
DIPLOMARBEIT

AKUSTIK–PRÜFSTAND FÜR KLEINE SCHALLDÄMPFER

Felix BRIELMAIER

Graz, Dezember 2013

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation
der Technischen Universität Graz

Leiter:

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gernot KUBIN

Universität für Musik und darstellende Kunst Graz

Betreuer:

Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner WESELAK

Begutachter:

Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard GRABER

Kurzfassung

Zur Qualitätsüberprüfung und Fehleroptimierung in der Akustik sind Messungen mit Impedanzrohren schon lange ein wichtiges Hilfsmittel. In dieser Arbeit wird die Problematik der Vermessung von kleinen Schalldämpfern behandelt.

Es wird ein variabel aufbaubarer Prüfstand nach der 4-Mikrofon-Methode entwickelt und gefertigt, mit dem die Durchgangsdämpfung von kleinen Schalldämpfern ermittelt werden kann. Dabei wird die Messung auf dem PAK-System der Firma Müller-BBM und in Matlab implementiert.

Die Theorie der Reflexionsschalldämpfer wird vorgestellt, mit deren Kenntnis drei Prinzipschalldämpfer konstruiert und gefertigt werden, um den Prüfstand zu verifizieren und zu optimieren. Dazu werden die Messungen an diesen Prinzipschalldämpfern mit den berechneten Durchgangsdämpfungen verglichen. Weiters wird ein kombinierter, realer Schalldämpfer vermessen und seine Durchgangsdämpfung analysiert.

Abschließend werden mögliche Fehlerquellen, sowie eine Optimierung und Weiterentwicklung des Prüfstandes diskutiert.

Abstract

Measurements with impedance tubes are the most common tool used for quality control and error optimization of silencers. This work deals with the challenging issue of evaluating small sized silencers.

In order to measure the transmission loss of those small sized silencers, a variable test bench utilizing the 4-microphone-method, is developed and constructed. The actual measurements are performed in the PAK-system (Müller-BBM) and are evaluated in Matlab.

The setup of the test bench is optimized and verified using three principle silencers, that are designed and built, based on the underlying theory of reflection silencers. The actual measured transmission loss is compared against an analytical model. Further, a more complex silencer consisting of three combined Helmholtz resonators is measured and its transmission loss is analyzed. Finally, strategies for optimizing the test bench are outlined.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation	1
1.2	Gliederung der Arbeit	2
2	Grundlagen der Schalldämpfer	3
2.1	Allgemeines	3
2.2	Reflexionsschalldämpfer	4
2.2.1	Querschnittsprung	4
2.2.2	Verzweigung	6
2.2.3	$\lambda/4$ -Resonator	8
2.2.4	Querschnittsprung mit hineinstehendem Rohrstück	10
2.2.5	Helmholtz-Resonator	13
2.2.6	Kammerschalldämpfer	15
2.3	Kettenmatrixmethode	19
2.3.1	Einfaches Rohrstück	20
2.3.2	Querschnittsprung	21
2.3.3	Verzweigung	23
2.3.4	$\lambda/4$ -Resonator	24
2.3.5	Querschnittsprung mit hineinstehendem Rohrstück	25
2.3.6	Helmholtz-Resonator	28
2.3.7	Kammerschalldämpfer	29
2.3.8	$\lambda/4$ -Resonator mit Kammer	31
2.3.9	Helmholtz-Resonator mit zylindrischem Volumen	32
2.3.10	Beispiel-Schalldämpfer	34

3	Aufbau des Prüfstandes	37
3.1	Vorgaben	37
3.2	Einzelkomponenten	37
3.2.1	Lautsprecher	37
3.2.2	Messmikrofone	41
3.2.3	Messrohre	43
3.2.4	Anbindungsteile	46
3.3	Gesamtaufbau	48
4	Messablaufsteuerung	53
4.1	Kettenmatrixmethode	53
4.2	Messaufbau und Signalfluss	55
4.3	Messablauf	56
4.3.1	Müller–BBM PAK MKII Messsystem	56
4.3.2	Anregungssignal	56
4.3.3	Messvorgang	57
4.4	Implementierung in Matlab	66
4.4.1	Beschneidung der Zeitrohdaten	66
4.4.2	Übertragungsfunktionen	67
4.4.3	Berechnung der Kettenmatrixparameter	67
4.4.4	Zusammenlegung der 3 Frequenzbänder	67
4.4.5	Filterung	69
4.5	Einbindung von Matlab in die PAK–Software	70
5	Prinzipschalldämpfer	73
5.1	Grundüberlegungen	73
5.2	Kammerschalldämpfer	74
5.2.1	Konstruktion	74
5.2.2	Vergleich von Simulation und Messung	77
5.3	$\lambda/4$ –Resonator mit Kammer	78
5.3.1	Konstruktion	78
5.3.2	Vergleich von Simulation und Messung	80
5.4	Helmholtz–Resonator	85
5.4.1	Konstruktion	85
5.4.2	Vergleich von Simulation und Messung	87

6	Realer Schalldämpfer	91
6.1	Aufbau und Funktion	91
6.2	Messung	92
7	Zusammenfassung und Ausblick	95
7.1	Zusammenfassung	95
7.2	Ausblick	96
	Literaturverzeichnis	97
	Anhang	99

1

Einleitung

1.1 Motivation

Der Mensch ist heutzutage mehr störenden Schallquellen ausgesetzt als je zuvor. Am Arbeitsplatz, aber auch in der Freizeit und den eigenen vier Wänden ist man ständig von störendem Schall umgeben. Deshalb sind die Geräuschreduzierung und die Akustikoptimierung mittlerweile zu einem sehr wichtigen Thema geworden.

Dabei spielen die Schalldämpfer neben den Schallabsorbern eine bedeutende Rolle. Ob nun bei Kraftfahrzeugen, Lüftungsanlagen, industriellen Anlagen oder Haushaltsgeräten, Schalldämpfer kommen überall in unserer Umgebung zum Einsatz.

Für die Entwicklung und Fertigung von Schalldämpfern, bedarf es neben Berechnungen und Simulationen, wie beispielsweise der Finite-Elemente-Methode (FEM) oder der Rand-Element-Methode (BEM), auch einer praktischen Qualitätsprüfung. Hierfür werden bei Schalldämpfern meist Impedanzrohrmessungen durchgeführt.

Zur Beschreibung der akustischen Eigenschaften von Schalldämpfern sind die drei wichtigsten Parameter der Pegelunterschied (Noise Reduction NR, der die Schalldruckdifferenz beschreibt), die Einfügedämpfung (Insertion Loss IL, Schallleistungsdifferenz ohne und mit Dämpfer) und die Durchgangsdämpfung (Transmission Loss TL, die die Schallleistungsdifferenz von eingebrachtem Schall zu transmittiertem Schall angibt) [1].

Es gibt bereits eine Vielzahl von Impedanzrohrmesssysteme, zur Vermessung von Schalldämpfern. Aber für Modelle, deren Innenquerschnitt relativ klein im Vergleich zu Schalldämpfern in Kraftfahrzeugen oder Lüftungsanlagen ist, sind zusätzliche Anforderungen an den Prüfstand gegeben. So sind die messbaren Frequenzbereiche vom Durchmesser des Impedanzrohres abhängig (hier $d = 10 \text{ mm}$) und die Anbindung der Quellen und Sensoren ist nicht mehr trivial (Durchmesser von Mikfonkapsel ist in der Größenordnung des Messrohrdurchmessers).

Inhalt dieser Diplomarbeit ist der Entwurf und der Aufbau eines Schalldämpfer-Prüfstandes auf Basis einer Impedanzrohrmessung nach der 4-Mikrofon-Methode und dem 2-Quellen-Verfahren. Wobei die Messung auf einem PAK-System der Firma Müller-BBM implementiert wird. Der Prüfstand soll für Schalldämpfermessungen mit einem Innendurchmesser der Zuleitungsrohre von 5–10 mm ausgelegt werden und als Messergebnis den Transmission Loss L_{TL} (Durchgangsdämpfung) des Messobjekts anzeigen.

Durch den Entwurf und die Fertigung von geeigneten Prinzipschalldämpfern, deren Dämpfungsverlauf berechnet werden kann, wird der Prüfstand durch einen Vergleich mit den Messungen validiert und optimiert.

1.2 Gliederung der Arbeit

Die Arbeit ist in folgende Kapitel unterteilt:

In **Kapitel 2** werden die Grundlagen zur Funktionsweise von Reflexionsschalldämpfern erläutert. Hierbei sind zwei verschiedene Methoden zur Berechnung des Transmission Loss aufgeführt. Die Berechnung über die Reflexion von Schallwellen und die Kettenmatrixmethode. Weiters werden beide Methoden für verschiedene Schalldämpfertypen miteinander verglichen.

Kapitel 3 befasst sich mit dem Entwurf und der Konstruktion der für den Prüfstand benötigten Einzelkomponenten.

In **Kapitel 4** wird die Messablaufsteuerung beschrieben. Hier sind eine kurze Beschreibung der Messmethode, die genaue Herangehensweise für die Durchführung einer Messung am Prüfstand und eine Erläuterung der Implementierung in Matlab und der PAK-Software zu finden.

Kapitel 5 beschreibt die Konstruktion und den Aufbau von drei verschiedenen Prinzipschalldämpfern, mit denen der Prüfstand validiert wird. Hier werden die Messergebnisse dieser Dämpfer mit den Berechnungen des Transmission Loss verglichen und etwaige Abweichungen diskutiert.

In **Kapitel 6** wird ein realer Schalldämpfer mit kleinem Rohrdurchmesser vorgestellt und mit den vorangegangenen Kenntnissen werden die Messergebnisse diskutiert.

Abschließend wird in **Kapitel 7** eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf Optimierungen und weiterführende Arbeiten an diesem Prüfstand gegeben.

2

Grundlagen der Schalldämpfer

2.1 Allgemeines

Generell unterscheidet man bei Schalldämpfern zwischen Absorptionsschalldämpfer und Reflexions- bzw. Interferenzschalldämpfer. Bei den Absorptionsschalldämpfern wird der Schalldruck meist durch den Einsatz von porösem Absorptionsmaterial wie Schaumstoffen, Mineral- oder Glaswolle reduziert. Dies funktioniert besonders gut für höhere Frequenzen.

Die Reflexionsschalldämpfer basieren auf dem Prinzip der Reflexion des Schalls an Stellen mit einer Impedanzänderung. Dies wird beispielsweise durch Querschnittsprünge einer Rohrleitung oder durch Abzweigungen, sogenannte Blindleitungen, erreicht. Da ein solches Verfahren zur Schalldämpfung nur relativ schmalbandig funktioniert, werden hier oft mehrere Kammern und/oder Blindleitungen kombiniert, um eine breitbandigere Dämpfung zu erreichen.

In der Praxis werden meist beide Prinzipien kombiniert. So wird in einen Reflexionsschalldämpfer noch ein poröses Absorptionsmaterial eingebracht, um eine noch bessere Schalldämpfung zu erzielen. Klassische Beispiele hierfür sind Schalldämpfer in Abgasanlagen von Kraftfahrzeugen oder auch Schalldämpfer in Lüftungsanlagen für große Räume oder Hallen.

In dieser Arbeit wird allerdings nur auf die Reflexionsschalldämpfer näher eingegangen, da vorerst in den zu vermessenden Schalldämpfern kein absorbierendes Material vorhanden ist und auch die Prinzipschalldämpfer (s. Kapitel 5) nur aus einzelnen oder kombinierten Reflexionsschalldämpfern bestehen.

Zuerst werden in Kapitel 2.2 sechs Modelle vorgestellt, bei denen die Dämpfung über die Reflexion der Schallwellen berechnet wird, dann wird in Kapitel 2.3 die allgemeinere Methode beschrieben, bei der sich ein Schalldämpfermodell in einzelne Grundelemente zerlegen lässt und jedes Grundelement durch eine Matrix beschrieben wird. Diese Matrizen werden dann miteinander multipliziert, um zur gesamten Transfermatrix des Schalldämpfers zu gelangen, aus der der Transmission Loss berechnet werden kann.

2.2 Reflexionsschalldämpfer

2.2.1 Querschnittsprung

Abbildung 2.1 zeigt ein Modell eines Querschnittsprunges. Das Verhältnis der beiden Durchmesser S_1 und S_2 bestimmt, wie groß reflektierter und transmittierter Teil der eingebrachten Schallwelle sind (siehe auch Gl. 2.6 und Gl. 2.9). In den folgenden Gleichungen wird der Schalldruck (Gl. 2.1) und die Schallschnelle (Gl. 2.2) durch eine hinlaufende und eine reflektierte (rücklaufende) Welle beschrieben. Die Ausbreitungsrichtung ist in x-Richtung definiert [5, 11].

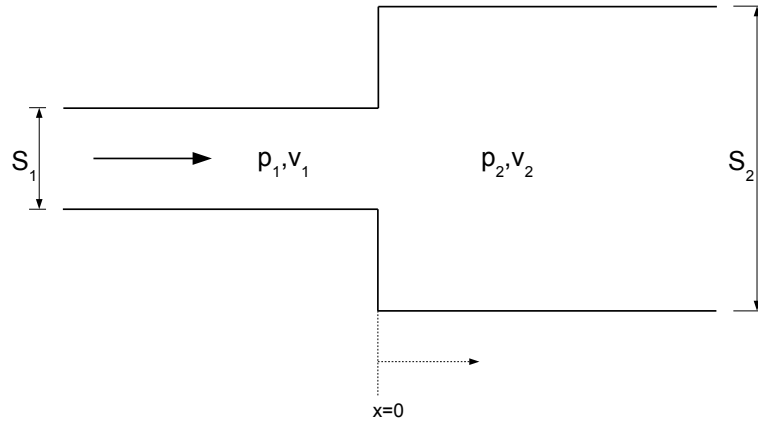


Abbildung 2.1: Querschnittsprung

$$p_1(x) = p_0 (e^{-jkx} + r e^{jkx}) \quad (2.1)$$

$$v_1(x) = \frac{j}{\rho\omega} \cdot \frac{\partial p_1}{\partial x} = \frac{p_0}{\rho c} (e^{-jkx} - r e^{jkx}) \quad (2.2)$$

Für das Rohr rechts des Querschnittsprunges wird Reflexionsfreiheit angenommen (z.B. unendlich lang). Schalldruck und Schallschnelle der übertragenen Transmissionswelle sind damit durch p_2 und v_2 gegeben:

$$p_2(x) = t \cdot p_0 e^{-jkx} \quad (2.3)$$

$$v_2(x) = t \cdot \frac{p_0}{\rho c} e^{-jkx} \quad (2.4)$$

Da zu beiden Seiten des Querschnittsprunges ($x = 0$) gleiche Schalldrücke vorliegen, können die Gleichungen 2.1 und 2.3 gleichgesetzt werden und man erhält Gleichung 2.6 mit dem Reflexionsfaktor r und dem Transmissionsfaktor t .

$$p_1(0) = p_2(0) \quad (2.5)$$

$$1 + r = t \quad (2.6)$$

Die Massen, die durch die Querschnitte S_1 und S_2 geleitet werden, sind gleich. Aus der Massengleichheit lässt sich mit Gleichung 2.6 der Reflexions- und der Transmissionsfaktor berechnen.

$$\rho \cdot S_1 \cdot v_1(0) = \rho \cdot S_2 \cdot v_2(0) \quad \Rightarrow \quad S_1 \cdot (1 - (t - 1)) = S_2 \cdot t \quad (2.7)$$

$$2 \cdot S_1 - t \cdot S_1 = S_2 \cdot t \quad \Rightarrow \quad 2 \cdot S_1 = (S_1 + S_2) \cdot t \quad (2.8)$$

$$t = \frac{2}{1 + \frac{S_2}{S_1}} \quad \dots \text{Transmissionsfaktor} \quad (2.9)$$

Der Transmissionsgrad τ beschreibt das Verhältnis von transmittierter Leistung zu reflektierter Leistung.

$$\tau = \frac{\text{Transmittierte Leistung}}{\text{Reflektierte Leistung}} = t^2 \cdot \frac{S_2}{S_1} = \frac{4 \frac{S_2}{S_1}}{1 + 2 \frac{S_2}{S_1} + \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^2} \quad (2.10)$$

$$\tau = \frac{4}{\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} + 2} \quad \dots \text{Transmissionsgrad} \quad (2.11)$$

Schließlich lässt sich mithilfe des Transmissionsgrades der Transmission Loss L_{TL} berechnen:

$$L_{TL} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4} \left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} + 2\right)\right) \quad \text{in [dB]}$$

(2.12)

Wie man erkennen kann, ist der Transmission Loss bei einem einfachen Querschnittsprung in einer Rohrleitung nur von den zwei Durchmessern S_1 und S_2 vor und nach der Stelle $x = 0$ abhängig. Für den Fall, dass die Querschnittsflächen gleich groß sind ($S_1 = S_2$), also kein Querschnittsprung vorhanden ist, gilt $L_{TL} = 0$ dB.

