) aufgetragen. Die Werte

bewegen sich mit groben Schwankungen um jeweils einen konstanten Wert und weisen keine offensichtlich erkennbare Systematik in Zusammenhang mit dem Volumen auf. Die Resonanzgüte ist also vom Volumen des Resonators unabhängig.

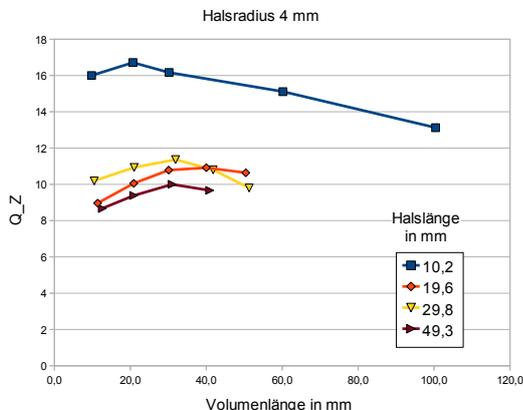


Abb. 4.16.: Güte der akustischen Impedanz in Abhängigkeit des Volumens für  $r_H = 4$  mm

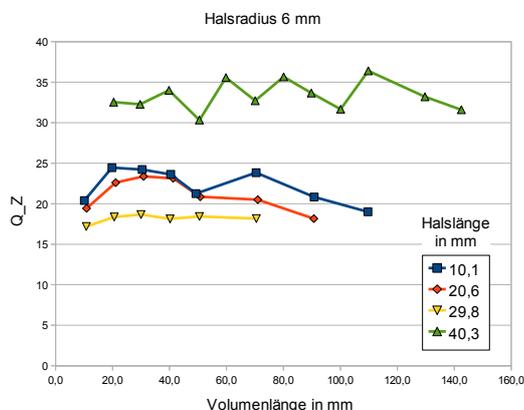


Abb. 4.17.: Güte der akustischen Impedanz in Abhängigkeit des Volumens für  $r_H = 6$  mm

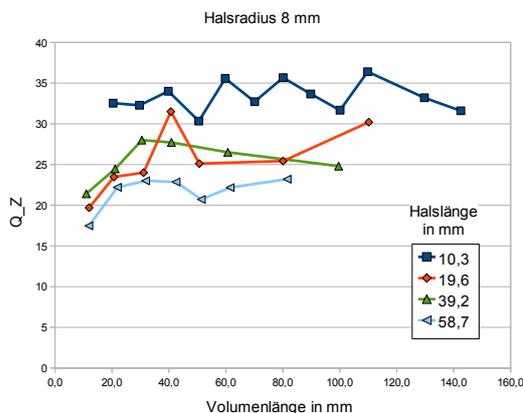


Abb. 4.18.: Güte der akustischen Impedanz in Abhängigkeit des Volumens für  $r_H = 8$  mm

Abb. 4.19 zeigt die Güte über alle gemessenen Volumens pro Messserie arithmetisch gemittelt, um für jede Halsabmessung nur einen Wert zu erhalten, und über dem Halsradius aufgetragen. Es ist ersichtlich, dass die Güte mit dem Halsradius zunimmt. Abb. 4.20 zeigt die gleichen Ergebnisse über der Halslänge aufgetragen. Die Güte sinkt mit zunehmender Halslänge.

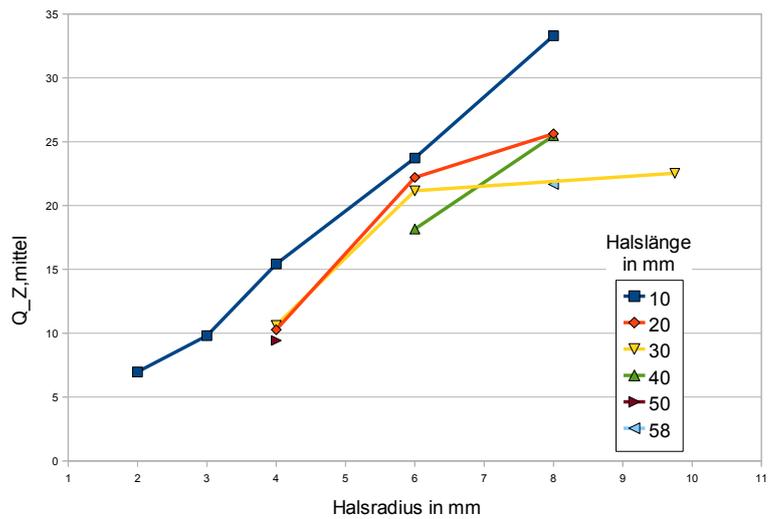


Abb. 4.19.: gemittelte Resonanzgüte der akustischen Impedanz über dem Halsradius

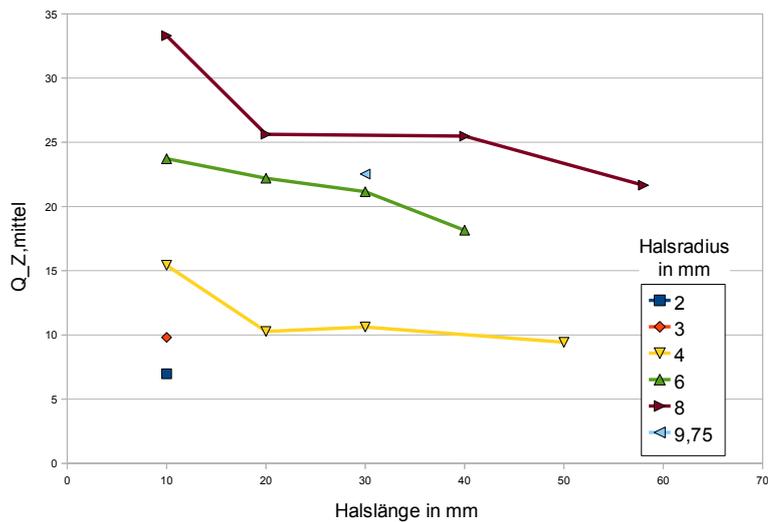


Abb. 4.20.: gemittelte Resonanzgüte der akustischen Impedanz über der Halslänge

Die Güte der akustischen Impedanz ist also vom Resonatorvolumen  $V$  unabhängig, mit den Halsabmessungen  $r_H$  und  $l_H$  lässt sich aber ein Zusammenhang feststellen. Im Gegensatz zu den Diagrammen der Abweichung der Resonanzfrequenz treten in Abb. 4.19 und 4.20 größere Unregelmäßigkeiten und weniger klar erkennbare Funktionen auf, die sich in mehreren Kurven wiederholen. Trotzdem wollen wir versuchen, die Tendenz der Güte bei Veränderung der Parameter als Näherung zu formulieren.

### Aufstellen einer Näherungsformel für $Q_Z$

Für Abb. 4.19 nehmen wir einen linearen Zusammenhang zwischen  $Q_Z$  und  $r_H$  an. Es soll in etwa gelten

$$Q_Z(r_H, l_H) = Q_Z(r_H) + Q_Z(l_H) \approx 2,5 \cdot r_H + Q_Z(l_H) \tag{4.7}$$

Zwischen  $l_H$  und  $Q_Z$  nehmen wir ebenfalls eine lineare Abhängigkeit an, so dass sich die Formel vollständig ergibt zu

$$Q_Z \approx 2,5 \cdot r_H + 7 - 0,1 \cdot l_H \tag{4.8}$$

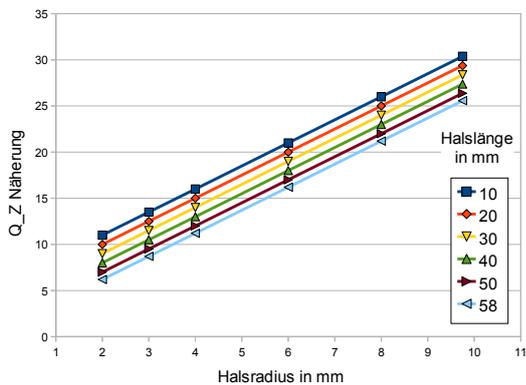


Abb. 4.21.: Näherungsfunktion für die Güte der akustischen Impedanz über dem Halsradius

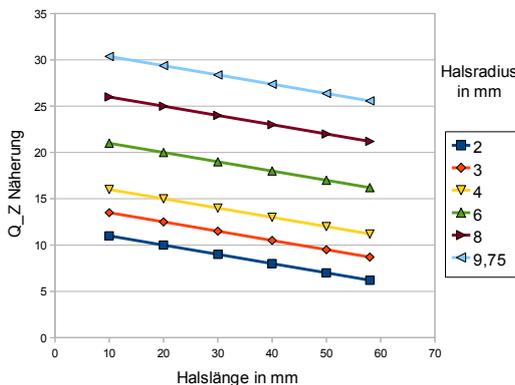


Abb. 4.22.: Näherungsfunktion für die Güte der akustischen Impedanz über der Halslänge

Abb. 4.21 und 4.22 zeigen die Näherungen graphisch über  $r_H$  und  $l_H$  zum Vergleich mit Abb. 4.19 und 4.20.

Wir haben nun eine mathematische Beschreibung für die Güte der Impedanz gefunden. Allerdings wird die Wirkungsweise eines Absorbers im Schallfeld besser durch den Absorptionsgrad  $\alpha$  als durch seine Wandimpedanz bzw. Wandadmittanz beschrieben.

#### 4.4.2. Halbwertsbreite des Absorptionsgrads

Der Absorptionsgrad wird aus dem Reflexionsfaktor berechnet, er ist also ein Verhältnis von Schallintensitäten (siehe Kap. 2.2.1). Die Güte eines Schwingkreises wird allerdings aus folgenden Größen berechnet: dem direkt vor dem Resonator auftretenden Druck  $\underline{p}(0)$ , der Schallschnelle  $\underline{v}(0)$  oder der Wandimpedanz  $\underline{Z}_a(0)$ . Dies ist in Analogie mit der Elektrotechnik zu sehen, dort wird die Güte ebenfalls aus der gemessenen Spannung, dem Strom oder der Impedanz bestimmt.