Abbildung 2.2 zeigt den Verlauf des Transmission Loss für einen Querschnittsprung mit dem Querschnittsflächenverhältnis S_2/S_1 .

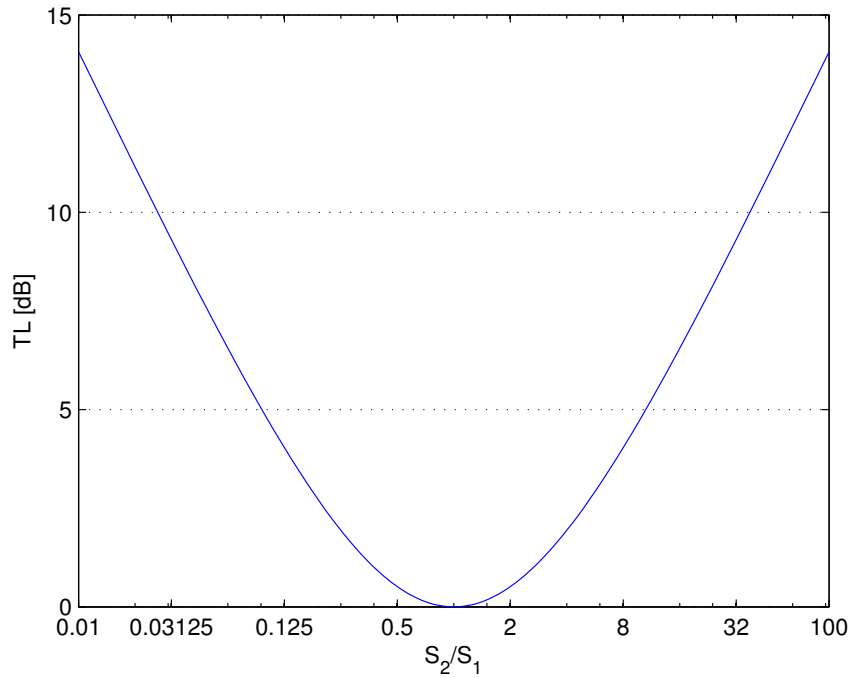


Abbildung 2.2: Transmission Loss eines Querschnittsprunges

2.2.2 Verzweigung

Bei diesem Dämpfungsprinzip verläuft ein zusätzliches Rohr mit dem Querschnitt S_A z.B. senkrecht vom Einspeisungsrohr (Durchmesser S_1) weg (s. Abb. 2.3).

Für die Weiterführung des Rohres in x-Richtung und die Weiterführung des Abzweigrohres in y-Richtung wird unendliche Länge (Reflexionsfreiheit) angenommen. Weiters wird vereinfachend angenommen, dass sich der Querschnitt der Rohrstücke vor und hinter der Verzweigung nicht ändert ($S_1 = \text{konst.}$).

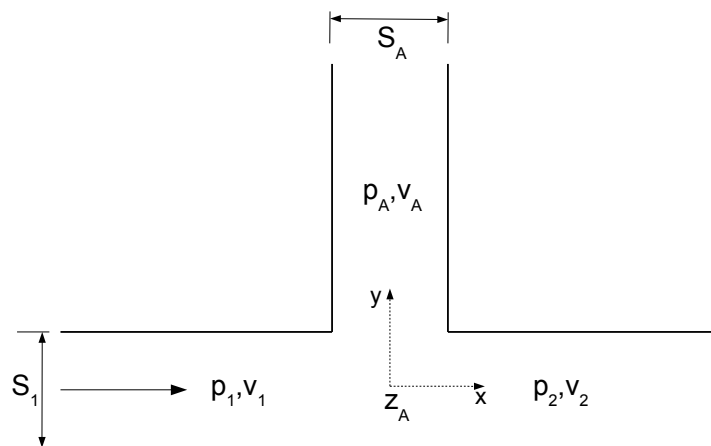


Abbildung 2.3: Verzweigung

Bei einer unendlich langen Verzweigung (reflexionsfrei) wird für die Eingangsimpedanz Z_A die Schallkennimpedanz von Luft (Z_0) angenommen (s. Gl. 2.14 und 2.15) und aus der Überlegung, dass an der Stelle der Verzweigung wieder alle Schalldrücke gleich groß sein müssen (s. Gl. 2.16), kommt man wieder auf Gleichung 2.6.

$$Z_0 = \rho \cdot c = 413 \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \right] \quad \text{bei } 20^\circ\text{C} \quad (2.13)$$

$$Z_A = \frac{p_A(y=0)}{v_A(y=0)} = \rho \cdot c \quad \dots \text{für unendlich lange Verzweigung} \quad (2.14)$$

$$z_A = \frac{Z_A}{\rho \cdot c} = 1 \quad \dots \text{normierte Eingangsimpedanz} \quad (2.15)$$

$$p_1(0) = p_A(0) = p_2(0) \quad (2.16)$$

Aus der Massengleichheit (s. Gl. 2.17) folgt durch Division mit $S_1 \cdot p_1(0)$, Einsetzen von Gleichung 2.16 und Umformen mit Gleichung 2.6 der Transmissionsfaktor für eine Rohrleitung mit Verzweigung (s. Gl. 2.18 bis 2.22).

$$\rho \cdot S_1 \cdot v_1(0) = \rho \cdot S_A \cdot v_A(0) + \rho \cdot S_1 \cdot v_2(0) \quad \dots \text{Massengleichheit} \quad (2.17)$$

$$\frac{v_1(0)}{p_1(0)} = \frac{S_A}{S_1} \frac{v_A(0)}{p_1(0)} + \frac{v_2(0)}{p_1(0)} = \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{1}{Z_A} + \frac{1}{\rho c} \quad (2.18)$$

$$\frac{v_1(0)}{p_1(0)} = \frac{1}{Z_1(0)} = \frac{1}{\rho c} \cdot \frac{1-r}{1+r} \quad \text{mit } r = t - 1 \quad (2.19)$$

$$\frac{2-t}{t} = \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{\rho c}{Z_A} + 1 \quad (2.20)$$

$$2 = t \cdot \left(\frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{\rho c}{Z_A} + 2 \right) \quad (2.21)$$

$$t = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{z_A}} \quad \dots \text{Transmissionsfaktor} \quad (2.22)$$

Für die unendlich lange Verzweigung ergibt sich der Transmissionsgrad mit Gleichung 2.15 zu

$$\tau = t^2 \cdot \frac{S_1}{S_1} = \frac{1}{1 + \frac{S_A}{S_1} + \frac{S_A^2}{4S_1^2}} \quad (2.23)$$

und daraus der Transmission Loss L_{TL} zu:

$$L_{TL} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{S_A}{S_1} + \frac{S_A^2}{4S_1^2}\right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.24)$$

Für die unendlich lange Verzweigung ist der Transmissionsfaktor und damit der Transmissionsgrad und der Transmission Loss wieder frequenzunabhängig und nur durch die Rohrdurchmesser definiert. Für $S_A = S_1$ gilt $t = \frac{2}{3}$, $\tau = \frac{4}{9}$ und $L_{TL} = 3,52$ dB.

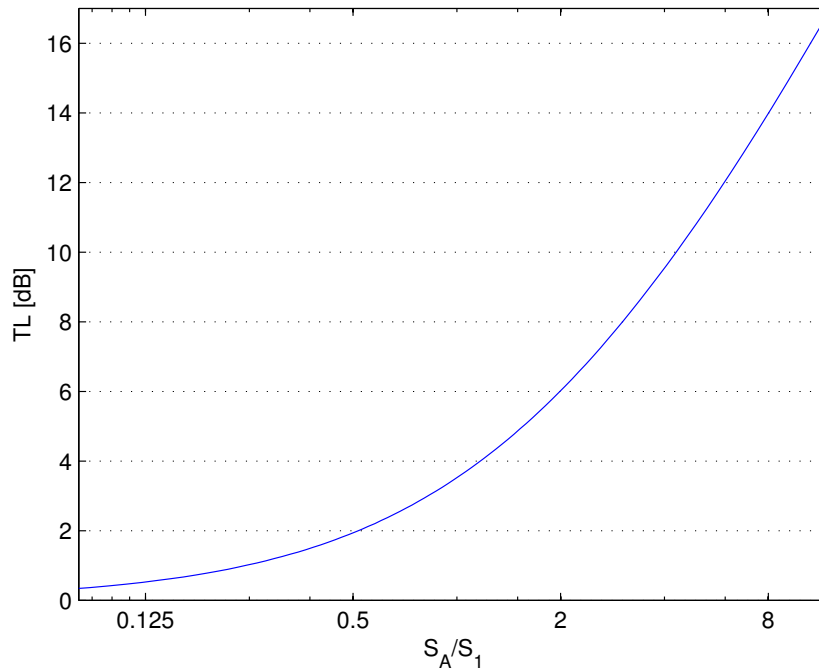


Abbildung 2.4: Transmission Loss einer unendlich langen Verzweigung

2.2.3 $\lambda/4$ –Resonator

Bei einer Verzweigung endlicher Länge l_A (s. Abb. 2.5) werden die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_A$ und der Transmissionsfaktor $\underline{t}$ komplex und durch $k \cdot l_A$ frequenzabhängig. Es ist sinnvoll eine solche Abzweigung schallhart abzuschließen, um einen gut definierten Abschlusswiderstand zu erhalten ($\underline{Z}_A(l_A) = \infty$).

$\underline{Z}_A$ kann in diesem Fall als Wandimpedanz einer Luftschicht mit Dicke l_A vor einer schallharten Wand interpretiert werden. Durch die Randbedingung $v(y = l_A) = 0$ ergibt sich die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_A$ aus Gleichung 2.25 bzw. 2.26 [2].

$$\underline{Z}_A = -j \cdot \rho c \cdot \cot(k \cdot l_A) \quad \dots \text{für abgeschlossene Verzweigung endlicher Länge} \quad (2.25)$$

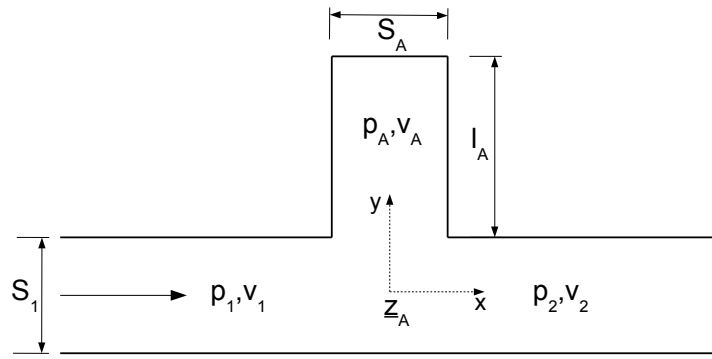


Abbildung 2.5: Verzweigung endlicher Länge

Die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_A$ ist somit:

$$\underline{z}_A = \frac{\underline{Z}_A}{\rho \cdot c} = -j \cdot \cot(k \cdot l_A) \quad (2.26)$$

Setzt man die normierte Eingangsimpedanz nun in den Transmissionsfaktor aus Gleichung 2.22 ein, wird der Transmissionsfaktor einer abgeschlossenen Verzweigung endlicher Länge zu:

$$\underline{t} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{-j \cdot \cot(k \cdot l_A)}} \quad (2.27)$$

Damit ergibt sich der Transmissionsgrad

$$\tau = |\underline{t}|^2 \cdot \frac{S_1}{S_1} = \frac{1}{1 + \frac{S_A^2}{4 S_1^2 \cdot \cot^2(k l_A)}} \quad (2.28)$$

und daraus der Transmission Loss L_{TL} :

$$L_{TL} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{S_A^2}{4 S_1^2 \cdot \cot^2(k l_A)}\right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.29)$$

Die Länge l_A hängt somit direkt mit den Frequenzen zusammen, bei denen die Dämpfung maximal ist (s. Gl. 2.30). Wie stark die Dämpfung dann zu den korrespondierenden, gegenüber den Maxima um $f = c/(4 \cdot l_A)$ verschobenen Dämpfungsminima abfällt oder ansteigt, hängt vom Verhältnis $\frac{S_A}{S_1}$ ab (s. Abb. 2.6).

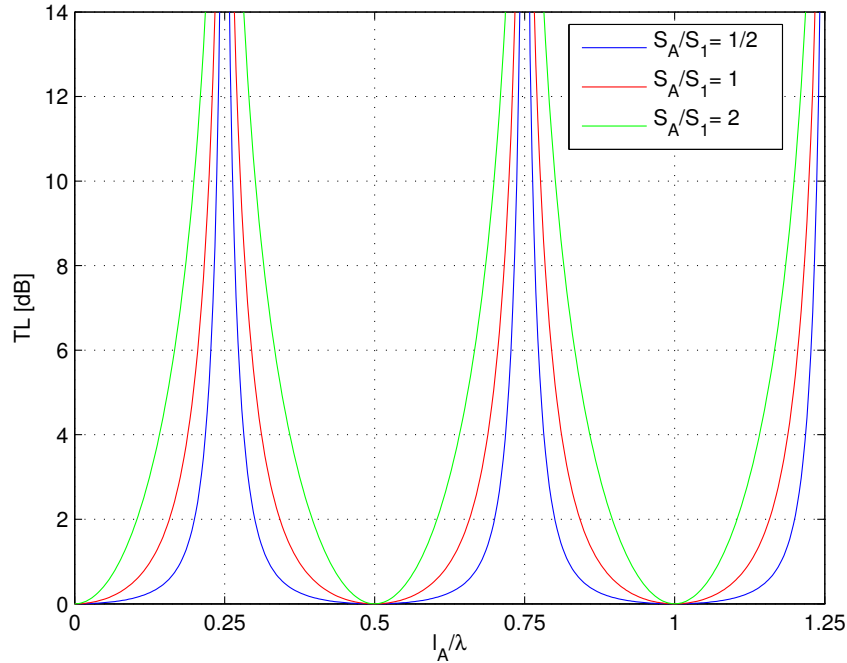


Abbildung 2.6: Transmission Loss einer abgeschlossenen Verzweigung der Länge l_A

Dämpfer, die sich dieses Prinzips bedienen, nennt man $\lambda/4$ -Resonatoren, da bei $l_A = \lambda/4$ das erste Dämpfungsmaximum auftritt und sich die weiteren Maxima periodisch mit $\lambda/2$ fortsetzen.

$$l_A = \lambda \left(\frac{1}{4} + n \cdot \frac{1}{2} \right) \quad \Rightarrow \quad f = \frac{c}{l_A} \left(\frac{1}{4} + n \cdot \frac{1}{2} \right) \quad (\text{mit } n = 0, 1, 2, \dots) \quad (2.30)$$

2.2.4 Querschnittsprung mit hineinstehendem Rohrstück

Eine weitere Variante ist die Erweiterung eines Querschnittsprunges mit einem ins größere Rohr hineinstehenden Rohrstück der Länge l_A (s. Abb. 2.7). Auch hier wird angenommen, dass die Weiterführung des Rohres mit Durchmesser S_2 unendlich lang ist (reflexionsfrei).

Durch die endliche Länge l_A des hineinstehenden Rohrstückes, entspricht die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_A$ an der Stelle $x = 0$ der komplexen Eingangsimpedanz des $\lambda/4$ -Resonators (vgl. Gl. 2.25 und 2.26).

Die Fläche S_A ist nun eine Kreisringfläche ($S_2 - S_1$). Für die Herleitung des Transmissionsfaktors gilt für den Schalldruck an der Stelle $x = 0$ die selbe Übergangsbedingung, wie bei der unendlich langen Verzweigung (vgl. Gl. 2.16), aber bei der Massengleichheit kommt der Einfluss des Querschnittsprunges hinzu:

$$\rho \cdot S_1 \cdot v_1(0) = \rho \cdot S_A \cdot v_A(0) + \rho \cdot S_2 \cdot v_2(0) \quad \dots \text{Massengleichheit} \quad (2.31)$$

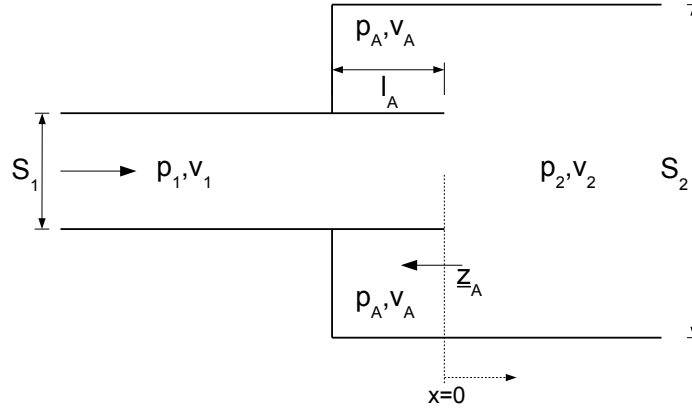


Abbildung 2.7: Querschnittsprung (Expansion) mit hineinstehendem Rohrstück der Länge l_A

Diese Massengleichheit wieder durch $S_1 \cdot p_1(0)$ dividiert, führt zu

$$\frac{v_1(0)}{p_1(0)} = \frac{S_A}{S_1} \frac{v_A(0)}{p_1(0)} + \frac{S_2}{S_1} \frac{v_2(0)}{p_1(0)} = \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{1}{Z_A} + \frac{S_2}{S_1} \cdot \frac{1}{\rho c} \quad (2.32)$$

und mit Gleichung 2.19 und $\underline{r} = \underline{t} - 1$ umgeformt zu:

$$\frac{2 - \underline{t}}{\underline{t}} = \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{\rho c}{Z_A} + \frac{S_2}{S_1} \quad (2.33)$$

$$2 = \underline{t} \cdot \left(\frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{\rho c}{Z_A} + \frac{S_2}{S_1} + 1 \right) \quad (2.34)$$

$$\underline{t} = \frac{2}{1 + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{Z_A}} \quad \dots \text{Transmissionsfaktor} \quad (2.35)$$

In den Transmissionsgrad τ , geht wieder das Flächenverhältnis des Querschnittsprunges $\frac{S_2}{S_1}$ ein:

$$\tau = |\underline{t}|^2 \cdot \frac{S_2}{S_1} = \frac{4}{2 + \frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_A^2}{S_1 S_2 \cdot \cot^2(k l_A)}} \quad (2.36)$$

Daraus folgt der Transmission Loss L_{TL} eines Querschnittsprunges mit hineinstehendem Rohrstück der Länge l_A :

$$L_{TL} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4} \left(2 + \frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} + \frac{|S_2 - S_1|^2}{S_1 S_2 \cdot \cot^2(k l_A)} \right) \right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.37)$$

Der Transmission Loss ist abhängig vom Querschnittsverhältnis des Eingangs- zum Ausgangsrohr und von der Länge des hineinstehenden Rohrstückes. Abbildung 2.8 zeigt den Verlauf des Transmission Loss für drei verschiedene Querschnittsverhältnisse.

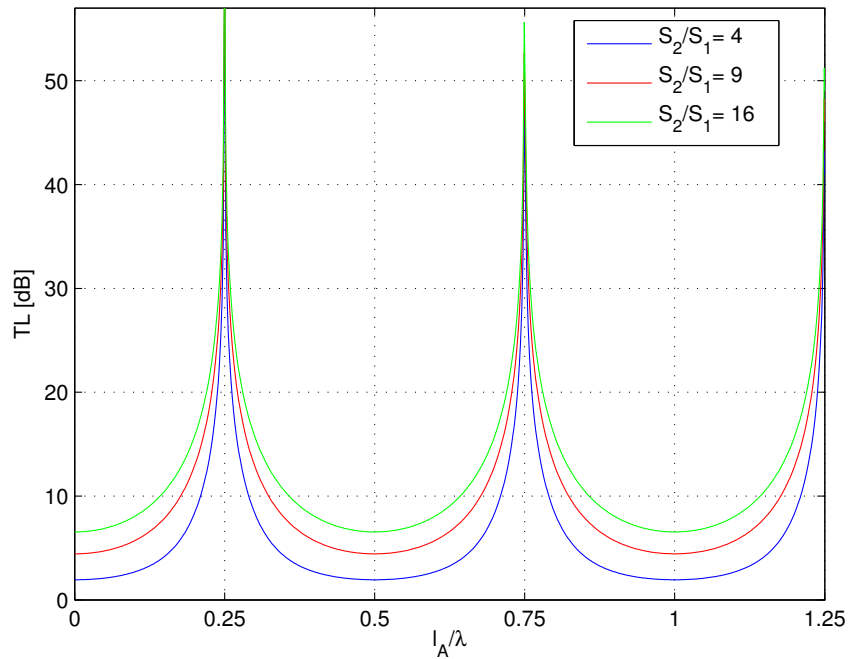


Abbildung 2.8: Transmission Loss des Querschnittsprunges mit hineinstehendem Rohrstück der Länge l_A

Für den Querschnittsprung von einem größeren auf einen kleineren Durchmesser (Kompression, s. Abb. 2.9) gelten die selben Formeln, wie für die oben beschriebene Expansion, nur dass dann $S_1 > S_2$ und $S_A = |S_2 - S_1|$ gilt.

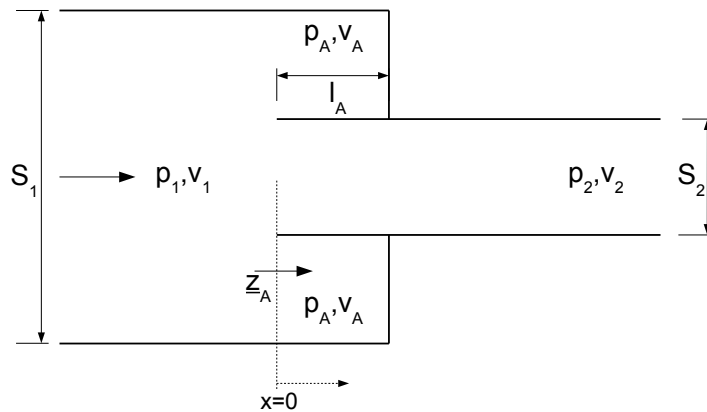


Abbildung 2.9: Querschnittsprung (Kompression) mit hineinstehendem Rohrstück der Länge l_A

2.2.5 Helmholtz–Resonator

Der Helmholtz–Resonator als Schalldämpfer ist eine bewährte Methode und wird hier in einer einfachen Form beschrieben. Die Querschnittsfläche $S_H = \pi r_H^2$ beschränkt sich hierbei auf ein einzelnes Loch, an welches ein Volumen V angebunden ist. Die Länge der Verbindung zwischen Leitungsrohr und Volumen wird mit d bezeichnet (s. Abb. 2.10).

Das heißt, die schwingende Luftmasse m befindet sich im Volumen $S_H \cdot d$ und das Volumen V stellt die Feder des Feder–Masse–Systems dar.

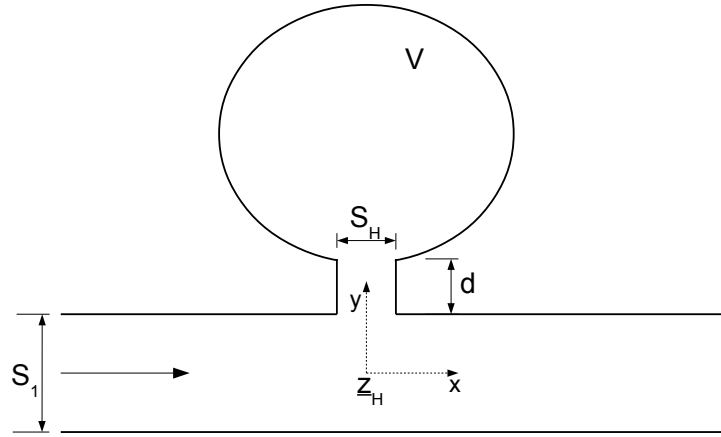


Abbildung 2.10: Helmholtz–Resonator

Die allgemeine Resonanzfrequenz eines Helmholtz–Resonators ist in Gleichung 2.38 definiert. Die Mündungskorrektur ist abhängig vom Radius r_H der Verbindung von Leitungsrohr und Volumen und führt zu einer effektiven Länge d_{eff} (s. Gl. 2.39) [2].

$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_H}{V \cdot d_{eff}}} \quad \text{oder} \quad f_H = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{s}{m}} \quad (2.38)$$

$$d_{eff} = d + 2\Delta d \quad \text{mit} \quad \Delta d = 0,85 \cdot r_H \quad (2.39)$$

Die Herleitung des Transmissionsfaktors ist die selbe, wie beim $\lambda/4$ –Resonator, nur dass hier die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_H$ die normierte Eingangsimpedanz $\underline{z}_A$ der Abzweigung ersetzt. Die Fläche S_H steht dabei für den Querschnitt des Resonatorhalses, S_1 für den Querschnitt des Hauptrohres.

Die allgemeine Form der Eingangsimpedanz eines Helmholtz–Resonators ist in Gleichung 2.40 zu sehen. Die Masse m' und die Federsteifigkeit s' werden mit einer Division durch die Lochfläche S_H von selbiger unabhängig gemacht (Massenbelag m und Federsteifigkeitsbelag s in Gl. 2.40 und Gl. 2.41) [2].

$$\underline{Z}_H = R + j\omega m + \frac{s}{j\omega} \quad \left[\frac{\text{Ns}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.40)$$

$$m = \rho \cdot d_{eff} \left[\frac{\text{Ns}^2}{\text{m}^3} \right] \quad \text{und} \quad s = \frac{\rho c^2 \cdot S_H}{V} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}^3} \right] \quad (2.41)$$

Der Massenbelag m wird mit der zweiten Formel aus Gleichung 2.38 durch die Resonanzfrequenz f_H und den Federsteifigkeitsbelag s ausgedrückt. Nun setzt man m und s in Gleichung 2.40 ein und erhält die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_H$ des Helmholtzresonators:

$$\underline{Z}_H = R + j\omega \cdot \frac{\rho c^2 \cdot S_H}{V \cdot 4\pi^2 f_H^2} + \frac{1}{j\omega} \cdot \frac{\rho c^2 \cdot S_H}{V} \quad (2.42)$$

$$\underline{Z}_H = R + j \cdot \frac{\rho c^2 \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right) \quad (2.43)$$

$$\underline{z}_H = \frac{\underline{Z}_H}{\rho c} = \frac{R}{\rho c} + j \cdot \frac{c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right) \quad \dots \text{normierte Eingangsimpedanz} \quad (2.44)$$

Für den Transmissionsfaktor $\underline{t}$ gilt daher mit Gleichung 2.22:

$$\underline{t} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{S_H}{S_1} \frac{1}{\underline{z}_H}} \quad \dots \text{Transmissionsfaktor} \quad (2.45)$$

$$\underline{t} = \frac{1}{1 + \frac{1}{2} \frac{S_H}{S_1} \frac{1}{\frac{R}{\rho c} + j \cdot \frac{c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right)}} \quad (2.46)$$

Hier muss konjugiert komplex erweitert werden und nach mehreren Zwischenschritten ergibt sich der Transmissionsgrad τ zu:

$$\tau = |\underline{t}|^2 \cdot \frac{S_1}{S_1} = \frac{1}{1 + \frac{\frac{R}{\rho c} + \frac{1}{4} \frac{S_H}{S_1}}{\frac{R^2 S_1}{\rho^2 c^2 S_H} + \frac{S_1 S_H c^2}{V^2 4\pi^2 f_H^2} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right)^2}} \quad \dots \text{Transmissionsgrad} \quad (2.47)$$

Und damit wird der Transmission Loss L_{TL} zu (vgl. [3]):

$$L_{TL} = 10 \cdot \log \left(\frac{1}{\tau} \right) = 10 \cdot \log \left(1 + \frac{\frac{R}{\rho c} + \frac{1}{4} \frac{S_H}{S_1}}{\frac{R^2 S_1}{\rho^2 c^2 S_H} + \frac{S_1 S_H c^2}{V^2 4\pi^2 f_H^2} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right)^2} \right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.48)$$

Dabei ist:

R ... Akustischer Reibwiderstand im Resonatorhals [Ns/m³]

V ... Volumen des Resonators [m³]

f_H ... Resonanzfrequenz [1/s]

Abbildung 2.11 zeigt die Verläufe des Transmission Loss L_{TL} für drei verschiedene akustische Reibwiderstände R . Volumen V , effektive Halslänge d_{eff} und Halsquerschnittsfläche S_H des Helmholtz-Resonators, sowie die Querschnittsfläche des Hauptrohres S_1 wurden so gewählt, wie sie später in Kapitel 5 zum Aufbau der Prinzipschalldämpfer auch verwendet werden.

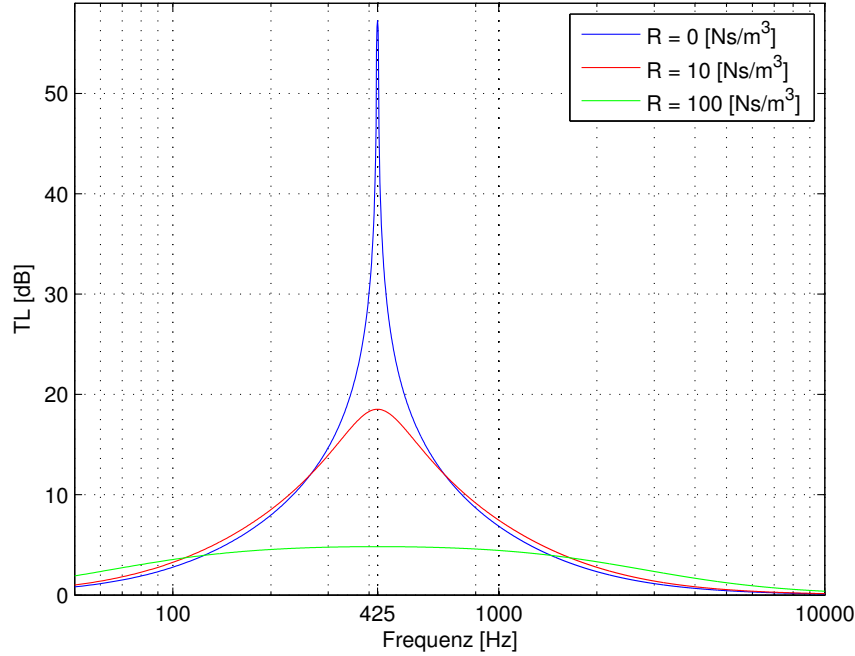


Abbildung 2.11: Transmission Loss eines Helmholtz-Resonators für verschiedene Reibwiderstände R

2.2.6 Kammerschalldämpfer

Ein Kammerschalldämpfer wird hier definiert als ein zweifacher Querschnittsprung, bei dem ein schallhartes Rohr sprunghaft expandiert (Länge der Kammer ist l_K) und wieder mit einem Querschnittsprung auf den ursprünglichen Durchmesser geführt wird. Zur Vereinfachung wird angenommen, dass Eingangs- und Ausgangsrohr den selben Durchmesser (S_1) haben und am Ausgang Reflexionsfreiheit vorliegt (s. Abb. 2.12).