Allerdings wäre es trotzdem sehr interessant, die Halbwertsbreite des Absorptionsgrads mit der gleichen Vorgehensweise wie die Güte  $Q_Z$  aus der Impedanzkurve zu bestimmen. Das Verfahren wird daher auf den Frequenzverlauf des Absorptionsgrads adaptiert und als Halbwertsbreite bzw. Güte des Absorptionsgrads  $Q_\alpha$  bezeichnet. Es werden ebenfalls die Grenzfrequenzen beim  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ -fachen des maximalen Absorptionsgrads  $\alpha_{max}$  ausgelesen und damit die Halbwertsbreite  $Q_\alpha$  berechnet (analog zu S. 27).

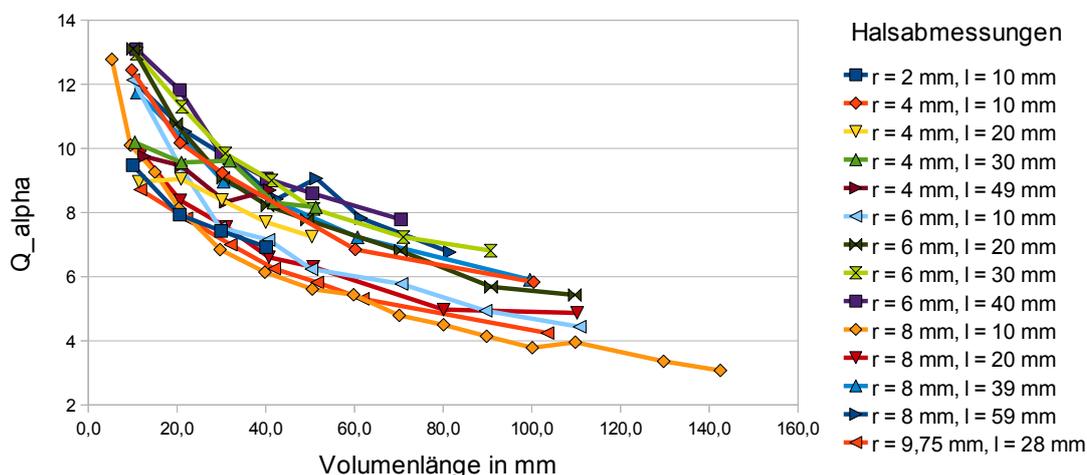


Abb. 4.23.: Güte des gemessenen Absorptionsgrads

Abb. 4.23 zeigt die Güte des Absorptionsgrads  $Q_\alpha$  mit -3 dB Bandbreite. Es ist offensichtlich zu sehen, dass die Güte mit zunehmendem Volumen sinkt.

Die Abhängigkeit von  $Q_\alpha$  von den Halsabmessungen  $r_H$  und  $l_H$  sind in Abb. 4.24 und 4.25 dargestellt, wiederum über die Volumina arithmetisch gemittelt. Zwar lassen sich bei beiden Tendenzen erkennen, nämlich dass  $Q_\alpha$  mit dem Halsradius in etwa linear fällt und mit der Halslänge leicht zunimmt. Dies stimmt bei den Messergebnissen aber nicht immer, es gibt auch Ausnahmen. Betrachtet man noch einmal Abb. 4.23, so verschiebt sich die Kurve nur sehr leicht in vertikaler Richtung bei Variation Halsparameter, zumindest für die hier verwendeten Halsabmessungen.

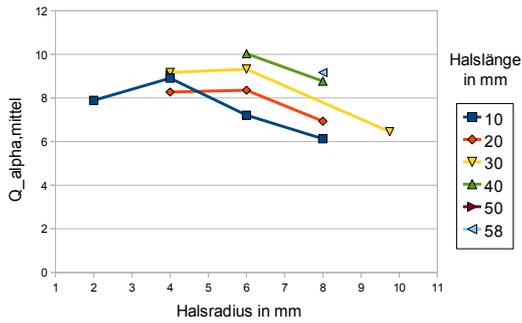


Abb. 4.24.: über Volumina gemittelte Güte des Absorptionsgrads über  $r_H$

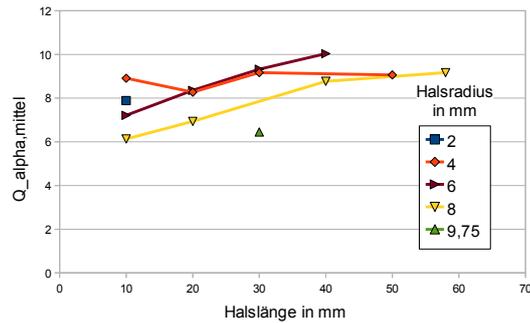


Abb. 4.25.: über Volumina gemittelte Güte des Absorptionsgrads über  $l_H$

Wir wollen dennoch versuchen, aus den gewonnenen Erkenntnissen eine Richtlinie abzuleiten, mit deren Hilfe man die Güte des Absorptionsgrads eines Helmholtzresonators zumindest in grober Näherung vorhersagen kann.

### Näherung für $Q_\alpha$

Da die Halsparameter in den hier auftretenden Fällen nur wenig Einfluss auf  $Q_\alpha$  haben und die Tendenzen der Kurven von Abb. 4.24 und 4.25 zu grobe Abweichungen haben, werden sie hier vernachlässigt. Es wird angenommen, dass die Güte des Absorptionsgrads allein vom Resonatorvolumen  $V$  abhängt.

Es ergibt sich ein logarithmischer Zusammenhang mit folgender graphisch ermittelten Funktion, dargestellt in Abb. 4.26.

$$Q_\alpha \approx -7 \cdot \log(200 \cdot V) \tag{4.9}$$

$V$  ist in  $m^3$  einzusetzen.

Es ist zu beachten, dass die Näherungskurve von sich aus schon eine Streuung hat, die eine Abweichung um  $\pm 2$  durch die Variation der Halsparameter mit sich ziehen kann. Die Formel ist daher nur als grobe Richtlinie anzusehen. Die Absolute Abweichung der Näherung ist in Abb. 4.27, 4.28 und 4.29 über  $Q_{\alpha, \text{gemessen}} - Q_{\alpha, \text{approx}}$  dargestellt.

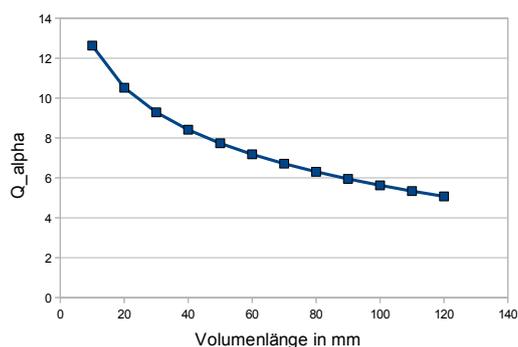


Abb. 4.26.: Näherungsfunktion für die Güte des Absorptionsgrads

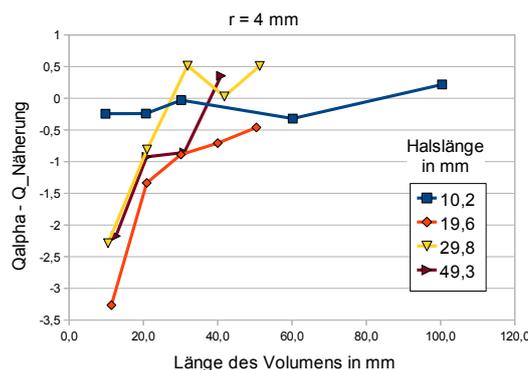


Abb. 4.27.: Absolute Abweichung der Näherung für  $Q_\alpha$  mit  $r_H = 4$  mm

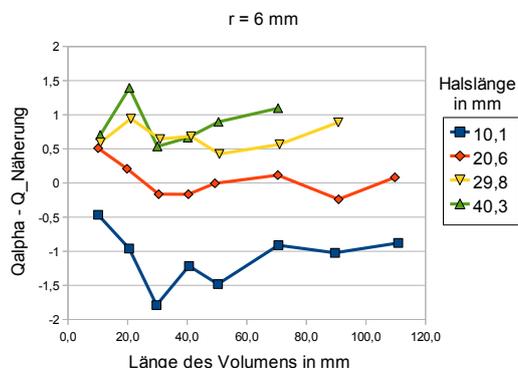


Abb. 4.28.: Absolute Abweichung der Näherung für  $Q_\alpha$  mit  $r_H = 6$  mm

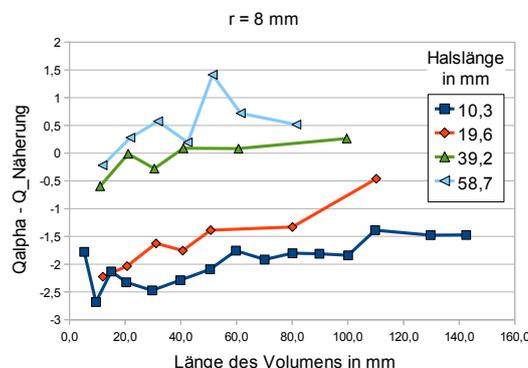


Abb. 4.29.: Absolute Abweichung der Näherung für  $Q_\alpha$  mit  $r_H = 8$  mm

### 4.5. Akustischer Reibwiderstand

Da mit den ausgelesenen Messwerten nun alle Parameter der Berechnungsformel für die Resonanzgüte  $Q_Z$  bekannt sind, bis auf den akustischen Reibwiderstand, ist es möglich, auf  $\Re_{a,ges}$  zurückzurechnen. In Abb. 4.30, 4.32 und 4.34 ist der gesamte Wirkwiderstand der Resonatoren über der Länge des Volumens aufgetragen. Der Gesamtwiderstand  $\Re_{a,ges}$  setzt sich aus der Belastung durch den Realteil der Strahlungsimpedanz  $\Re_{a,uS}$  und aus Reibungsverlusten  $\Re_{a,R}$  im Hals und Volumen zusammen.

$$\Re_{a,ges} = \frac{\rho \cdot c}{Q_Z} \sqrt{\frac{l_{H,eff}}{A_H V_H}} \tag{4.10}$$

$$\Re_{a,ges} = 2 \cdot \Re_{a,uS} + \Re_{a,R} \tag{4.11}$$

Über Gl. (4.11) kann nun der im Resonator wirksame Reibungswiderstand  $\Re_{a,R} = \Re_{a,ges} - 2 \cdot \Re_{a,uS}$  errechnet werden, siehe Abb. 4.36, 4.37 und 4.38. Der Realteil der Strahlungsimpedanz  $\Re_{a,uS}$  ist in Gl. (2.8) gegeben und in Abb. 4.31, 4.33 und 4.35 den Diagrammen von  $\Re_{a,ges}$  jeweils rechts nebenan gestellt.

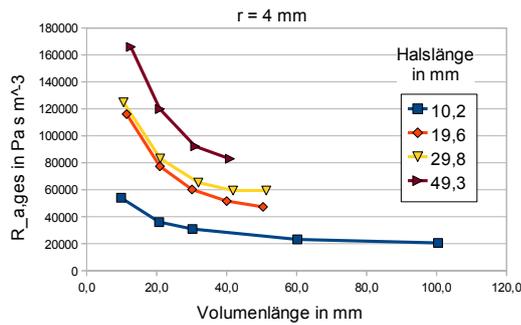


Abb. 4.30.: Gesamter akustischer Wirkwiderstand für  $r_H = 4$  mm

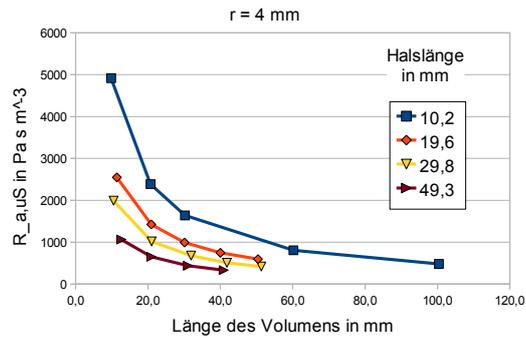


Abb. 4.31.: Realteil der Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran für  $r_H = 4$  mm

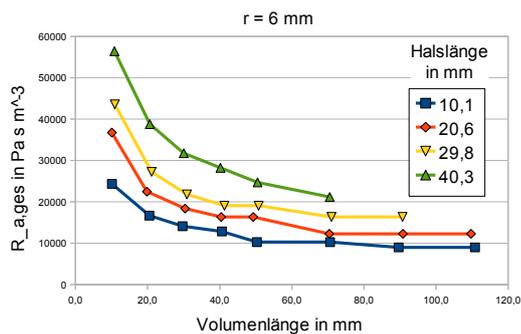


Abb. 4.32.: Gesamter akustischer Wirkwiderstand für  $r_H = 6$  mm

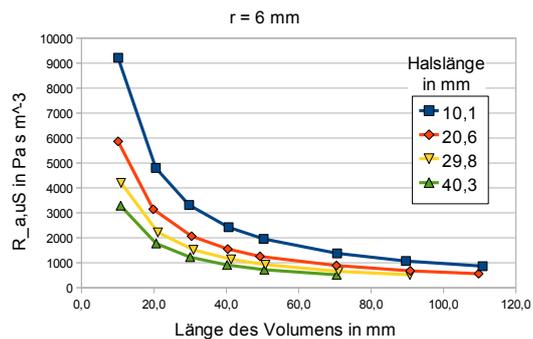


Abb. 4.33.: Realteil der Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran für  $r_H = 6$  mm

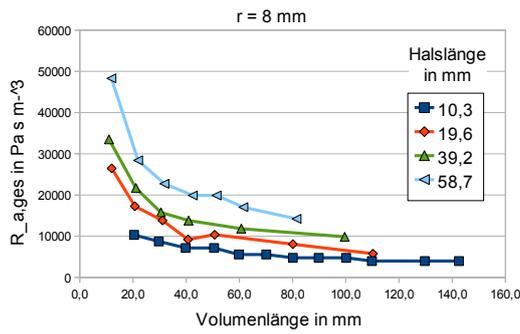


Abb. 4.34.: Gesamter akustischer Wirkwiderstand für  $r_H = 8$  mm

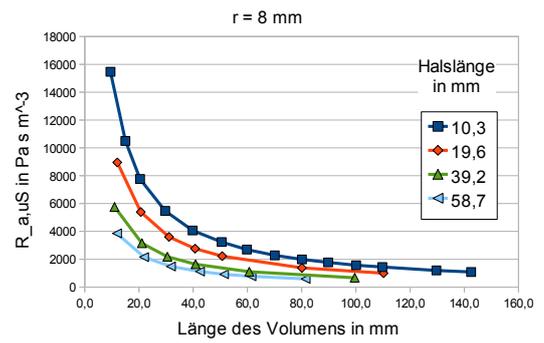


Abb. 4.35.: Realteil der Strahlungsimpedanz der Kolbenmembran für  $r_H = 8$  mm

In den folgenden Abb. 4.36, 4.37 und 4.38 sehen wir nun die aus  $\mathfrak{R}_{a,ges}$  und  $\mathfrak{R}_{a,uS}$  errechneten akustischen Reibwiderstände  $\mathfrak{R}_{a,R}$ .

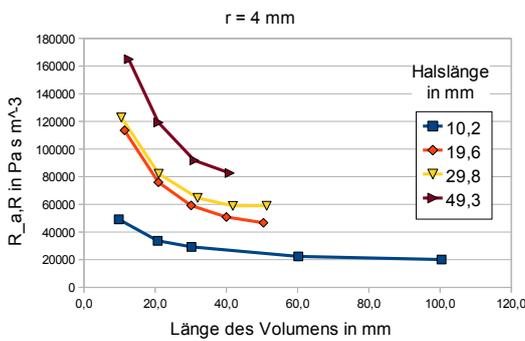


Abb. 4.36.: Akustischer Reibwiderstand für  $r_H = 4$  mm

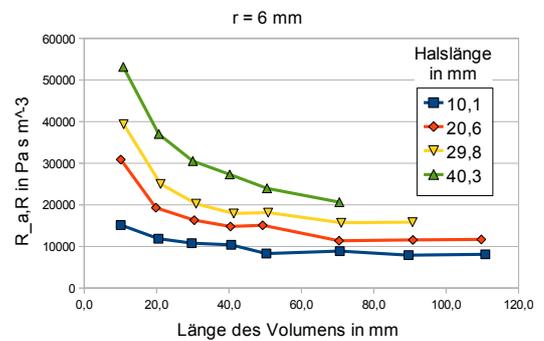


Abb. 4.37.: Akustischer Reibwiderstand für  $r_H = 6$  mm

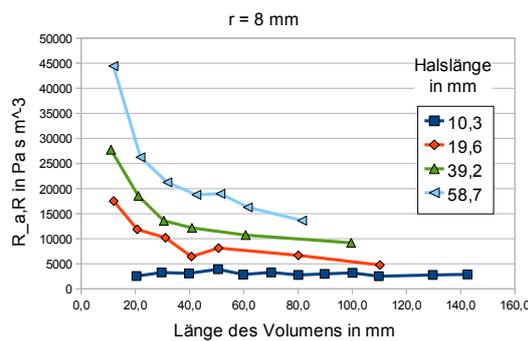


Abb. 4.38.: Akustischer Reibwiderstand für  $r_H = 8$  mm

### 4.5.1. Einfluss der Volumenparameter

Zu kleineren Volumina hin sieht man in den Abb. 4.36, 4.37 und 4.38 eine deutliche Zunahme von  $\Re_{a,R}$ . Gegen große Volumina läuft  $\Re_{a,R}$  auf einen konstanten Wert zu. Ist das Volumen groß genug, ist  $\Re_{a,R}$  nur noch von den Halsparametern abhängig. Eine Richtlinie, ab welcher Größe das Volumen keine zusätzlichen Reibungsverluste verursacht, lässt sich aus den Messdaten nicht ableiten, da hier weitere Messdaten pro Kurve mit noch größeren Volumina nötig wären. Dies ließ der Messbereich des Impedanzrohrs leider nicht zu.

### 4.5.2. Einfluss der Halsparameter

In den drei Diagrammen von  $\Re_{a,R}$  v ist deutlich zu erkennen, dass  $\Re_{a,R}$  mit wachsender Halslänge steigt, da damit auch mehr Reibungsfläche im Hals gegeben ist. Vergleicht man Abb. 4.36, 4.37 und 4.38 untereinander für konstante  $l_H$ , so nimmt  $\Re_a$  mit steigendem Halsradius ab. Je größer die Öffnungsfläche ist, desto geringer werden die Reibungsverluste im Resonatorhals, da das Verhältnis von Zähigkeitswelle  $\lambda_\eta$  zu Halsradius  $r_H$  immer kleiner wird. (Zähigkeitswellenlänge  $\lambda_\eta = \frac{13,7}{\sqrt{f}}$  [mm] [8]. Der Luftpfropfen im Hals kann also immer ungehinderter schwingen.