Für den Schalldruck p_1 und die Schallschnelle v_1 am Eingang werden wieder die Gleichungen 2.1 und 2.2 herangezogen. Um die weiteren Berechnungen zu vereinfachen, werden für den Schalldruck und die Schallschnelle in der Kammer allerdings die Linearkombinationen der trigonometrischen Funktionen verwendet (s. Gl. 2.49 und 2.50) [4] [5].

$$p_2(x) = p_0 (\underline{A} \sin(k \cdot x) + \underline{B} \cos(k \cdot x)) \quad (2.49)$$

$$v_2(x) = \frac{j \cdot p_0}{\rho c} (\underline{A} \cos(k \cdot x) - \underline{B} \sin(k \cdot x)) \quad (2.50)$$

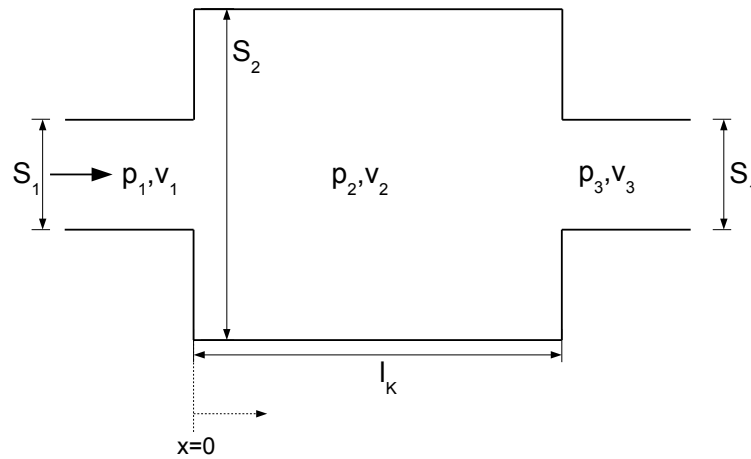


Abbildung 2.12: Kammerschalldämpfer

Am Ausgang werden Schalldruck $\underline{p}_3$ und Schallschnelle $\underline{v}_3$ der durchgelassenen Welle wieder analog zu Gleichung 2.3 und 2.4 beschrieben:

$$\underline{p}_3(x) = p_0 \cdot \underline{t} \cdot e^{-jk(x-l_K)} \quad (2.51)$$

$$\underline{v}_3(x) = \frac{p_0}{\rho c} \cdot \underline{t} \cdot e^{-jk(x-l_K)} \quad (2.52)$$

Am ersten Querschnittsprung ($x = 0$) wird jetzt nur der Reflexionsfaktor $\underline{r}$ für die weitere Berechnung verwendet, am zweiten Querschnittsprung ($x = l_K$) nur der Transmissionsfaktor $\underline{t}$. Aus den Übergangsbedingungen $\underline{p}_1(0) = \underline{p}_2(0)$ (s. Gl. 2.5) und $\rho S_1 \underline{v}_1(0) = \rho S_2 \underline{v}_2(0)$ (s. Gl. 2.7) am ersten Querschnittsprung ($x = 0$) folgt:

$$1 + \underline{r} = \underline{B} \quad (2.53)$$

$$S_1 (1 - \underline{r}) = j \cdot \underline{A} \cdot S_2 \quad (2.54)$$

Und aus $\underline{p}_2(l_K) = \underline{p}_3(l_K)$ und $\rho \cdot S_2 \cdot \underline{v}_2(l_K) = \rho \cdot S_3 \cdot \underline{v}_3(l_K)$ am zweiten Querschnittsprung ($x = l_K$) folgt:

$$\underline{A} \sin(k \cdot l_K) + \underline{B} \cos(k \cdot l_K) = \underline{t} \quad (2.55)$$

$$S_2 (\underline{A} \cos(k \cdot l_K) - \underline{B} \sin(k \cdot l_K)) = -j \cdot \underline{t} \cdot S_3 \quad (2.56)$$

Zur Vereinfachung wird bei dieser Kammer der Querschnitt von Eingangs- und Ausgangsrohr gleich groß gewählt ($S_3 = S_1$). Nun löst man die Gleichungen 2.55 und 2.56 nach $\underline{A}$ und $\underline{B}$ auf:

$$\underline{A} = \frac{\underline{t} - \underline{B} \cdot \cos(k \cdot l_K)}{\sin(k \cdot l_K)} \quad (2.57)$$

$$\frac{\underline{t} - \underline{B} \cdot \cos(k \cdot l_K)}{\sin(k \cdot l_K)} \cdot \cos(k \cdot l_K) - \underline{B} \cdot \sin(k \cdot l_K) = -j \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \underline{t} \quad (2.58)$$

$$\underline{t} \cdot \cos(k \cdot l_K) - \underbrace{\left(\underline{B} \cdot \cos^2(k \cdot l_K) + \underline{B} \cdot \sin^2(k \cdot l_K) \right)}_{=\underline{B} \cdot (\cos^2 u + \sin^2 u) = \underline{B}} = -j \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \underline{t} \cdot \sin(k \cdot l_K) \quad (2.59)$$

$$\underline{B} = \underline{t} \left(\cos(k \cdot l_K) + j \cdot \frac{S_1}{S_2} \sin(k \cdot l_K) \right) \quad (2.60)$$

$\underline{B}$ nun in Gleichung 2.57 eingesetzt führt zu $\underline{A}$:

$$\underline{A} = \underline{t} \cdot \frac{1 - \cos^2(k \cdot l_K) + j \cdot \frac{S_1}{S_2} \sin(k \cdot l_K) \cos(k \cdot l_K)}{\sin(k \cdot l_K)} \quad (2.61)$$

$$1 - \cos^2(k \cdot l_K) = \sin^2(k \cdot l_K) \quad (2.62)$$

$$\underline{A} = \underline{t} \left(\sin(k \cdot l_K) - j \cdot \frac{S_1}{S_2} \cos(k \cdot l_K) \right) \quad (2.63)$$

Aus den Gleichungen 2.53 und 2.54 wird $\underline{r}$ eliminiert:

$$S_1(2 - \underline{B}) = j \cdot \underline{A} \cdot S_2 \quad (2.64)$$

$$\underline{B} + j \cdot \underline{A} \cdot \frac{S_2}{S_1} = 2 \quad (2.65)$$

Setzt man nun in Gleichung 2.65 $\underline{A}$ und $\underline{B}$ ein, kommt man auf den Transmissionsfaktor $\underline{t}$:

$$\underline{t} \left(\cos(k \cdot l_K) + j \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \sin(k \cdot l_K) \right) + j \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot \underline{t} \left(\sin(k \cdot l_K) - j \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \cos(k \cdot l_K) \right) = 2 \quad (2.66)$$

$$\underline{t} = \frac{2}{2 \cos(k \cdot l_K) + j \left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} \right) \cdot \sin(k \cdot l_K)} \quad (2.67)$$

Der Betrag des Transmissionsfaktors $\underline{t}$ quadriert und mit dem Querschnittsflächenverhältnis gewichtet ergibt den Transmissionsgrad τ eines Kammerschalldämpfers (hier für den vereinfachten Fall, dass Eingangs- und Ausgangsrohr den selben Querschnitt aufweisen).

$$\tau = |\underline{t}|^2 \cdot \frac{S_1}{S_1} = \frac{4}{4 \cos^2(k \cdot l_K) + \left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2}\right)^2 \sin^2(k \cdot l_K)} \quad (2.68)$$

Dieser Term lässt sich noch etwas vereinfachen, indem man im Nenner den Ausdruck $\cos^2(kl_K)$ durch $1 - \sin^2(kl_K)$ ersetzt, sowie den gesamten Term durch 4 kürzt:

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 4 \right] \cdot \sin^2(k \cdot l_K)} \quad (2.69)$$

Daraus ergibt sich dann der Transmission Loss L_{TL} zu:

$$L_{TL} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{\tau}\right) = 10 \cdot \log\left(1 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} \right)^2 - 4 \right] \cdot \sin^2(k \cdot l_K)\right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.70)$$

$$L_{TL} = 0 \text{ dB} \quad \text{für } k \cdot l_K = 0, \pi, 2\pi, \dots \quad (2.71)$$

$$L_{TL} = L_{TL_{max}} = 10 \cdot \log\left(\frac{1}{4} \left(\frac{S_2}{S_1} + \frac{S_1}{S_2} \right)^2\right) \quad \text{für } k \cdot l_K = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (2.72)$$

Der Transmission Loss eines solchen Schalldämpfers hat eine Sinus-Komponente, die für bestimmte Werte von $k \cdot l_K$ die Minima und Maxima der Dämpfung definiert. Die Dämpfung eines Kammerschalldämpfers ist also frequenzabhängig und es gilt zusätzlich, je größer das Verhältnis von $\frac{S_2}{S_1}$ ist, desto stärker ist die Dämpfung (vgl. Gl. 2.70 bis 2.72).

Abbildung 2.13 zeigt die Transmission Loss Kurven eines Kammerschalldämpfers bei verschiedenen Querschnittsverhältnissen.

Der Faktor $k \cdot l_K$ kann auch wie folgt dargestellt werden und wird so häufig als Achseneinheit in Transmission Loss Diagrammen verwendet: $k \cdot l_K = 2\pi \cdot l_K / \lambda$

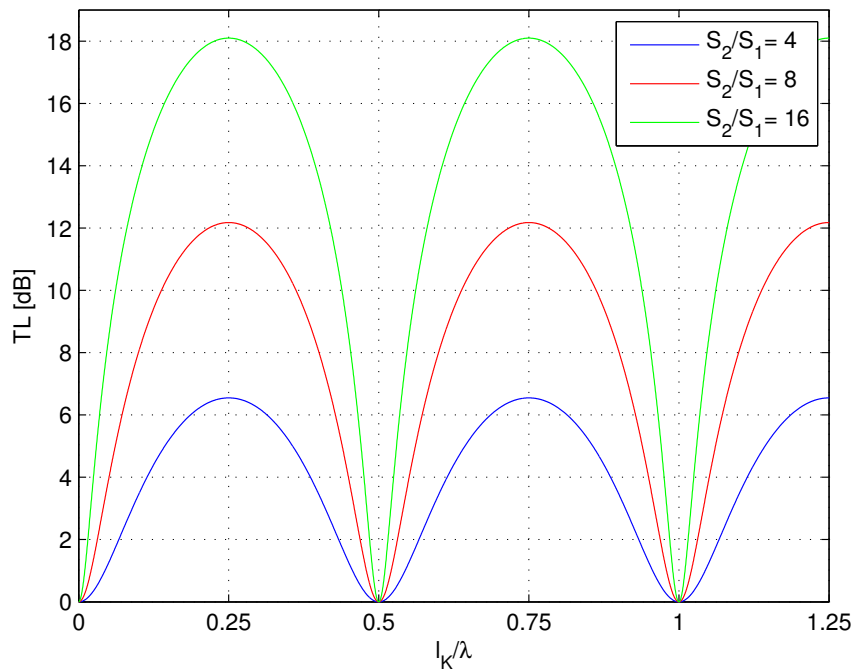


Abbildung 2.13: Transmission Loss eines Kammerschalldämpfers

2.3 Kettenmatrixmethode

Bei der Methode der Zerlegung eines Schalldämpfers in seine Grundelemente kann jedes Grundelement durch eine Matrix beschrieben werden. Diese gibt den Zusammenhang dieses Elements mit den Eingangs- und Ausgangsgrößen p und v an. Hier werden allerdings nur Schalldämpfer mit zylindrischem Querschnitt betrachtet und die Gleichströmungsgeschwindigkeit im gesamten Schalldämpfer ist gleich null (Machzahl $M = 0$). Alle Matrizen in der richtigen Reihenfolge miteinander multipliziert, beschreiben dann den Gesamtzusammenhang eines Schalldämpfers mit den Größen p und v .

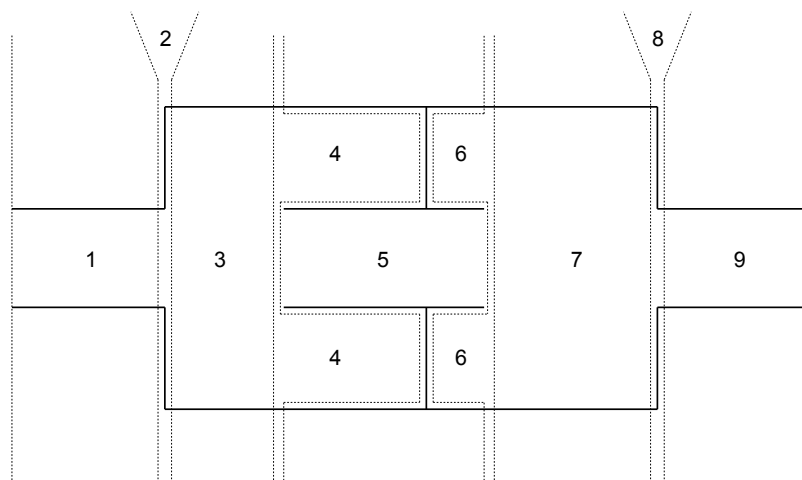


Abbildung 2.14: Zerlegung eines Schalldämpfers in Grundelemente [6]

Abbildung 2.14 zeigt eine mögliche Zerlegung. Die Grundelemente mit den Nummern 1, 3, 5, 7 und 9 sind einfache Rohrstücke mit einem gewissen Querschnitt S_i . Die Elemente 2 und 8 beschreiben einen einfachen Querschnittsprung und die Elemente 4 und 6 sind Verjüngung bzw. Expansion mit einem hineinstehenden Rohrstück (Teil des Elements 5).

Gleichung 2.73 zeigt die Gesamtmatrix, die aus der Multiplikation der Transfermatrizen der einzelnen Grundelemente besteht.

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_1 \cdot \underline{\mathbf{T}}_2 \cdot \underline{\mathbf{T}}_3 \cdot \dots \cdot \underline{\mathbf{T}}_9 \quad (2.73)$$

In Gleichung 2.74 ist der allgemeine Zusammenhang einer solchen Matrix mit dem Schalldruck und der Schallschnelle am Eingang und am Ausgang eines Zweitores dargestellt. Das erste Element $\underline{T}_{11}$ der Matrix $\underline{\mathbf{T}}$ verknüpft also den Schalldruck $\underline{p}_1$ am Eingang mit dem Schalldruck $\underline{p}_2$ am Ausgang und ist somit eine dimensionslose Druckübertragungsfunktion. $\underline{T}_{12}$ verknüpft den Schalldruck $\underline{p}_1$ mit der Schallschnelle $\underline{v}_2$ und ist daher eine Querimpedanz. Element $\underline{T}_{21}$ verbindet die Schallschnelle $\underline{v}_1$ mit dem Schalldruck $\underline{p}_2$, ist also eine Queradmittanz und das Element $\underline{T}_{22}$ verknüpft die Schallschnelle $\underline{v}_1$ mit der Schallschnelle $\underline{v}_2$ und ist daher eine Schnelleübertragungsfunktion [7].

$$\begin{bmatrix} \underline{p}_1 \\ \underline{v}_1 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{T}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_2 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{T}_{11} & \underline{T}_{12} \\ \underline{T}_{21} & \underline{T}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_2 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} \quad (2.74)$$

Mit dieser Methode können nun einfache und auch etwas komplizierter aufgebaute Schalldämpfer aus den Matrizen ihrer Grundelemente und dem Querschnittsverhältnis von Eingangstor zu Ausgangstor (S_{in}/S_{out}) berechnet werden.

Der Transmission Loss L_{TL} lässt sich nach folgender Formel berechnen [7]:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right) \right| + 10 \cdot \log \left(\frac{S_{in}}{S_{out}} \right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.75)$$

Im Folgenden werden kurz die wichtigsten Grundelemente und die dazugehörigen Matrizen erläutert.

2.3.1 Einfaches Rohrstück

Bei einem einfachen Rohrstück ist die Transfermatrix nur von der Länge l_R und der Schallkennimpedanz von Luft Z_0 , sowie der Wellenzahl k abhängig [7]:

$$\underline{\mathbf{T}}_{Rohr} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot l_R) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(k \cdot l_R) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot l_R) & \cos(k \cdot l_R) \end{bmatrix} \quad (2.76)$$

Der Transmission Loss ergibt sich somit zu:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log |\cos(k \cdot l_R) + j \sin(k \cdot l_R)| = 0 \text{ dB} \quad (2.77)$$

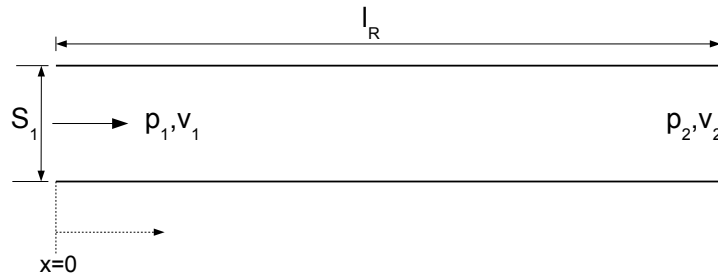


Abbildung 2.15: Einfaches Rohrstück

2.3.2 Querschnittsprung

Der Querschnittsprung von einem kleinen auf einen größeren Durchmesser entspricht einer Expansion (s. Abb. 2.16).

Die Transfermatrix dieses Elements setzt sich aus drei Matrizen zusammen, von denen zwei (die beiden Rohrstücke) der Gleichung 2.76 entsprechen, allerdings mit den Längen l_1 und l_2 .