### 4.5.3. Maximaler Absorptionsgrad

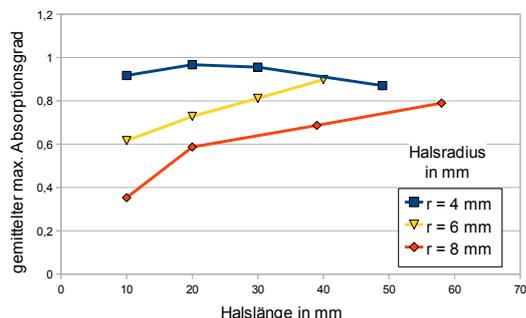


Abb. 4.39.: Gemittelte maximale Absorptionsgrade einiger Messserien

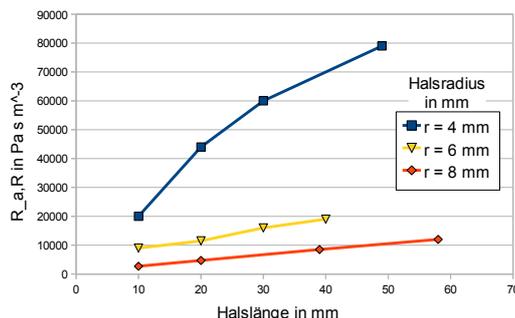


Abb. 4.40.: Akustischer Widerstand für  $V \gg$

Da wie in Kap. 4.4.2 festgestellt die Parameter der Halsöffnung  $r_H$  und  $l_H$  kaum Einfluss auf die Bandbreite des Absorptionsgrads haben, könnte man meinen, dass sie beim Entwurf von Helmholtzresonatoren beinahe beliebig und nur in passendem Verhältnis gewählt werden müssen. Sieht man sich aber den maximalen Absorptionsgrad in den Messgrafiken in Anhang A.2 an, stellt man fest, dass  $\alpha_{max}$  mit dem akustischen Reibwiderstand  $\Re_{a,R}$  (Abb. 4.36, 4.37 und 4.38) zusammenhängt. Dies verdeutlicht der Vergleich von Abb. 4.39 mit Abb. 4.40. In Abb. 4.39 wurden die maximalen Absorptionsgrade für jede Messserie arithmetisch gemittelt und über der Halslänge aufgetragen.

Abb. 4.40 zeigt zu den selben Messungen die aus der Güte  $Q_Z$  errechneten  $\Re_{a,R}$ . Es wurde jeweils ein Wert geschätzt, auf den die Kurve von  $\Re_{a,R}$  bei  $V \gg$  zuläuft.

Ein hoher durch die Halsöffnung verursachter Widerstand hat auch einen hohen maximalen Absorptionsgrad zur Folge. Will man eine hohe Absorptionseffektivität erreichen, so müssen  $r_H$  möglichst klein und  $l_H$  möglichst groß gewählt werden.

## 4.6. Zusammenfassung der neuen Erkenntnisse

Die Messungen haben gezeigt, dass zumindest im Fall der hier verwendeten Messproben und unter ebenem Schalleinfall die Formel für die Mündungskorrektur einer Verbesserung bedarf. Die Resonanzfrequenz eines Helmholtzresonators lässt sich somit genauer berechnen zu

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{r_H^2 \pi}{V \cdot \left( l_H + 2 \cdot \left( 0,54r_H + e^{\frac{l_H}{36000}} \right) \right)}}$$

Bei der Dimensionierung des Volumens muss berücksichtigt werden, dass die Tiefe des Volumens nicht zu gering ist, um eine Beeinträchtigung der Schwingung im Hals zu vermeiden. Der Abstand zwischen der Frontplatte mit dem Hals und der parallel begrenzenden Rückwand des Volumens sollte mehr als 2 cm betragen, damit die Formel für  $f_H$  stimmt.

Die Güte der Impedanz  $Q_Z$  wird durch die Halsabmessungen bestimmt. Die Güte nimmt mit steigendem Halsradius und fallender Halslänge zu. Sie kann mit der groben empirischen Formel

$$Q_Z \approx 2,5 \cdot r_H + 7 - 0,1 \cdot l_H$$

abgeschätzt werden, die aber höchstwahrscheinlich nur für die in dieser Arbeit durchgeführten Messungen gilt und gerade bei Anwendung im diffusen Schallfeld nicht funktionieren muss.

Ist die  $Q_Z$  bekannt, so lässt sich der akustische Widerstand im Absorber abschätzen (siehe ), was nützlich zur Steuerung der Absorptionseffektivität ist. Jedenfalls ist vorhersehbar, in welche Richtung sich  $\Re_{a,R}$  bei Variation der Halsparameter bewegt: Vergrößert man  $r_H$ , sinkt  $\Re_{a,R}$ , vergrößert man  $l_H$ , so steigt  $\Re_{a,R}$ .

Im Gegensatz dazu ist die Güte des Absorptionsgrads  $Q_\alpha$  weitgehend nur vom Volumen abhängig, die Einflüsse von  $r_H$  und  $l_H$  sind weniger gewichtig. Für  $Q_\alpha$  kann die empirische Näherung

$$Q_\alpha \approx -7 \cdot \log(200 \cdot V)$$

angegeben werden.

## 5. Schluss

### 5.1. Relevanz der Ergebnisse für die Praxis

Da Helmholtzresonatoren in der praktischen Anwendung als Schallabsorber meistens im tieffrequenten Bereich zur Bedämpfung von Raummoden oder in Bassreflexgehäusen zum Einsatz kommen, kann man aus den Ergebnissen dieser Arbeit einige Richtlinien zur Dimensionierung aufstellen. Zu den eben genannten Zwecken wird im allgemeinen eine Resonanzfrequenz im tieffrequenten Bereich benötigt. Die Absorptionseffektivität soll maximal sein bei einer möglichst niedrigen Güte, damit der Absorber etwas breitbandiger wirkt und leichte Abweichungen durch Parameterschwankungen und Fertigungsungenauigkeiten nicht zur Folge haben, dass der Resonator bei der gewünschten Frequenz nicht mehr effektiv arbeitet.

Für die Anwendung zählt nur die Absorptionswirkung des Resonators, weshalb hier ausschließlich der Absorptionsgrad zählt. Wird dessen Bandbreite möglichst groß gewünscht, muss das Volumen so groß wie möglich gewählt werden. Um einen hohen maximalen Absorptionsgrad zu erhalten müssen die Reibungsverluste im Hals hoch sein. Dies erreicht man, indem Halsradius möglichst klein und Halslänge groß gewählt werden.

### 5.2. Ausblick

Genauso viele Problemstellungen, die nicht in der Arbeit abgehandelt werden konnten (siehe Kap. 1.2.1) sind während der Arbeit aufgetreten. Die Effekte der Verschiebung von  $f_H$  bei kleinen Volumina ist noch nicht zur Gänze geklärt.

Weiterhin bestehen die Ideen, Resonatoren mit mehreren Öffnungen genauer zu untersuchen und die Auskleidung des Resonatorhalses mit akustischen Dämmstoffen, was mit Sicherheit ebenfalls sehr komplex zu beschreiben ist. In kleinen Vorab-Messungen wurde nämlich festgestellt, dass sich nicht nur die Güte des Resonators durch Einbringen eines zusätzlichen akustischen Widerstands ändert, sondern dass sich auch  $f_H$  verschiebt.

Letztlich wäre eine Verifizierung der Ergebnisse im diffusen Schallfeld möglich. Dazu ist es nötig, großflächige Helmholtzresonatoren mit großem Wirkungsgrad aufzubauen und im Hallraum zu messen.



## Literaturverzeichnis

- [1] Cremer, Lothar und Müller, Helmut: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band 1. Stuttgart 1978, 2. Auflage.
- [2] Friesecke, Andreas: Die Audio-Enzyklopädie, Ein Nachschlagewerk für Tontechniker. München 2007, 1. Auflage.
- [3] Görne, Thomas: Tontechnik. München 2008, 2. Auflage.
- [4] Böhmer, Erwin, Erhardt, Dieter und Oberschelp, Wolfgang: Elemente der angewandten Elektronik. Wiesbaden 2007, 15. Auflage.
- [5] Weselak, Werner und Graber, Gerhard: Raumakustik VO. Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz 2007, Version 5.1.
- [6] Graber, Gerhard: Elektroakustik VO. Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz 2007, Version 8.3.
- [7] Weselak, Werner: Akustische Messtechnik. Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz 2008, Version 2.0.
- [8] Weselak, Werner: Technische Akustik. Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz 2009, Version 6.0.
- [9] Brunnader, Rudolf: Diplomarbeit: Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter. Institut für Nachrichtentechnik und Wellenausbreitung, TU Graz 2002.
- [10] Truppe, Wolfgang und Kappler, Felix: Diplomarbeit: Messsystem für akustische Zweitore. Institut für Breitbandkommunikation, TU Graz 2008.
- [11] <http://de.wikipedia.org/wiki/Helmholtz>, 14.08.2009
- [12] Wiesinger, J. (2008): KFZ-Technik Wiesinger  
<http://www.kfztech.de/kfztechnik/motor/steuerung/psteig.htm>, 01.08.2009
- [13] [www.tmr-audio.de/faq.htm](http://www.tmr-audio.de/faq.htm), 5.08.2009



# A. Messprotokolle

## A.1. Messdaten in Tabellen

Es folgen die Messdaten mit einigen berechneten Daten zum Vergleich.  $\Delta f_{alt}$  bezeichnet die prozentuale Abweichung der gemessenen  $f_M$  von der mit der in der Literatur angegebenen Mündungskorrektur  $l_{H,eff} = l_H + 2 \cdot 0,85r_H$  berechneten  $f_H$ ,  $\Delta f_{neu}$  die prozentuale Abweichung mit der neuen Formel der Mündungskorrektur nach Gl. (4.5). In den letzten beiden Spalten stehen die reale Mündungskorrektur, die mit Gl. (4.2) aus der Messresonanzfrequenz ermittelt wurde, und die nach der neuen Gl. (4.5) berechnete  $\Delta l_{H,neu}$  zum Vergleich.

Es wurden alle Messungen mit weitem Mikrofonabstand durchgeführt, Ausnahmen sind explizit angegeben.

### A.1.1. Volumen mit vollem Rohrdurchmesser

Tab. A.1.: Messerie 1, Probe 1

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
2,00	10,1	10,0	27	190,43	-6	181,26	-1,25	179	2,59	2,4
2,00	10,1	20,3	24	132,96	-7,49	126,56	-2,81	123	2,84	2,4
2,00	10,1	29,9	27	110,13	-5,56	104,83	-0,79	104	2,52	2,4
2,00	10,1	40,1	27	95,1	-6,41	90,52	-1,68	89	2,66	2,4
2,00	10,1	50,0	27	85,16	-6,06	81,06	-1,31	80	2,6	2,4

Tab. A.2.: Messerie 2, Probe 4

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
3,00	10,1	9,7	24	271,86	-3,26	264,97	-0,74	263	3,07	2,94
3,00	10,1	20,4	24	187,46	-2,38	182,71	0,16	183	2,92	2,94
3,00	10,1	29,9	24	154,84	-2,48	150,92	0,05	151	2,94	2,94
3,00	10,1	40,3	24	133,37	-2,53	129,99	0	130	2,95	2,94
3,00	10,1	50,6	24	119,03	-2,54	116,01	-0,01	116	2,95	2,94
3,00	10,1	60,2	24	109,12	-2,86	106,36	-0,34	106	3	2,94

Tab. A.3.: Messerie 3, Probe 7

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
4,00	10,2	9,6	25	345,16	-2,65	343,14	-2,08	336	3,87	3,49
4,00	10,2	20,5	25	236,2	-0,93	234,82	-0,35	234	3,56	3,49
4,00	10,2	30,0	25	195,25	-0,64	194,11	-0,06	194	3,51	3,49
4,00	10,2	60,0	25	138,06	-0,77	137,26	-0,19	137	3,53	3,49
4,00	10,2	100,2	25	106,84	-1,72	106,21	-1,14	105	3,7	3,49

Tab. A.4.: Messerie 4, Probe 8

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
3,90	19,6	11,4	26	249,17	-2,88	244,09	-0,86	242	4,09	3,83
3,90	19,6	20,9	26	184,02	-1,64	180,28	0,4	181	3,74	3,83
3,90	19,6	30,1	26	153,35	-1,53	150,23	0,52	151	3,71	3,83
3,90	19,6	40,0	26	133,02	-1,52	130,31	0,53	131	3,71	3,83
3,90	19,6	50,4	26	118,51	-1,27	116,09	0,78	117	3,64	3,83

Tab. A.5.: Messerie 5, Probe 9

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
3,95	29,8	10,5	26	222,8	-3,95	216,66	-1,23	214	4,88	4,42
3,95	29,8	21,0	26	157,55	-2,89	153,2	-0,13	153	4,45	4,42
3,95	29,8	31,9	26	127,83	-2,99	124,3	-0,24	124	4,49	4,42
3,95	29,8	41,8	26	111,67	-2,39	108,59	0,38	109	4,25	4,42
3,95	29,8	51,3	26	100,8	-2,78	98,02	-0,02	98	4,41	4,42

Tab. A.6.: Messerie 6, Probe 8 + 9

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
4,00	49,3	12,6	23	165,28	-5,61	157,85	-1,17	156	6,83	6,09
4,00	49,3	20,9	23	128,33	-4,93	122,56	-0,46	122	6,38	6,09
4,00	49,3	31,0	23	105,37	-5,1	100,64	-0,63	100	6,49	6,09
4,00	49,3	40,9	23	91,73	-5,16	87,61	-0,7	87	6,54	6,09

Tab. A.7.: Messerie 7, Probe 10

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
6,00	10,1	10,1	25	461,89	-0,19	474,94	-2,93	461	5,14	4,56
6,00	10,1	20,5	25	324,21	2,09	333,37	-0,71	331	4,69	4,56
6,00	10,1	29,7	25	269,36	2,46	276,97	-0,35	276	4,62	4,56
6,00	10,1	40,6	25	230,38	2,44	236,89	-0,38	236	4,62	4,56
6,00	10,1	50,3	25	206,98	2,91	212,82	0,08	213	4,53	4,56
6,00	10,1	70,6	25	174,71	2,46	179,64	-0,36	179	4,62	4,56
6,00	10,1	89,6	25	155,08	1,88	159,46	-0,92	158	4,73	4,56
6,00	10,1	110,8	25	139,46	1,82	143,4	-0,97	142	4,74	4,56

Tab. A.8.: Messerie 8, Probe 10 + 11

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
6,00	20,6	10,1	25	374,98	-2,13	376,2	-2,45	367	5,78	5,01
6,00	20,6	19,8	26	268,29	-0,11	269,16	-0,43	268	5,13	5,01
6,00	20,6	30,4	26	216,52	0,22	217,23	-0,1	217	5,03	5,01
6,00	20,6	40,4	26	187,82	0,63	188,43	0,3	189	4,91	5,01
6,00	20,6	49,3	26	170,02	0,57	170,58	0,25	171	4,92	5,01
6,00	20,6	70,4	26	142,28	0,5	142,75	0,18	143	4,95	5,01
6,00	20,6	90,8	26	125,28	0,57	125,69	0,25	126	4,93	5,01
6,00	20,6	109,7	26	113,98	0,02	114,35	-0,31	114	5,09	5,01

Tab. A.9.: Messerie 9, Probe 12

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
6,00	29,8	10,9	26	317,3	-1,98	313,78	-0,89	311	5,92	5,53
6,00	29,8	21,1	26	228,05	-0,9	225,53	0,21	226	5,47	5,53
6,00	29,8	30,9	26	188,45	-0,77	186,37	0,34	187	5,41	5,53
6,00	29,8	41,3	26	163,01	-0,62	161,2	0,49	162	5,35	5,53
6,00	29,8	50,8	26	146,98	-0,66	145,35	0,45	146	5,37	5,53
6,00	29,8	71,0	26	124,32	-1,06	122,95	0,04	123	5,53	5,53
6,00	29,8	90,7	26	110	-0,91	108,78	0,2	109	5,47	5,53

Tab. A.10.: Messerie 10, Probe 10 + 12

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
6,00	40,3	10,8	26	283,7	-3,42	277,19	-1,15	274	6,92	6,3
6,00	40,3	20,6	26	205,42	-2,15	200,7	0,15	201	6,22	6,3
6,00	40,3	30,0	26	170,22	-1,89	166,31	0,41	167	6,08	6,3
6,00	40,3	40,2	26	147,05	-1,39	143,67	0,92	145	5,82	6,3
6,00	40,3	50,5	26	131,19	-1,67	128,18	0,64	129	5,97	6,3
6,00	40,3	70,5	26	111,04	-1,83	108,49	0,47	109	6,05	6,3

Tab. A.11.: Messerie 11, Probe 13; kurzer Mikrofonabstand

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
8,10	10,3	5,3	25	789,99	-4,56	832,53	-9,43	754	8,08	5,71
8,10	10,3	9,5	25	590,1	1	621,88	-4,16	596	6,66	5,71
8,10	10,3	15,0	25	469,61	4,34	494,89	-0,99	490	5,92	5,71

Tab. A.12.: Messerie 12, Probe 13

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
8,10	10,3	20,4	27	404,08	4,68	425,84	-0,67	423	5,85	5,71
8,10	10,3	29,7	27	334,89	6	352,93	0,59	355	5,57	5,71
8,10	10,3	39,8	27	289,29	5,77	304,87	0,37	306	5,62	5,71
8,10	10,3	50,5	27	256,82	6,69	270,65	1,24	274	5,44	5,71
8,10	10,3	59,8	27	236,01	5,93	248,72	0,52	250	5,59	5,71
8,10	10,3	70,1	27	217,98	5,97	229,72	0,56	231	5,58	5,71
8,10	10,3	80,1	27	203,92	5,92	214,9	0,51	216	5,59	5,71
8,10	10,3	89,8	27	192,59	5,4	202,97	0,02	203	5,7	5,71
8,10	10,3	100,1	27	182,42	5,25	192,24	-0,12	192	5,73	5,71
8,10	10,3	109,8	27	174,17	4,49	183,55	-0,85	182	5,89	5,71
8,10	10,3	129,7	27	160,26	4,21	168,88	-1,12	167	5,95	5,71
8,10	10,3	142,5	27	152,89	4	161,12	-1,32	159	5,99	5,71

Tab. A.13.: Messerie 13, Probe 14

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
8,15	19,6	12,0	24	447,29	1,28	459,09	-1,33	453	6,53	6,12
8,15	19,6	20,7	26	341,74	3	350,76	0,35	352	5,99	6,12
8,15	19,6	31,1	26	278,81	3,3	286,16	0,64	288	5,9	6,12
8,15	19,6	40,7	26	243,72	2,99	250,15	0,34	251	5,99	6,12
8,15	19,6	50,7	26	218,36	3,5	224,12	0,84	226	5,84	6,12
8,15	19,6	80,1	26	173,73	3,03	178,31	0,39	179	5,98	6,12
8,15	19,6	110,2	26	148,11	2,62	152,02	-0,01	152	6,1	6,12

Tab. A.14.: Messerie 14, Probe 15

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
8,10	39,2	11,0	26	370,44	-1,47	367,33	-0,63	365	7,7	7,34
8,10	39,2	21,1	26	267,46	0,2	265,22	1,05	268	6,79	7,34
8,10	39,2	30,5	26	222,46	0,69	220,59	1,54	224	6,54	7,34
8,10	39,2	40,9	26	192,1	0,47	190,49	1,32	193	6,65	7,34
8,10	39,2	60,7	26	157,69	0,2	156,37	1,04	158	6,8	7,34
8,10	39,2	99,6	26	123,1	-0,08	122,07	0,76	123	6,94	7,34