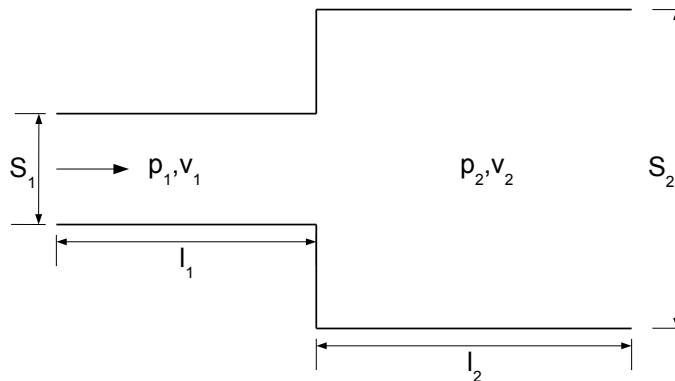


Abbildung 2.16: Querschnittsprung (Expansion)

Die Matrix des Querschnittsprunges alleine ergibt sich aus den Gleichungen 2.5 und 2.7 und ist dadurch wie folgt gegeben:

$$\underline{\mathbf{T}}_{Sprung} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \quad (2.78)$$

Diese drei Matrizen werden nun von links nach rechts miteinander multipliziert, um auf die Gesamtmatrix des Querschnittsprunges zu kommen.

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{Rohr1} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Sprung} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr2} \quad (2.79)$$

Der Querschnittsprung von einem großen auf einen kleineren Durchmesser entspricht einer Kompression (s. Abb. 2.17). Hier gilt die selbe Gleichung wie für die Expansion (s. Gl. 2.78), nur dass der Querschnitt S_2 nun kleiner ist als S_1 .

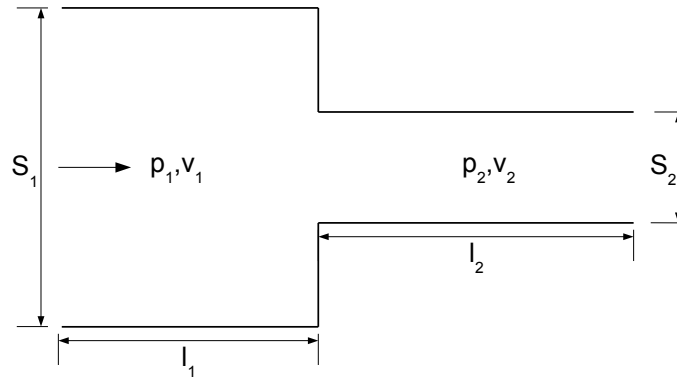


Abbildung 2.17: Querschnittsprung (Kompression)

Der Transmission Loss L_{TL} für den Querschnittsprung alleine ist in folgender Gleichung zu sehen und die dazugehörige Dämpfungskurve in Abhängigkeit von S_2/S_1 zeigt Abbildung 2.18 (hier sind die Längen $l_1 = l_2 = 0$ gesetzt (vgl. Abb. 2.2)).

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \left(1 + \frac{S_2}{S_1} \right) \right| + 10 \cdot \log \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.80)$$

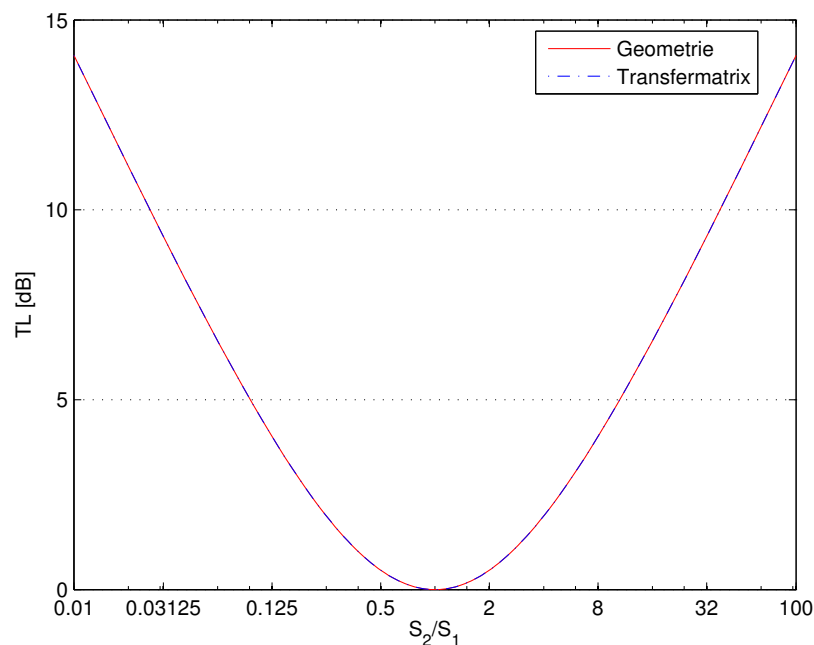


Abbildung 2.18: Transmission Loss eines Querschnittsprunges

2.3.3 Verzweigung

Die Transfermatrix einer unendlich langen Verzweigung, bei der das Hauptrohr keine Querschnittsänderung aufweist (s. Abb. 2.19), basiert auf den Gleichungen 2.14 bis 2.17.

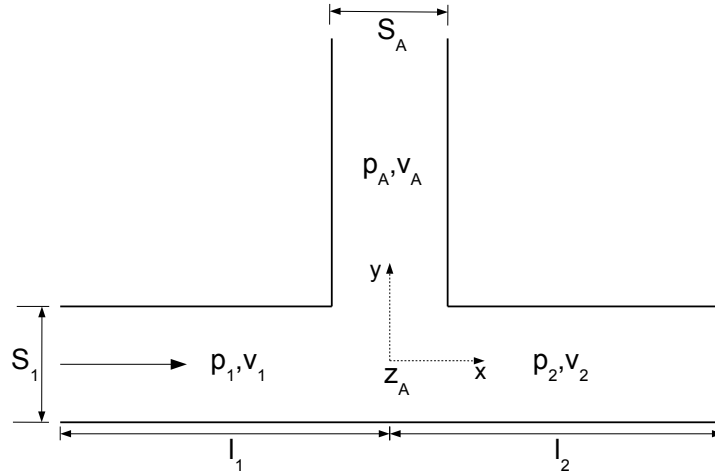


Abbildung 2.19: Offene Verzweigung (unendlich lang)

$$v_1(0) = \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{Z_A} \cdot p_2(0) + v_2(0) \quad \text{aus Gleichung 2.17} \quad (2.81)$$

$$\begin{bmatrix} p_1(0) \\ v_1(0) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{\text{Verzweigung}} \cdot \begin{bmatrix} p_2(0) \\ v_2(0) \end{bmatrix} \quad (2.82)$$

$$\mathbf{T}_{\text{Verzweigung}} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{Z_A} & 1 \end{bmatrix} \quad Z_A = \rho \cdot c \quad (2.83)$$

Diese Matrix muss nun wieder mit den Matrizen der Rohrstücke 1 und 2 (mit den Längen l_1 und l_2) multipliziert werden, um zur Gesamtmatrix des Elementes zu gelangen.

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr1}} \cdot \mathbf{T}_{\text{Verzweigung}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr2}} \quad (2.84)$$

Gleichung 2.85 und Abbildung 2.20 zeigen nur den Transmission Loss L_{TL} der unendlich langen Verzweigung mit Querschnitt S_A , also ohne die Transfermatrizen $\underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr1}}$ und $\underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr2}}$ der Rohrstücke.

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \left(2 + \frac{S_A}{S_1} \right) \right| \quad \text{in [dB]} \quad (2.85)$$

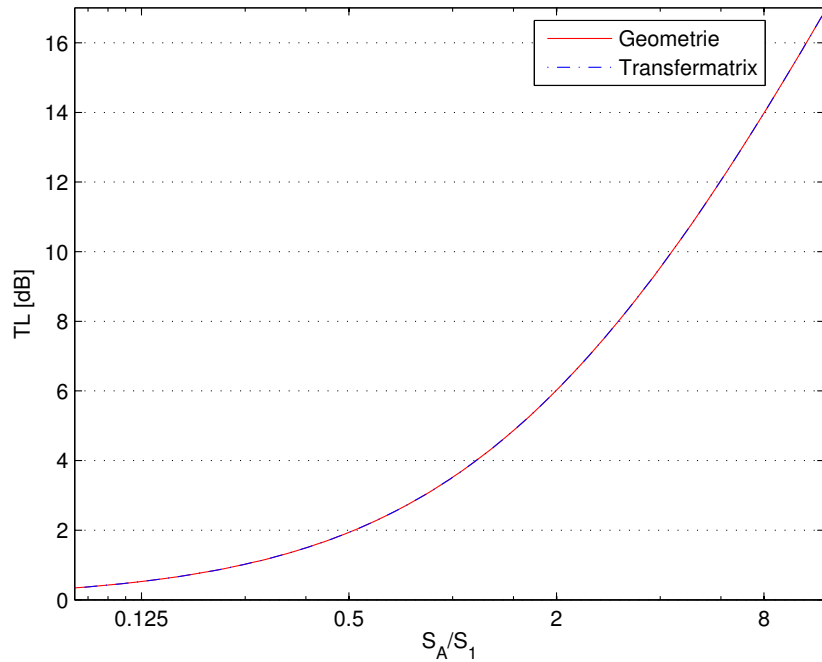


Abbildung 2.20: Transmission Loss einer unendlich langen Verzweigung

2.3.4 $\lambda/4$ –Resonator

Für die Transfermatrix des $\lambda/4$ –Resonators als Grundelement gilt die selbe Gleichung, wie für die unendlich lange Verzweigung (vgl. Gl. 2.83), nur dass die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_A$ nun komplex ist (vgl. Gl. 2.25).

$$\underline{\mathbf{T}}_{\lambda/4} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{\underline{Z}_A} & 1 \end{bmatrix} \quad \underline{Z}_A = -j \cdot \rho c \cdot \cot(k \cdot l_A) \quad (2.86)$$

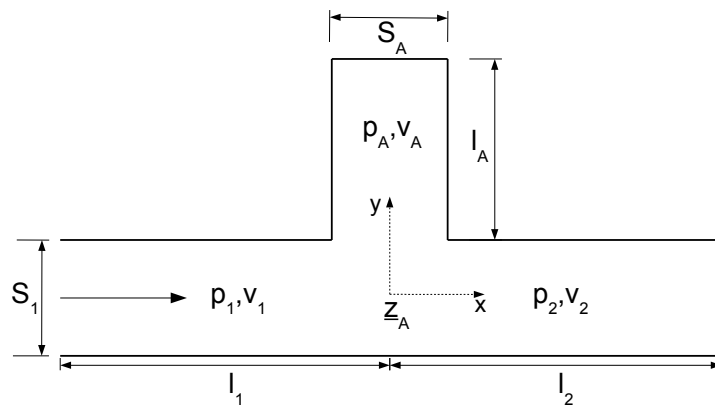


Abbildung 2.21: Verzweigung endlicher Länge

Die Matrix des gesamten Elementes ist wieder die Multiplikation der Transfermatrix (Gl. 2.86) mit den Matrizen der Rohrstücke:

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr1}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\lambda/4} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr2}} \quad (2.87)$$

Da auch hier wieder der Vergleich zum geometrisch berechneten Dämpferelement gemacht werden soll, ist in Gleichung 2.88 und in Abbildung 2.22 nur der Transmission Loss L_{TL} der Verzweigung (mit Länge l_A und Querschnittsfläche S_A), also ohne den Einfluss der Rohrstücke aufgetragen.

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(2 + \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{1}{-j \cot(k \cdot l_A)} \right) \right| \quad \text{in [dB]} \quad (2.88)$$

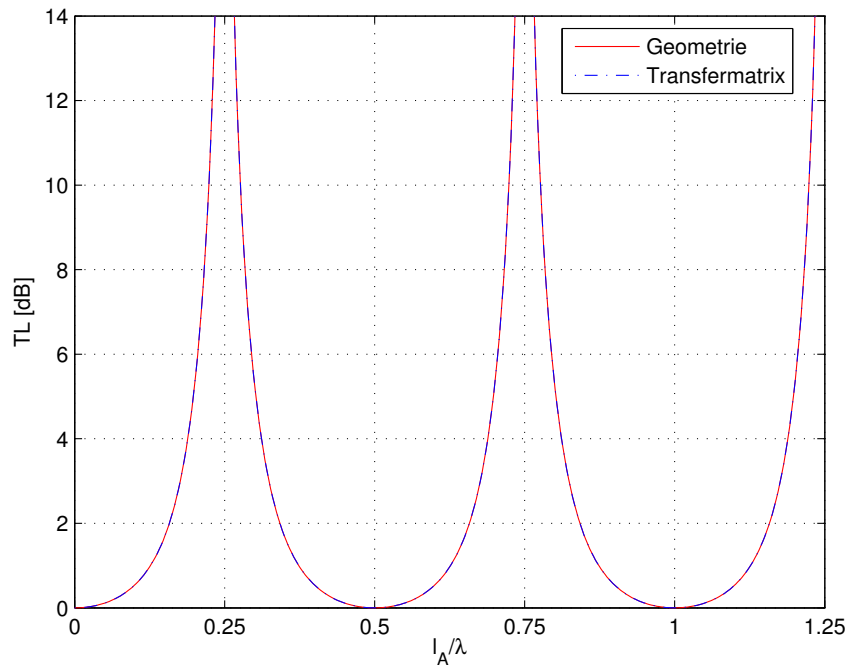


Abbildung 2.22: Transmission Loss einer abgeschlossenen Verzweigung der Länge l_A (bei einem Querschnittsflächenverhältnis von $S_A/S_1 = 1$)

2.3.5 Querschnittsprung mit hineinstehendem Rohrstück

Die Transfermatrix dieses Elementes basiert auf den Gleichungen 2.31 und 2.32, sowie der Bedingung, dass die drei Schalldrücke an der Stelle $x = 0$ gleich groß sind: $p_1(0) = p_A(0) = p_2(0)$. Weiters ist die Länge l_A des hineinstehenden Rohrstückes für den Dämpfungsverlauf relevant ($\lambda/4$ -Resonator).

Die Transfermatrix des Querschnittsprunges mit hineinstehendem Rohrstück alleine ist in Gleichung 2.89 zu sehen. Dabei ist die Fläche S_A die Querschnittsfläche des größeren Rohres weniger der Querschnittsfläche des kleineren Rohres (s. Gl. 2.91) und die Eingangsimpedanz $\underline{Z}_A$ ist durch Gleichung 2.90 gegeben.

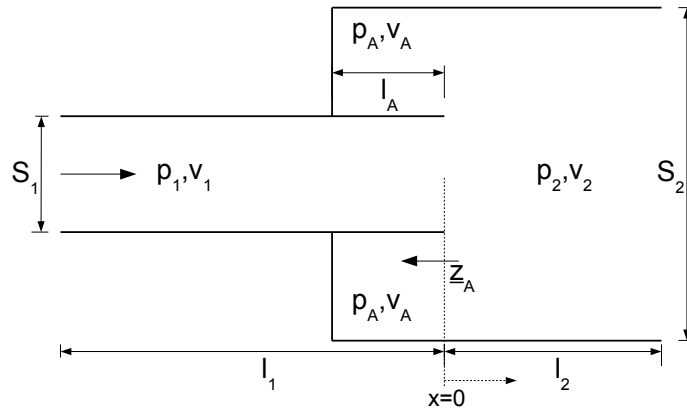


Abbildung 2.23: Querschnittsprung (Expansion) mit hineinstehendem Rohrstück

$$\underline{\mathbf{T}}_{QmR} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_A}{S_1} \frac{1}{\underline{Z}_A} & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \quad (2.89)$$

$$\underline{Z}_A = -j \cdot \rho c \cdot \cot(k \cdot l_A) \quad (2.90)$$

$$S_A = |S_2 - S_1| \quad (2.91)$$

Analog zum Querschnittsprung gilt für eine Kompression mit hineinstehendem Rohrstück die selbe Transfermatrix wie für die Expansion mit hineinstehendem Rohrstück, nur dass nun $S_1 > S_2$ gilt (vgl. Gl. 2.89 bis 2.91).

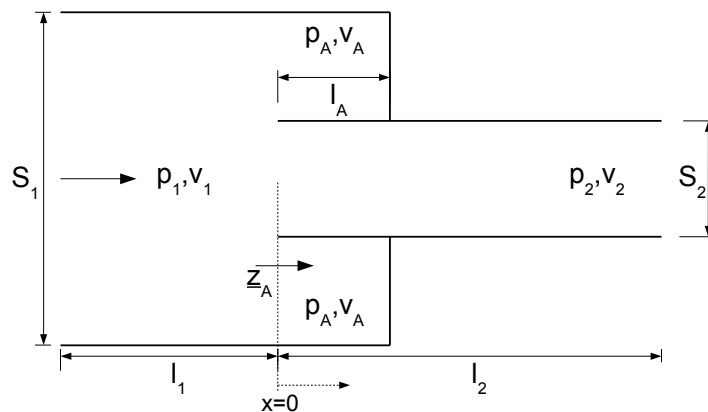


Abbildung 2.24: Querschnittsprung (Kompression) mit hineinstehendem Rohrstück

Um nun auf die Transfermatrix des gesamten abgebildeten Elements (Abb. 2.23 bzw. 2.24) zu kommen, muss $\underline{\mathbf{T}}_{QmR}$ noch mit den Matrizen der beiden Rohre (mit den Längen l_1 und l_2) multipliziert werden:

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{Rohr1} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{QmR} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr2} \quad (2.92)$$

Der Transmission Loss L_{TL} eines Querschnittsprunges mit hineinstehendem Rohrstück alleine ($\underline{\mathbf{T}}_{QmR}$) ist wie folgt gegeben und für ein Querschnittsverhältnis von $S_2/S_1 = 16$ in Abbildung 2.25 zu sehen:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(1 + \frac{S_2}{S_1} + \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{1}{-j \cot(k \cdot l_A)} \right) \right| + 10 \cdot \log \left(\frac{S_1}{S_2} \right) \quad \text{in [dB]} \quad (2.93)$$

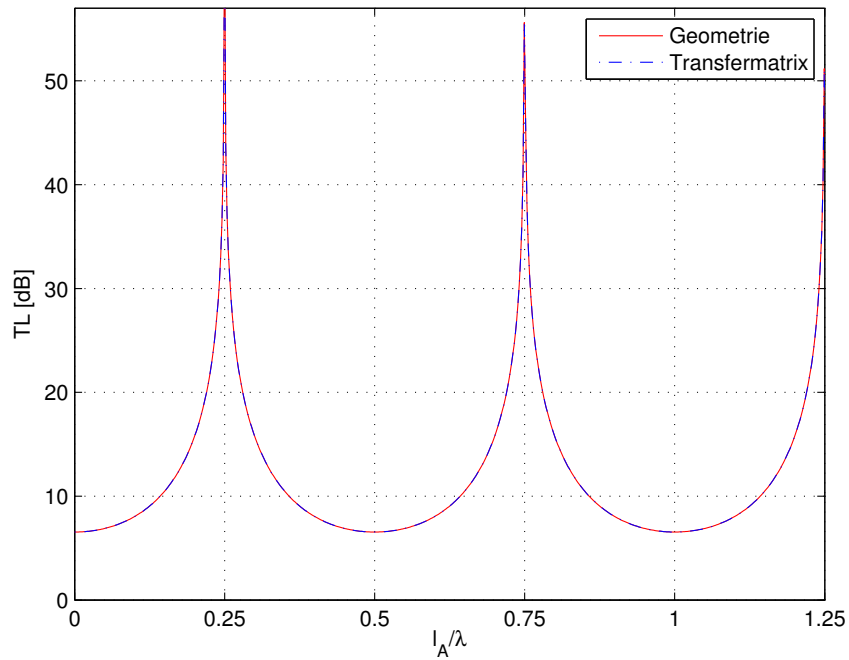


Abbildung 2.25: Transmission Loss eines Querschnittsprunges mit hineinstehendem Rohrstück der Länge l_A (bei einem Querschnittsflächenverhältnis von $S_2/S_1 = 16$)

2.3.6 Helmholtz–Resonator

Da der Helmholtz–Resonator auch als Abzweigung mit der Impedanz $\underline{Z}_H$ gesehen werden kann, gilt hier die selbe Transfermatrix, wie bei der unendlich langen Verzweigung oder dem $\lambda/4$ –Resonator, allerdings mit der Querschnittsfläche S_H des Resonatorhalses und der Eingangsimpedanz $\underline{Z}_H$ (vgl. Gl. 2.86 und 2.94), die nun einen Realteil und einen Imaginärteil hat (s. Gl. 2.43 und Gl. 2.95).

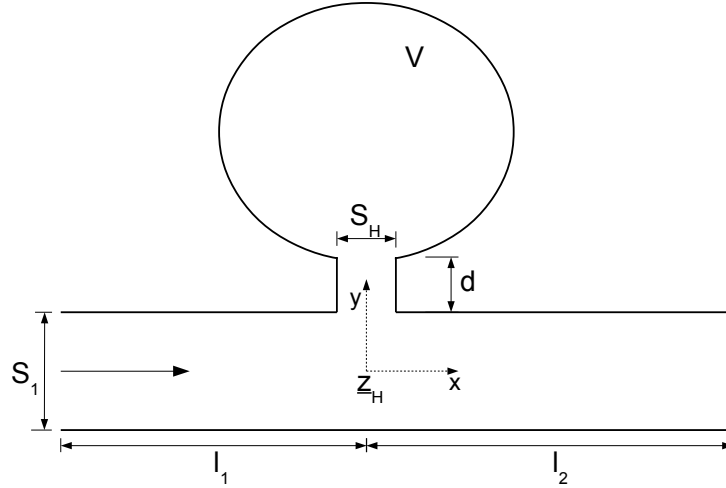


Abbildung 2.26: Helmholtz–Resonator

$$\underline{\mathbf{T}}_{Helmholtz} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_H}{S_1} \frac{1}{\underline{Z}_H} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.94)$$

$$\underline{Z}_H = R + j \cdot \frac{Z_0 c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right) \quad (2.95)$$

Für die Transfermatrix des gesamten abgebildeten Elementes (s. Abb. 2.26) gilt wieder die multiplikative Verkettung mit den Matrizen der Rohrstücke:

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{Rohr1} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Helmholtz} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr2} \quad (2.96)$$

Der Transmission Loss L_{TL} eines Helmholtz–Resonators alleine ist durch folgende Gleichung gegeben und für die Abmessungen aus Kapitel 5 in Abbildung 2.27 zu sehen:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(2 + \frac{S_H}{S_1} \cdot \frac{1}{\frac{R}{Z_0} + j \cdot \frac{c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right)} \right) \right| \quad \text{in [dB]} \quad (2.97)$$

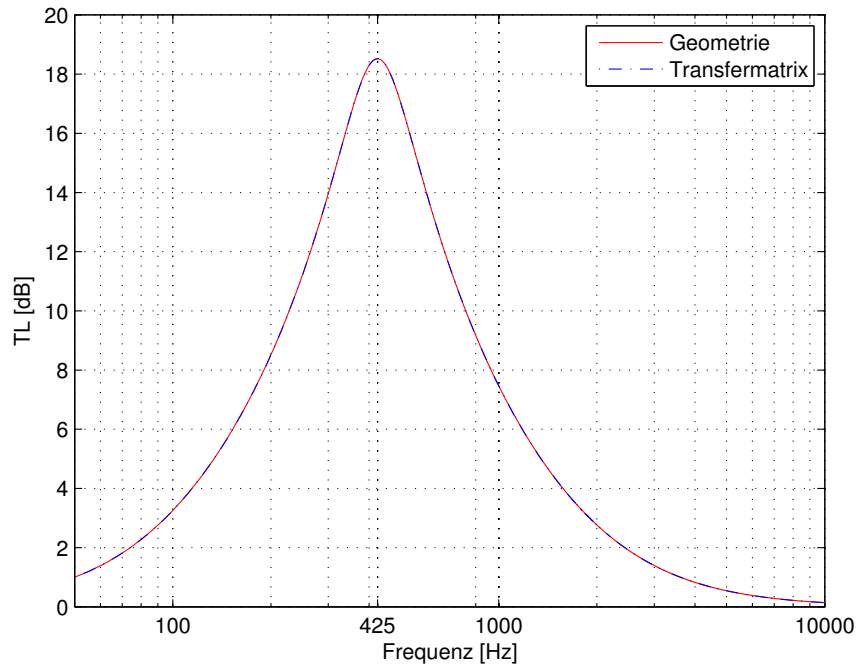


Abbildung 2.27: Transmission Loss eines Helmholtz-Resonators (für den Reibwiderstand $R = 10 \text{ [Ns/m}^3\text{])}$

2.3.7 Kammerschalldämpfer

Die Transfermatrix des Kammerschalldämpfers setzt sich aus den Matrizen der Querschnittsprünge (Expansion und Kompression) und den Matrizen der drei Rohrstücke (mit den Längen l_1 , l_2 und l_3) zusammen. Um wieder einen Vergleich zur geometrischen Berechnung herzustellen, werden die Längen l_1 des Eingangsrohres und l_3 des Ausgangsrohres auf null gesetzt.

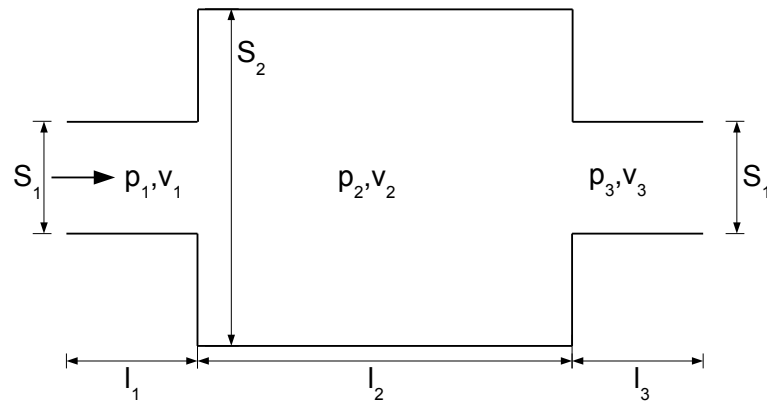


Abbildung 2.28: Kammerschalldämpfer

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr1}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Sprung1}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr2}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Sprung2}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr3}} \quad (2.98)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{T}' &= \mathbf{T}_{Sprung1} \cdot \mathbf{T}_{Rohr2} \cdot \mathbf{T}_{Sprung2} \\
&= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k l_2) & j Z_0 \cdot \sin(k l_2) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k l_2) & \cos(k l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_1}{S_2} \end{bmatrix} \\
&= \begin{bmatrix} \cos(k l_2) & j Z_0 \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \sin(k l_2) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \frac{S_2}{S_1} \cdot \sin(k l_2) & \cos(k l_2) \end{bmatrix} \quad (2.99)
\end{aligned}$$

Der Transmission Loss L_{TL} ergibt sich aus Gleichung 2.75 und ist in Abbildung 2.29 zu sehen:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(2 \cos(k l_2) + j \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} \right) \sin(k l_2) \right) \right| \quad \text{in [dB]} \quad (2.100)$$

$$L_{TL} = 0 \text{ dB} \quad \text{für } k \cdot l_2 = 0, \pi, 2\pi, \dots \quad (2.101)$$

$$L_{TL} = L_{TL_{max}} = 20 \cdot \log \left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} \right) \right) \quad \text{für } k \cdot l_2 = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots \quad (2.102)$$

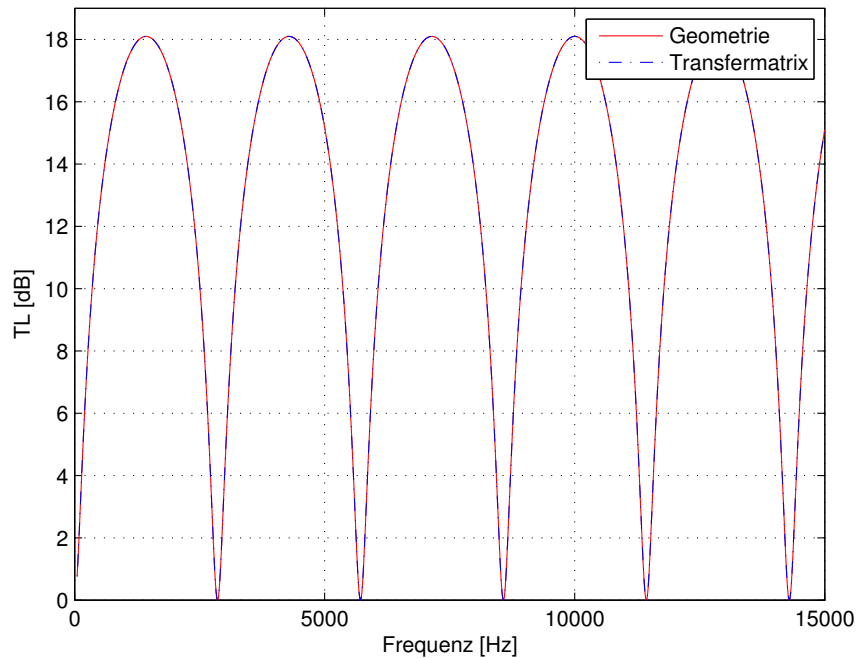


Abbildung 2.29: Transmission Loss eines Kammerschalldämpfers ($l_2 = 6 \text{ cm}$ und $S_2/S_1 = 16$)

2.3.8 $\lambda/4$ -Resonator mit Kammer

Ein Schalldämpfer, dessen Konstruktion in Kapitel 5 genauer beschrieben ist, ist der $\lambda/4$ -Resonator mit Kammer.

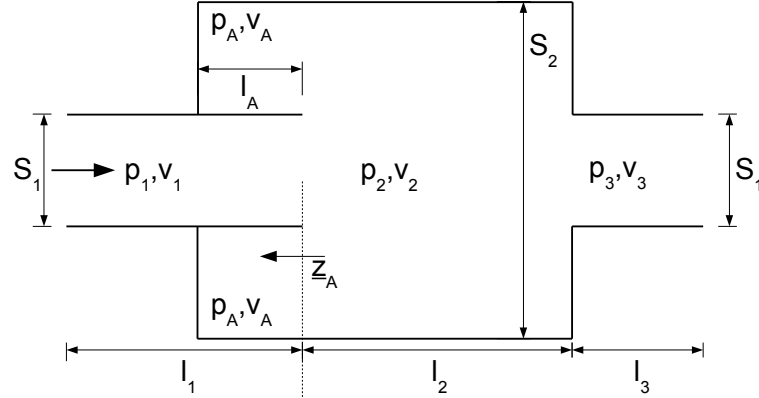


Abbildung 2.30: $\lambda/4$ -Resonator mit Kammer der Länge $l_A + l_2$

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{Rohr1} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{QmR} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr2} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Sprung} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr3} \quad (2.103)$$

Unter Vernachlässigung des Eingangs- und des Ausgangsrohres vereinfacht sich die Gesamtmatrix zu:

$$\begin{aligned} \underline{\mathbf{T}}' &= \underline{\mathbf{T}}_{QmR} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Rohr2} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{Sprung} \\ &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_A}{S_1} \cdot \frac{1}{-j Z_0 \cot(k l_A)} & \frac{S_2}{S_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(k l_2) & j Z_0 \sin(k l_2) \\ \frac{j}{Z_0} \sin(k l_2) & \cos(k l_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{S_1}{S_2} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \cos(k l_2) & j Z_0 \cdot \frac{S_1}{S_2} \cdot \sin(k l_2) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \left(\frac{S_A}{S_1} \frac{\cos(k l_2)}{\cot(k l_A)} + \frac{S_2}{S_1} \sin(k l_2) \right) & \cos(k l_2) - \frac{S_A}{S_2} \frac{\sin(k l_2)}{\cot(k l_A)} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.104)$$

Der Transmission Loss L_{TL} eines $\lambda/4$ -Resonators mit Kammer ist durch folgende Gleichung gegeben und in Abbildung 2.31 zu sehen:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(2 \cdot \cos(k l_2) - \frac{S_A}{\cot(k l_A)} \cdot \frac{\sin(k l_2)}{S_2} + j \cdot \left(\left(\frac{S_1}{S_2} + \frac{S_2}{S_1} \right) \cdot \sin(k l_2) + \frac{S_A}{\cot(k l_A)} \cdot \frac{\cos(k l_2)}{S_1} \right) \right) \right| \quad \text{in [dB]} \quad (2.105)$$

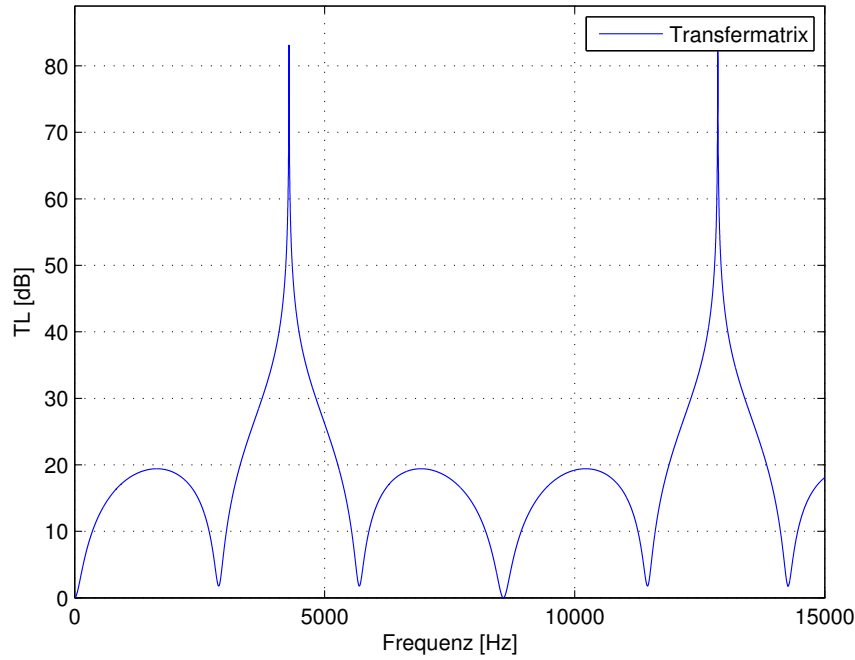


Abbildung 2.31: Transmission Loss des $\lambda/4$ -Resonators mit Kammer ($l_A = 2$ cm, $l_2 = 4$ cm und $S_2/S_1 = 16$)

Die deutlich erkennbaren Überhöhungen des Transmission Loss bei 4287 Hz und 12862 Hz lassen sich auf die Länge l_A des $\lambda/4$ -Resonators zurückführen (s. Gl. 2.30) und die kammfilterartige Form lässt sich mit der umschließenden Kammer der Länge $l_A + l_2$ erklären und vergleichen (s. Abb. 2.29).