Tab. A.15.: Messerie 15, Probe 14 + 15

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
8,10	58,7	11,9	23	302,93	-1,96	292,62	1,5	297	8,36	9,48
8,10	58,7	21,9	23	223,3	-1,03	215,7	2,46	221	7,66	9,48
8,10	58,7	31,8	23	185,31	-0,17	179	3,35	185	7,02	9,48
8,10	58,7	42,5	23	160,29	-0,81	154,84	2,69	159	7,49	9,48
8,10	58,7	51,4	23	145,76	-0,52	140,8	2,99	145	7,28	9,48
8,10	58,7	61,5	23	133,25	-0,94	128,72	2,55	132	7,59	9,48
8,10	58,7	81,5	23	115,75	-0,65	111,81	2,85	115	7,38	9,48

Tab. A.16.: Messerie 16, Probe 16

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,alt}$	$\Delta f_{alt}$	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	%	Hz	mm	mm
9,75	29,7	11,7	26	462,57	-0,12	470,25	-1,76	462	8,36	7,55
9,75	29,7	22,1	26	336,57	1,91	342,16	0,25	343	7,44	7,55
9,75	29,7	32,1	26	279,27	2,77	283,9	1,09	287	7,07	7,55
9,75	29,7	41,9	26	244,44	2,28	248,49	0,61	250	7,28	7,55
9,75	29,7	51,6	26	220,26	2,6	223,92	0,93	226	7,14	7,55
9,75	29,7	61,9	26	201,11	2,43	204,45	0,76	206	7,21	7,55
9,75	29,7	103,5	26	155,52	1,59	158,11	-0,07	158	7,58	7,55

### A.1.2. Volumen mit verkleinertem Durchmesser

Die folgenden Messserien sind mit dem durch die MDF-Ringe auf 5 cm verkleinerten Volumendurchmesser aufgenommen. Sie werden mit einem vorangestellten  $k$  bezeichnet.

Tab. A.17.: Messerie k1, Probe 1

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
2,00	10,2	19,8	25	255,72	-7,71	236	2,43	2,4
2,00	10,2	30,0	25	207,75	-7,58	192	2,41	2,4
2,00	10,2	39,4	25	181,28	-6,77	169	2,28	2,4
2,00	10,2	49,7	26	161,69	-8,46	148	2,56	2,4
2,00	10,2	59,3	26	148,02	-8,12	136	2,5	2,4

Tab. A.18.: Messerie k2, Probe 2 + 3

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
1,95	20,4	19,7	26	190,17	-8,5	174	3,09	2,8
1,95	20,4	29,9	26	154,36	-9,3	140	3,32	2,8
1,95	20,4	39,6	26	134,13	-9,04	122	3,25	2,8
1,95	20,4	49,9	26	119,49	-12,13	105	4,21	2,8

Tab. A.19.: Messerie k3, Probe 5

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
2,98	19,6	19,6	25	289,55	-4,68	276	2,55	3,3
2,98	19,6	29,6	25	235,62	-5,78	222	2,84	3,3
2,98	19,6	39,2	25	204,74	-5,74	193	2,83	3,3
2,98	19,6	58,8	25	167,17	-6,68	156	3,09	3,3
2,98	19,6	68,9	25	154,43	-7,4	143	3,29	3,3
2,98	19,6	88,4	25	136,34	-8,32	125	3,55	3,3

Tab. A.20.: Messerie k4, Probe 4 + 5

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
2,98	30,2	19,4	25	241,82	-6,54	226	3,52	3,9
2,98	30,2	29,5	25	196,1	-6,68	183	3,57	3,9
2,98	30,2	39,0	25	170,55	-7,36	158	3,85	3,9
2,98	30,2	58,5	25	139,26	-8,08	128	4,14	3,9
2,98	30,2	68,6	25	128,6	-8,24	118	4,21	3,9
2,98	30,2	88,1	25	113,48	-9,23	103	4,63	3,9

Tab. A.21.: Messerie k5, Probe 5 + 6

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
2,98	39,2	19,7	25	212,85	-7,45	197	4,53	4,6
2,98	39,2	29,7	25	173,35	-6,55	162	4,06	4,6
2,98	39,2	39,2	25	150,89	-7,22	140	4,41	4,6
2,98	39,2	58,8	25	123,2	-9,9	111	5,86	4,6

Tab. A.22.: Messerie k6, Probe 7

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
4,00	10,2	20,1	26	475,44	-9,14	432	3,79	3,5
4,00	10,2	30,3	26	387,23	-8,84	353	3,73	3,5
4,00	10,2	39,7	26	338,3	-7,48	313	3,47	3,5
4,00	10,2	50,0	26	301,45	-8,11	277	3,59	3,5
4,00	10,2	59,4	26	276,57	-7,44	256	3,47	3,5
4,00	10,2	89,1	26	225,82	-8,33	207	3,63	3,5

Tab. A.23.: Messerie k7, Probe 8

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
3,90	19,6	20,2	26	367,04	-8,18	337	4,02	3,8
3,90	19,6	30,0	26	301,18	-5,71	284	3,3	3,8
3,90	19,6	40,0	26	260,83	-7,22	242	3,73	3,8
3,90	19,6	50,1	26	233,06	-7,32	216	3,76	3,8
3,90	19,6	59,6	26	213,68	-6,87	199	3,63	3,8
3,90	19,6	89,4	26	174,47	-7,72	161	3,88	3,8

Tab. A.24.: Messerie k8, Probe 13; kurzer Mikrofonabstand

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
8,10	10,3	20,2	27	855,68	-7,79	789	5,76	5,7
8,10	10,3	30,5	27	696,36	-6,95	648	5,56	5,7
8,10	10,3	39,9	27	608,83	-6,54	569	5,47	5,7
8,10	10,3	49,8	27	544,97	-6,23	511	5,4	5,7
8,10	10,3	59,4	27	498,99	-6,61	466	5,49	5,7
8,10	10,3	89,2	27	407,2	-8,89	371	6,03	5,7

Tab. A.25.: Messerie k9, Probe 14; kurzer Mikrofonabstand

$r_H$	$l_H$	$l_V$	Temp.	$f_{H,neu}$	$\Delta f_{neu}$	$f_M$	$\Delta l_{H,real}$	$\Delta l_{H,neu}$
mm	mm	mm	°C	Hz	%	Hz	mm	mm
8,15	19,6	20,3	26	707,85	-7,47	655	6,1	6,1
8,15	19,6	39,9	27	505,77	-6,08	475	5,63	6,1
8,15	19,6	50,0	27	451,81	-6,16	424	5,65	6,1
8,15	19,6	59,4	27	414,52	-6,16	389	5,66	6,1
8,15	19,6	69,2	27	384,05	-6	361	5,6	6,1
8,15	19,6	88,8	27	339,03	-6,79	316	5,87	6,1

Tab. A.26.: Mündungskorrekturen über jeweilige Messserie gemittelt; kleine Volumina  $l_V < 20$  mm ausgenommen, siehe Abb. 4.4 und 4.5

$\Delta l_H$ [mm]	$r_H$ [mm]					
$l_H$ [mm]	2	3	4	6	8	9,75
10	2,44	2,96	3,58	4,64	5,69	
20	3,59	3,12	3,69	4,97	5,96	
30		4,08	4,38	5,43		7,26
40		4,78		5,98	6,73	
50			6,51			
59					7,35	