2.3.9 Helmholtz-Resonator mit zylindrischem Volumen

Auch ein Helmholtz-Resonator mit zylindrischem Volumen (Kammer) lässt sich über eine Transfermatrix beschreiben (s. Abb. 2.32). Hierbei sind das Volumen V , die beiden Querschnitte S_1 und S_2 , sowie die Abstände l_1 , l_2 und der Radius r_H des Resonatorhalses (bzw. die Querschnittsfläche S_H) relevant für die Resonanzfrequenz und den Verlauf des Transmission Loss.

Die Resonanzfrequenz lässt sich wieder mit Gleichung 2.38 bestimmen und kann, wie schon beim Helmholtz-Resonator-Grundelement, in die Gleichung der Eingangsimpedanz $\underline{Z}_H$ eingesetzt werden.

Durch die Position des Resonanzloches in Kombination mit dem zylindrischen Kammervolumen, wirkt dieser Schalldämpfer nicht nur nach dem Helmholtz-Prinzip, sondern zusätzlich als $\lambda/4$ -Resonator mit den Längen l_1 und l_2 . Aus diesem Grund kommt für die gesamte Eingangsimpedanz $\underline{Z}_{HmK}$ des Helmholtz-Resonators mit zylindrischem Volumen noch ein rein imaginärer Teil hinzu, der in diesem Fall für die schmalbandigen Resonanzspitzen bei 5327 Hz und 10654 Hz verantwortlich ist (s. Gl. 2.107, Gl. 2.108 und Abb. 2.33) [6].

$$\underline{\mathbf{T}}_{HmK} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ \frac{S_H}{S_1} \frac{1}{\underline{Z}_{HmK}} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.106)$$

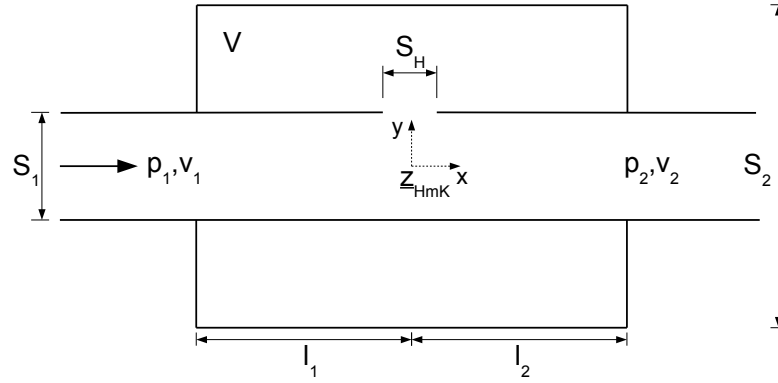


Abbildung 2.32: Helmholtz-Resonator mit zylindrischem Volumen

$$\underline{Z}_{HmK} = \underline{Z}_H + \underline{Z}_{zK} \quad (2.107)$$

$$\underline{Z}_{zK} = -j \cdot Z_0 \cdot \frac{S_H}{S_z} \frac{1}{\tan(k l_1) + \tan(k l_2)} \quad \text{mit } S_z = S_2 - S_1 \quad (2.108)$$

Die Abstände l_1 und l_2 bestimmen die Stelle des Resonanzloches in der Kammer, die entscheidend für die Frequenzen der zusätzlichen Dämpfungsspitzen im Transmission Loss ist.

$$\underline{Z}_{HmK} = R + j \cdot \frac{Z_0 c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right) - j \cdot \frac{S_H}{S_z} \frac{Z_0}{\tan(k l_1) + \tan(k l_2)} \quad (2.109)$$

Auch hier können die Transfermatrizen des Eingangs- und Ausgangsrohres wieder vernachlässigt werden und der Transmission Loss L_{TL} ergibt sich zu:

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(2 + \frac{S_H}{S_1} \frac{1}{\frac{R}{Z_0} + j \left(\frac{c \cdot S_H}{V \cdot 2\pi f_H} \cdot \left(\frac{f}{f_H} - \frac{f_H}{f} \right) - \frac{S_H}{S_z} \frac{1}{\tan(k l_1) + \tan(k l_2)} \right)} \right) \right| \text{ in [dB]}$$

(2.110)

Abbildung 2.33 zeigt den Transmission Loss für einen Schalldämpfer, bei dem die Abmessungen so gewählt sind, wie sie in Kapitel 5 verwendet werden. Man kann die schmalbandigen Resonanzen bei 5327 Hz und 10654 Hz deutlich erkennen. Bei der Berechnung erreichen diese Spitzen den selben Wert, wie die Resonanz des Helmholtz-Resonators.

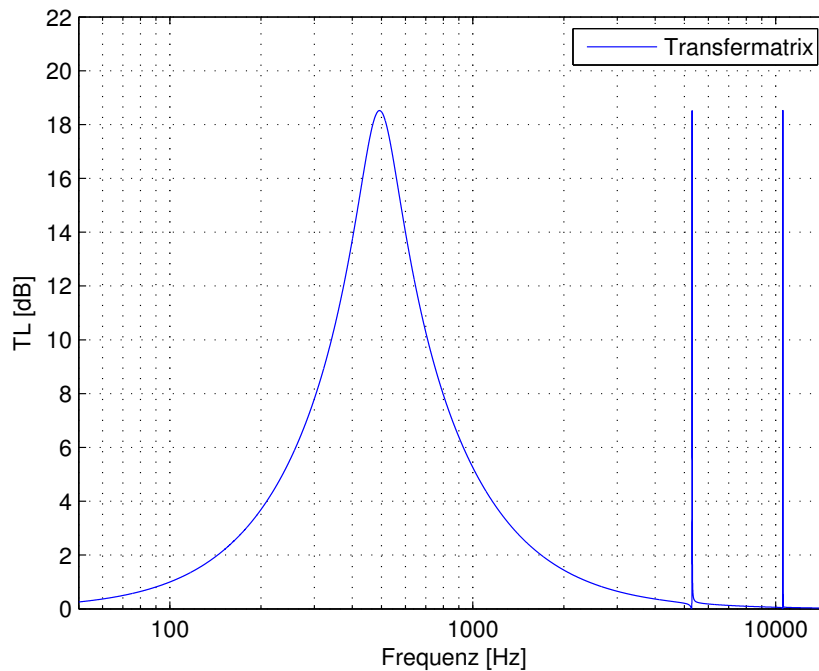


Abbildung 2.33: Transmission Loss des Helmholtz-Resonators mit zylindrischem Volumen ($l_1 = l_2 = 3.25$ cm, $r_H = 0.3$ cm und $S_2/S_1 = 16$, bei einem Reibwiderstand von $R = 10$ [Ns/m³])

2.3.10 Beispiel-Schalldämpfer

Um den Transmission Loss eines beliebigen Schalldämpfers zu erhalten, müssen alle Transfermatrizen der einzelnen Elemente, die bei diesem Schalldämpfer vorkommen, in der richtigen Reihenfolge multipliziert werden und die vier Elemente dieser Gesamtmatrix in die Gleichung zur Berechnung nach der Kettenmatrixmethode eingesetzt werden (s. Gl. 2.75).

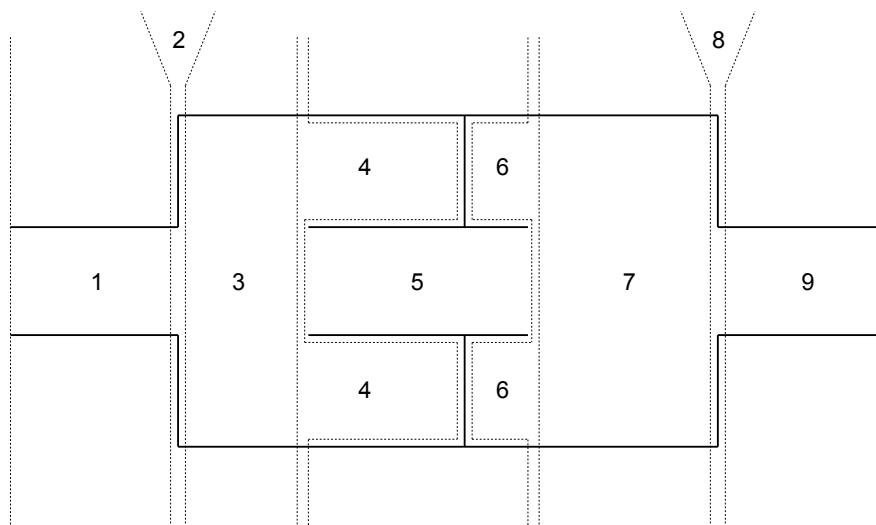


Abbildung 2.34: Grundelemente eines beliebigen Schalldämpfers [6]

Ein Schalldämpfer, wie er in Abbildung 2.34 nochmals zu sehen ist, soll als Beispiel dienen. Die Maße des Schalldämpfers werden so festgelegt, wie sie für spätere Konstruktionen zum Einsatz kommen.

Die Längen des Ein- und des Ausgangsrohres (Elemente 1 und 9) werden mit $l_1 = l_9 = 0$ festgelegt. Ihre Radien, sowie der Radius des Elementes 5 beträgt 5 mm und die Radien der Elemente 3 und 7 betragen 20 mm. So ergibt sich für die Elemente 2 und 8 ein Querschnittsverhältnis von 16 bzw. 1/16 und die Querschnittsfläche der Elemente 4 und 6 wird zu $S_4 = S_6 = S_3 - S_1$. Die Gesamtlänge des Schalldämpfers soll 6 cm betragen und es werden die Längen der Elemente 3 und 7 mit $l_3 = 1$ cm und $l_7 = 2$ cm gewählt und für die Länge des Elementes 5 gilt $l_5 = 3$ cm. Daraus ergeben sich die übrigen beiden Längen zu $l_4 = 2$ cm und $l_6 = 1$ cm, wenn man vorgibt, dass sich im Inneren des Dämpfers zwei gleich große Kammern befinden.

Da für Ein- und Ausgangsrohr eine Länge von 0 cm angenommen wird, werden die Transfermatrizen dieser Elemente zu Einheitsmatrizen und können daher weggelassen werden. Die gesamte Transfermatrix ergibt sich somit zu:

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_{\text{Sprung1}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr3}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{QmR1}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr5}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{QmR2}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Rohr7}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_{\text{Sprung2}} \quad (2.111)$$

Abbildung 2.35 zeigt den Verlauf des Transmission Loss L_{TL} für den oben beschriebenen Schalldämpfer.

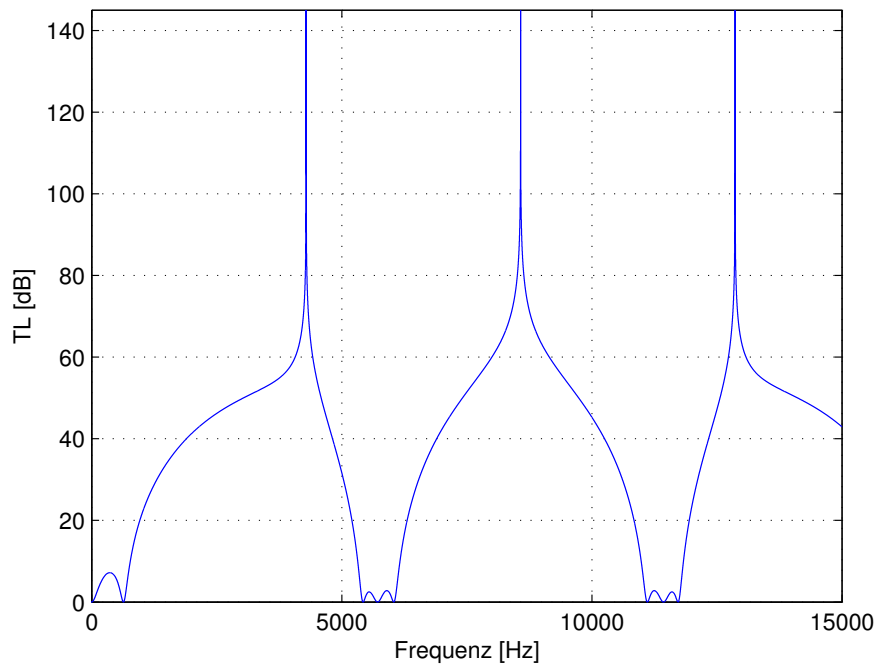


Abbildung 2.35: Transmission Loss des Beispiel-Schalldämpfers

In der Grafik kann man deutlich die drei Resonanzen der $\lambda/4$ -Resonatoren erkennen. Die Spitzen bei 4287 Hz und bei 12861 Hz entstehen durch das Rohr mit 2 cm Überstand in eine Kammer ($\lambda/4$ und $3\lambda/4$) und die Spitze bei 8575 Hz resultiert aus dem Rohr mit 1 cm Überstand in die andere Kammer.

Die Kammern mit der Länge $l_K = 3$ cm sind für einen kammfilterartigen Verlauf mit Minima bei 0 Hz, 5716 Hz und 11430 Hz im Frequenzbereich von 0 Hz bis 15 kHz verantwortlich. Und die maximale Dämpfung ist hierbei über das Querschnittsflächenverhältnis gegeben und beträgt 18,1 dB (für $S_2/S_1 = 16$). Dieser Verlauf ist den Resonanzen der $\lambda/4$ -Resonatoren überlagert.

3

Aufbau des Prüfstandes

In diesem Kapitel wird der Aufbau des Prüfstandes beschrieben. Aus den theoretischen Überlegungen heraus wurden die Materialien ausgewählt und der gesamte Aufbau entworfen. Als Unterstützung für die Konstruktionszeichnungen und die Bemaßung der Fertigungsteile wurde das 3D-Zeichenprogramm *Rhinoceros*[®] (Version 4.0) verwendet.

3.1 Vorgaben

Beim Aufbau dieses Schalldämpferprüfstandes müssen verschiedene Besonderheiten bedacht werden, die bei Messungen in Impedanzrohren mit größerem Durchmesser nicht problematisch sind. Hier kommt vor allem die Anbindung der Quellen zum tragen, da der Membrandurchmesser der Lautsprecherchassis groß im Vergleich zum Messrohrdurchmesser ist, der mit ca. 10 mm angenommen wird. Und auch bei den Messmikrofonen und dem Messobjekt selbst bedarf es einer genaueren Überlegung zur Anbindung. Auf die Anbindungsteile wird in Kapitel 3.2.4 näher eingegangen.