## A.2. Messdiagramme

### A.2.1. Volumen mit vollem Rohrdurchmesser

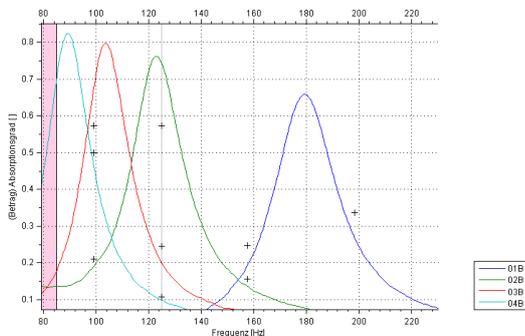


Abb. A.1.: Absorptionsgrad Messserie 1, siehe Tab. A.1

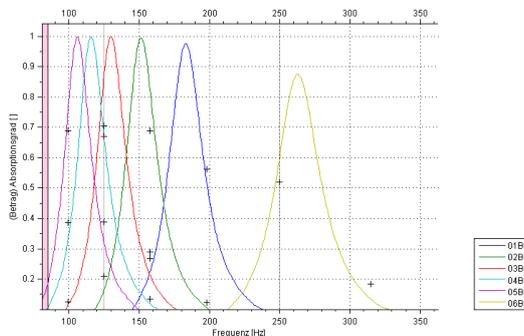


Abb. A.2.: Absorptionsgrad Messserie 2, siehe Tab. A.2

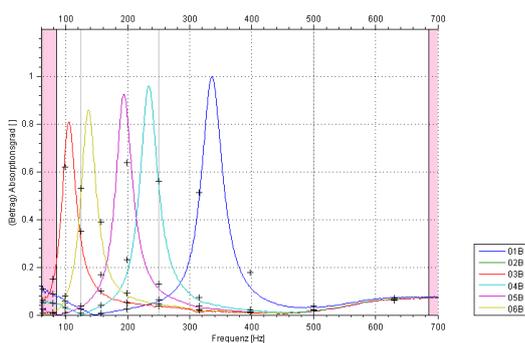


Abb. A.3.: Absorptionsgrad Messserie 3, siehe Tab. A.3

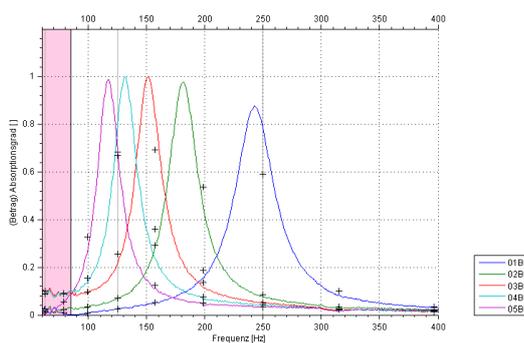


Abb. A.4.: Absorptionsgrad Messserie 4, siehe Tab. A.4

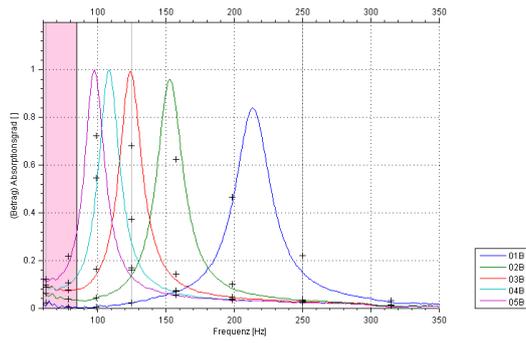


Abb. A.5.: Absorptionsgrad Messserie 5, siehe Tab. A.5

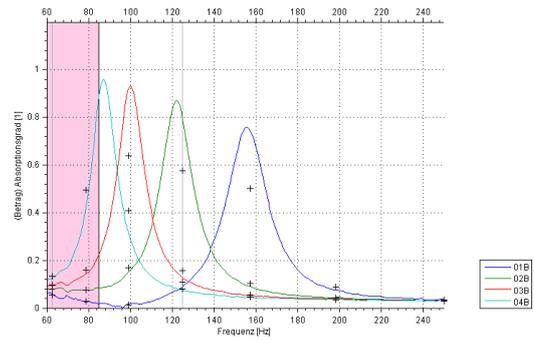


Abb. A.6.: Absorptionsgrad Messserie 6, siehe Tab. A.6

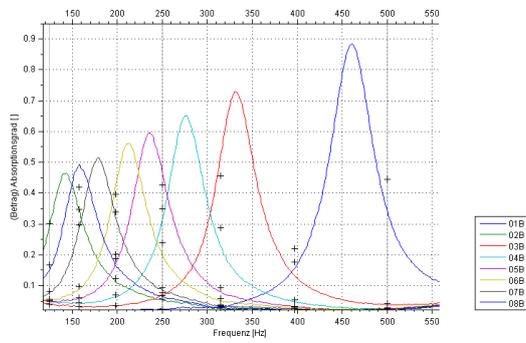


Abb. A.7.: Absorptionsgrad Messserie 7, siehe Tab. A.7

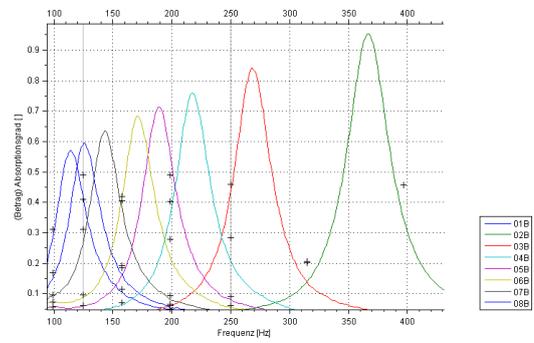


Abb. A.8.: Absorptionsgrad Messserie 8, siehe Tab. A.8

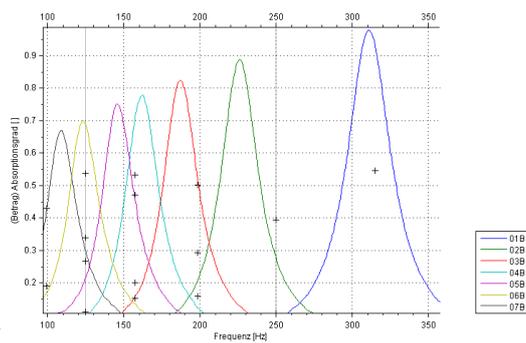


Abb. A.9.: Absorptionsgrad Messserie 9, siehe Tab. A.9

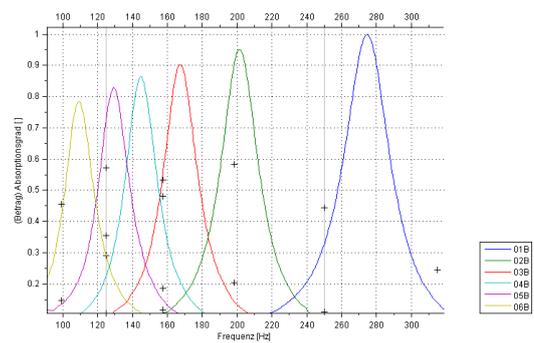


Abb. A.10.: Absorptionsgrad Messserie 10, siehe Tab. A.10

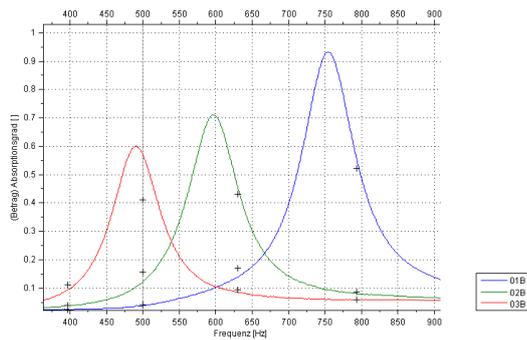


Abb. A.11.: Absorptionsgrad Messserie 11 mit kurzem Mikrofonabstand, siehe Tab. A.11

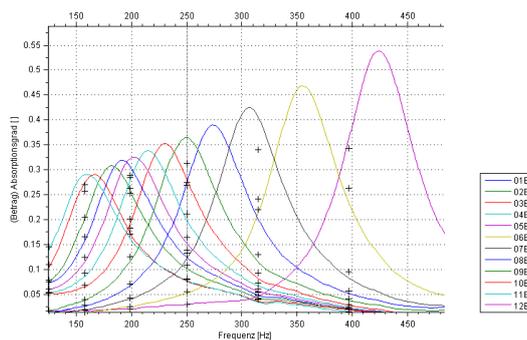


Abb. A.12.: Absorptionsgrad Messserie 12, siehe Tab. A.12

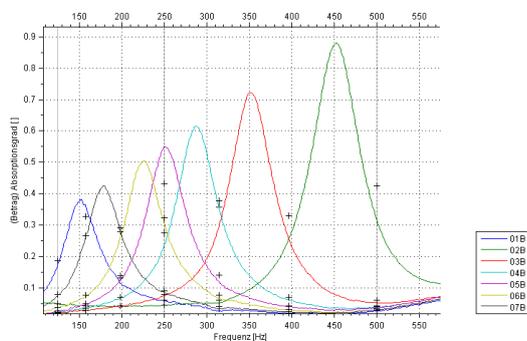


Abb. A.13.: Absorptionsgrad Messserie 13, siehe Tab. A.13

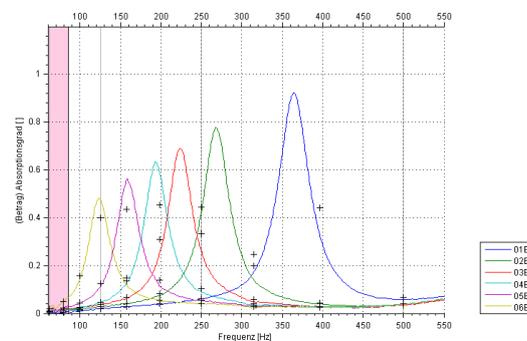


Abb. A.14.: Absorptionsgrad Messserie 14, siehe Tab. A.14

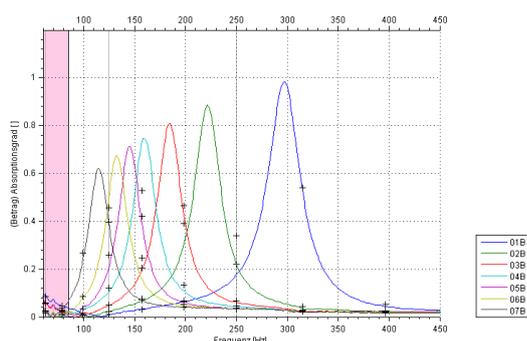


Abb. A.15.: Absorptionsgrad Messserie 15, siehe Tab. A.15

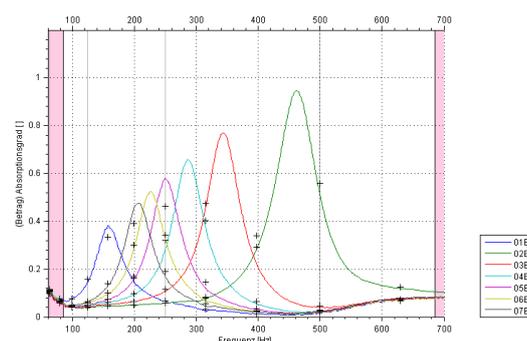


Abb. A.16.: Absorptionsgrad Messserie 16, siehe Tab. A.16

A.2.2. Volumen mit verkleinertem Durchmesser

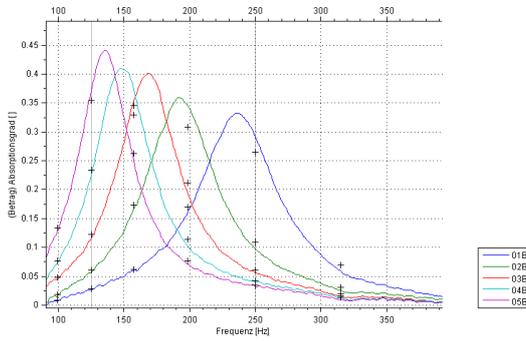


Abb. A.17.: Absorptionsgrad Messserie k1, siehe Tab. A.17

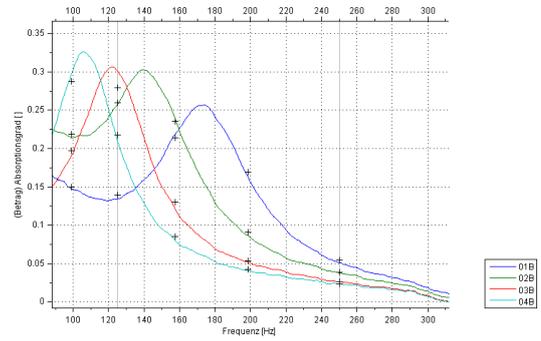


Abb. A.18.: Absorptionsgrad Messserie k2, siehe Tab. A.18

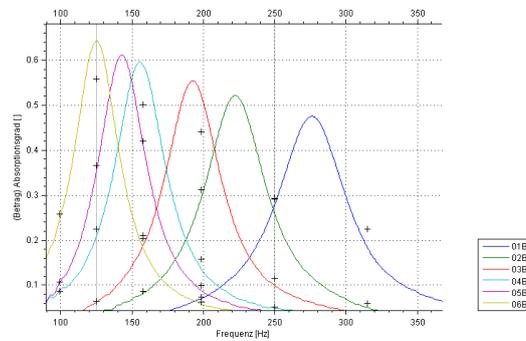


Abb. A.19.: Absorptionsgrad Messserie k3, siehe Tab. A.19

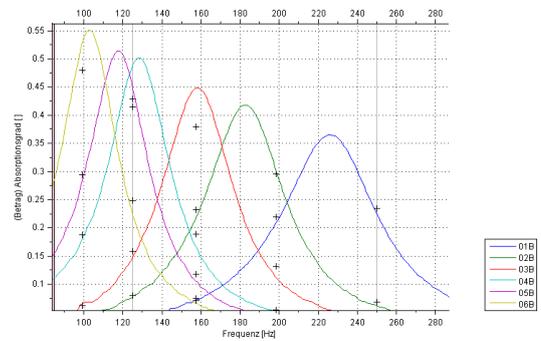


Abb. A.20.: Absorptionsgrad Messserie k4, siehe Tab. A.20

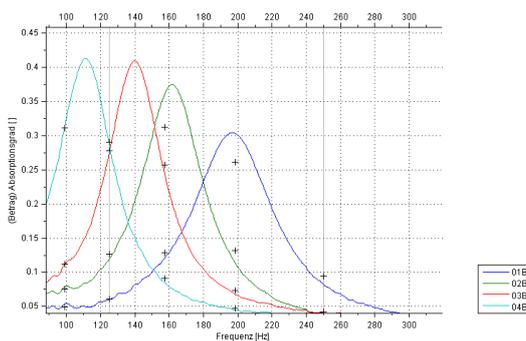


Abb. A.21.: Absorptionsgrad Messserie k5, siehe Tab. A.21

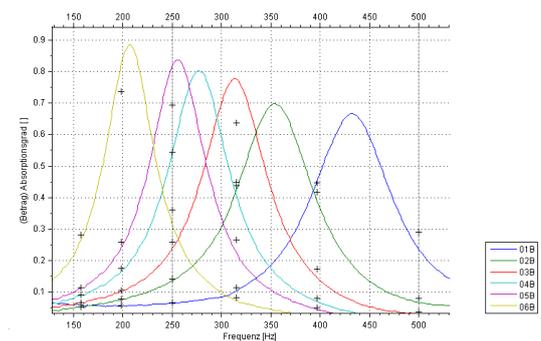


Abb. A.22.: Absorptionsgrad Messserie k6, siehe Tab. A.22

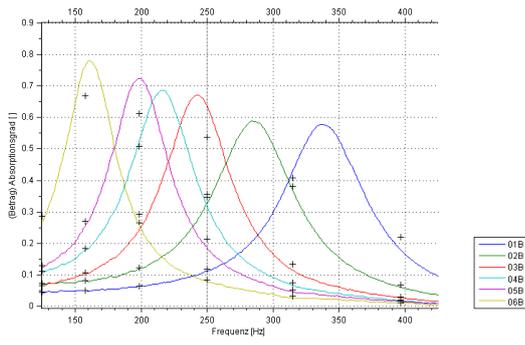


Abb. A.23.: Absorptionsgrad Messserie k7, siehe Tab. A.23

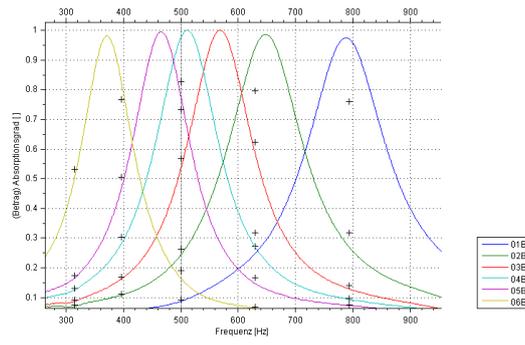


Abb. A.24.: Absorptionsgrad Messserie k8, siehe Tab. A.24

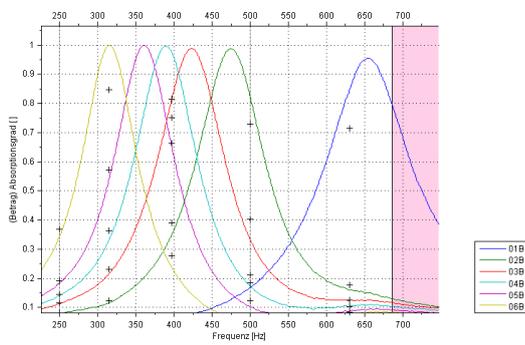


Abb. A.25.: Absorptionsgrad Messserie k9, siehe Tab. A.25



## B. Verwendete Abkürzungen und Formelzeichen

$A_H$ .....	Halsfläche der Mündungsöffnung
$A_{Rohr}$ .....	Querschnittsfläche des Impedanzrohrs
$c$ .....	Schallgeschwindigkeit
$C_a$ .....	akustische Nachgiebigkeit
$d$ .....	Durchmesser des Impedanzrohrs
$f_H$ .....	berechnete Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators
$f_{g,o}$ .....	obere -3 db Grenzfrequenz der gemessenen Wandadmittanz
$f_{g,u}$ .....	untere -3 db Grenzfrequenz der gemessenen Wandadmittanz
$f_M$ .....	gemessene Resonanzfrequenz des Helmholtzresonators
$f_o$ .....	obere Grenzfrequenz des Impedanzrohrs
$e$ .....	Euler-Zahl
$\underline{H}$ .....	komplexe Übertragungsfunktion
$l_{gemessen}$ .....	gemessene Länge von der Oberfläche der Probe bis zum Rohrkolben
$l_H$ .....	Länge der Mündungsöffnung
$l_{H,eff}$ .....	effektive Halslänge
$l_V$ .....	Länge des Resonatorvolumens
$k$ .....	Wellenzahl
$k_c$ .....	konstanter Faktor der Mündungskorrektur
$k_H$ .....	Wellenzahl des Helmholtzresonators bei Resonanz
$m_{a,H}$ .....	akustische Masse des Helmholtzresonators
$\underline{p}$ .....	komplexer Schalldruck
$Q_{gemessen}$ .....	aus der gemessenen Wandadmittanz ausgelesene Resonanzgüte
$Q_H$ .....	berechnete Resonanzgüte des Helmholtzresonators
$Q_Z$ .....	Resonanzgüte der akustischen Impedanz
$Q_\alpha$ .....	Güte des Absorptionsgrads
$R$ .....	Reflexionsgrad
$R_a$ .....	akustischer Widerstand
$\Re_{a,H}$ .....	reeller akustischer Widerstand des Helmholtzresonators
$\Re_{a,ges}$ .....	gesamter akustischer Wirkwiderstand
$\Re_{a,H,A}$ .....	akustischer Wirkwiderstand am Hals außen
$\Re_{a,H,I}$ .....	akustischer Wirkwiderstand am Hals innen
$\Re_{a,R}$ .....	akustische Reibungsverluste im Helmholtzresonator
$\Re_{a,uS}$ .....	Realteil der Strahlungsimpedanz einer Kolbenmembran

---

$r$ .....	Reflexionsfaktor
$r_H$ .....	Halsradius des Helmholtzresonators
$s$ .....	Mikrofonabstand des Impedanzrohrs
$s_{a,H}$ .....	akustische Federsteifigkeit des Helmholtzresonators
$V$ .....	Volumen des Helmholtzresonators
$X_0$ .....	Blindwiderstand bei der Resonanzfrequenz
$x_1, x_2$ .....	Mikrofonpositionen
$Y_a$ .....	Betrag der Wandimpedanz des Absorbers
$Y_{a,g}$ .....	Wert des Betrags der Wandimpedanz des Absorbers bei der Grenzfrequenz
$Y_{a,max}$ .....	Maximum des Betrags der Wandimpedanz des Absorbers bei der Resonanzfrequenz
$Z_a$ .....	Wandimpedanz des Absorbers
$\alpha$ .....	Absorptionsgrad
$\Delta f$ .....	Bandbreite
$\Delta f_{H,alt}$ .....	Abweichung der gemessenen von der mit herkömmlicher Mündungskorrektur berechneten Resonanzfrequenz
$\Delta f_{H,neu}$ .....	Abweichung der gemessenen von der mit neuer Mündungskorrektur berechneten Resonanzfrequenz
$\Delta l_H$ .....	einseitige Mündungskorrektur
$\Delta l_{H,neu}$ .....	neue Formel der einseitigen Mündungskorrektur
$\Delta l_{H,real}$ .....	aus der gemessenen Resonanzfrequenz rückgerechnete einseitige Mündungskorrektur
$\lambda$ .....	Wellenlänge
$\lambda_\eta$ .....	Zähigkeitswellenlänge
$\pi$ .....	Kreiszahl
$\rho$ .....	Dichte von Luft
$\omega_H$ .....	Kreisresonanzfrequenz des Helmholtzresonators
$\zeta(l_H)$ .....	von $l_H$ abhängiger Teil der Mündungskorrektur
dB .....	Dezibel
cm .....	Centimeter
l .....	Liter
Hz .....	Hertz
m .....	Meter
mm .....	Millimeter

---