Der gesamte Prüfstand soll flexibel und möglichst kompakt werden, so dass er auch mobil eingesetzt werden kann und Messungen an verschiedensten Schalldämpfern möglich sind.

3.2 Einzelkomponenten

3.2.1 Lautsprecher

Die Anforderungen an das Lautsprecherchassis sind in erster Linie ein möglichst linearer Frequenzgang von 100 Hz bis 10000 Hz und dies bei einem möglichst kleinen Membrandurchmesser, damit die Anbindung an das Messrohr leichter fällt. Weiters wurde bei der Auswahl auch der Preis und die Thiele–Small–Parameter bedacht, aus denen das geschlossene Gehäuse berechnet wurde.

So fiel die Wahl auf das *Visaton W100S* Chassis in der 8 Ω Version (siehe Abb. 3.1), dessen wichtigste Daten in Tabelle 3.1 und dessen Abmessungen in Abbildung 3.2 zu sehen sind.

Aus den durch das Chassis vorgegebenen Thiele–Small–Parametern wurde dann ein geschlossenes Lautsprechergehäuse entworfen. Das Volumen beträgt 2,9 l und das Gehäuse wurde mit Dämmmaterial (poröser Schaumstoffabsorber) ausgekleidet.

Tabelle 3.1: Eckdaten und Thiele–Small–Parameter des Visaton W100S

Membrandurchmesser	94 mm
Nennbelastbarkeit	30 W
Nennimpedanz	8 Ohm
Untere Grenzfrequenz	96 Hz
Resonanzfrequenz	63 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel	86 dB (1W/1m)
Gleichstromwiderstand	6,7 Ohm
Schwingspuleninduktivität	0,9 mH
Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen	5,41 l
Mechanische Güte	2,74
Elektrische Güte	0,67
Gesamtgüte	0,54

Als Material für das Gehäuse wurde eine mitteldichte Holzfaserplatte (MDF) mit 16 mm Stärke gewählt. Die einzelnen Teile sind zugesägt und miteinander verleimt worden. Hierbei ist die Rückwand des Gehäuses angeschrägt, um stehende Wellen im Inneren zu vermeiden (s. Abb. 3.5) [8]. Zuletzt wurden die Gehäuse noch lackiert und die Chassis und Anschluss terminals eingeschraubt.

**Abbildung 3.1:** Visaton W100S (8Ω) Lautsprecherchassis

Der fertige Lautsprecher erreicht nun einen theoretischen Übertragungsbereich (−10 dB) von 85 Hz bis 15 kHz, was dem angestrebten Terzmittenband–Frequenzbereich von 100 Hz bis 10000 Hz genügt. Die geforderte untere Terzbandgrenzfrequenz liegt hier bei 89 Hz und die obere Terzbandgrenzfrequenz bei 11225 Hz (s. Gl. 3.1 und Gl. 3.2).

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o} \qquad \frac{f_o}{f_u} = 2^{\frac{1}{3}} \qquad (3.1)$$

$$f_u = \frac{f_m}{2^{\frac{1}{6}}} \qquad f_o = f_m \cdot 2^{\frac{1}{6}} \qquad (3.2)$$

f_m Terzmittenfrequenz [Hz]
 $f_{o,u}$ obere bzw. untere Terzbandgrenzfrequenz [Hz]

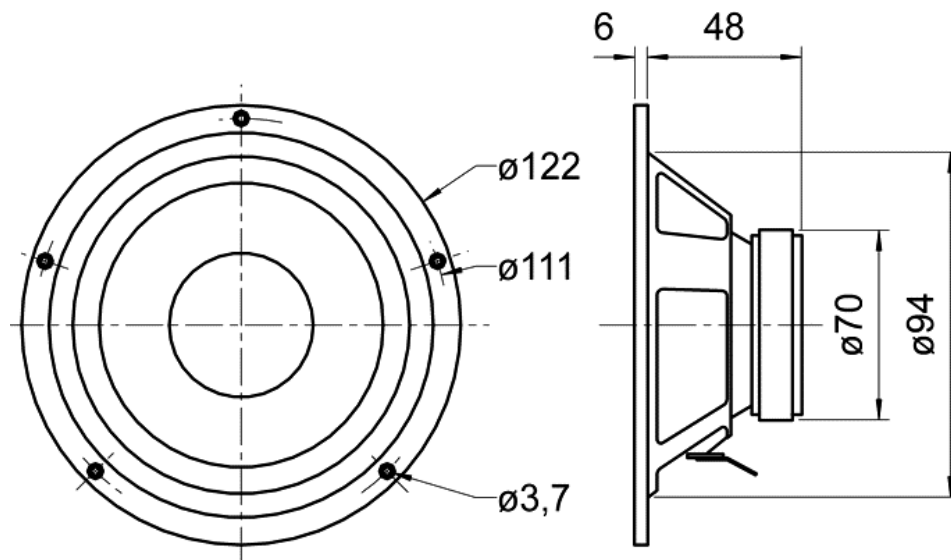


Abbildung 3.2: Maße des Visaton W100S

Die Kosten belaufen sich pro Lautsprecher auf 27 EUR für das Visaton Chassis, 8 EUR für das Anschlussterminal und ca. 8 EUR für die MDF-Teile.

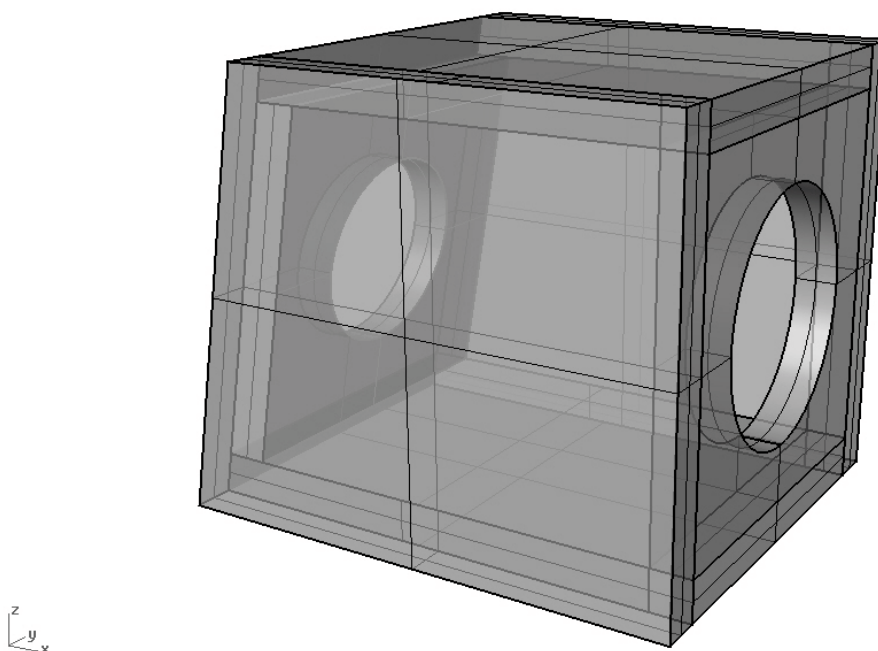


Abbildung 3.3: 3D-Modell des Lautsprechergehäuses

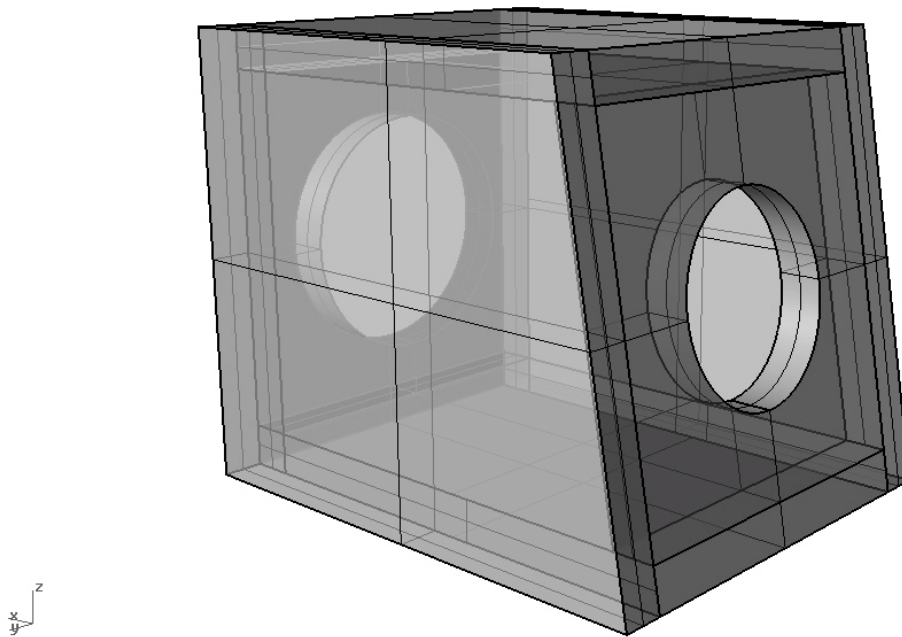


Abbildung 3.4: 3D-Modell des Lautsprechergehäuses

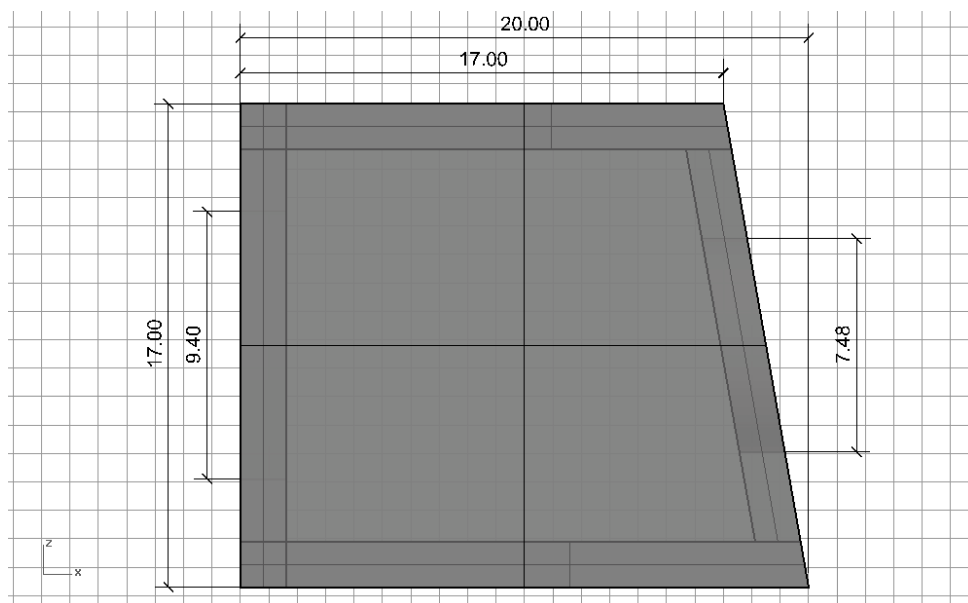


Abbildung 3.5: Aufriss des Lautsprechergehäuses mit Maßen in cm

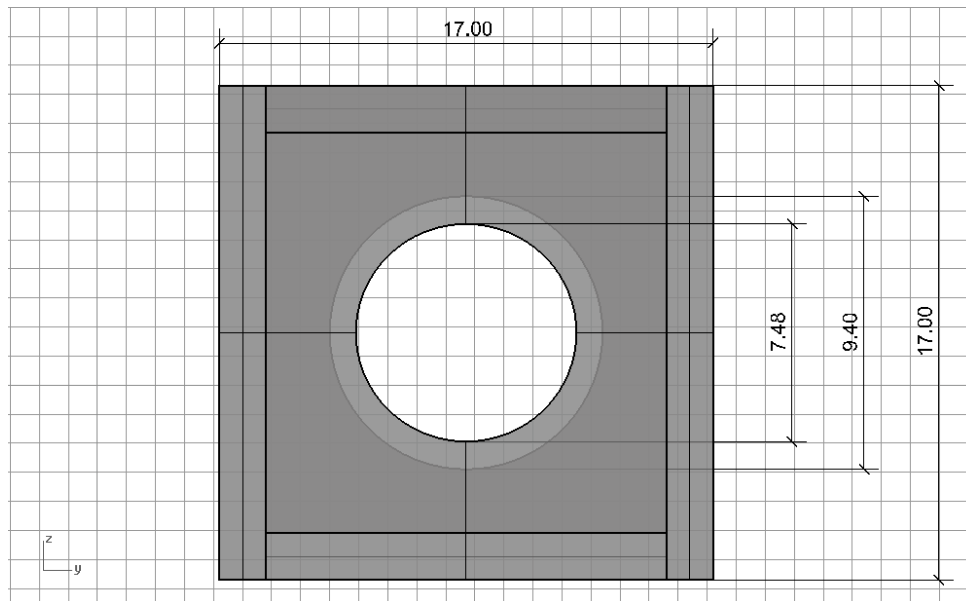


Abbildung 3.6: Rückansicht des Lautsprechergehäuses mit Maßen in cm

3.2.2 Messmikrofone

Bei der Auswahl der Messmikrofone wurden mehrere Mikrofone verschiedener Hersteller miteinander verglichen (siehe Tabelle 3.2). Die Anforderung für eine direkte Anbindung ist in erster Linie ein kleiner Mikrofonskapseldurchmesser. Hierbei hat der Hersteller Brüel & Kjaer zwei Modelle entwickelt, die eine gute Anbindung ermöglichen würden, aber die Preise hierfür sind für das Budget dieser Arbeit deutlich zu hoch (Sondenmikrofon 4182 und das System aus der Mikrofonskapsel 4138 mit dem Vorverstärker 2670).

Die Messmikrofone der Hersteller Audix und Beyerdynamic sind eher für den *Consumer*-Bereich gedacht, und haben XLR-Anschlüsse, die mit 48V-Phantomspannung gespeist werden. Für ein professionelles Messsystem kommen sie deshalb nicht in Frage. Auch die Mikrofone vom Typ 46BD und 40DD mit Vorverstärker 26CD der Firma G.R.A.S. sind preislich zu teuer, da acht Mikrofone für diesen Prüfstand benötigt werden.

Aber die meisten Hersteller bieten auch Array-Mikrofone an, die klein und leicht sind und sich preislich doch sehr von den teuren Modellen unterscheiden. Hier scheiden die Modelle 4957 von Brüel & Kjaer und 130E20 von PCB aus, weil ihr Frequenzbereich nur bis 10 kHz reicht.



Abbildung 3.7: G.R.A.S. 40PL Array-Messmikrofon

Da die Array-Mikrofone der Firma G.R.A.S. preiswerter sind und das SPSC schon Erfahrungen mit Mikrofonen dieses Herstellers gesammelt hat, fiel die Wahl auf das G.R.A.S. 40PL Array-Mikrofon (siehe Abb. 3.7). Dieses hat zwar einen kleineren Übertragungsfaktor als das Modell 40PH, aber dafür einen größeren Dynamikbereich, was für diesen Prüfstand relevanter erschien. Der Grenzschalldruckpegel des 40PL liegt bei 150 dB.

Der Anschluss dieses Mikrofons ist als SMB-Stecker ausgeführt, wie auch die Schnittstelle des Müller-BBM Messsystems PAK mit dem der Prüfstand betrieben wird. Da die koaxialen Anschlusskabel des Systems von SMB- auf BNC-Anschlüsse geführt werden, wurden zu den Mikrofonen noch Kabel von BNC- auf SMB-Buchsen mitbestellt.

Tabelle 3.2: Messmikrofone (Preise exkl. MwSt.)

Modell	Durchmesser	Frequenzbereich	Dynamik	Übertragungsfaktor	Preis
Audix TM-1	8 mm	20–25000 Hz	112 dB	6,5 mV/Pa	220 EUR
Beyerdynamic MM1	9 mm	20–20000 Hz	100 dB	15 mV/Pa	135 EUR
Brüel & Kjaer 4138 + 2670	3,5 mm	6–140000 Hz	116 dB	1 mV/Pa	3827 EUR
Brüel & Kjaer 4182	1,3 mm	1–20000 Hz	122 dB	3,2 mV/Pa	6627 EUR
Brüel & Kjaer 4957 Array	7 mm	50–10000 Hz	102 dB	12,5 mV/Pa	489 EUR
Brüel & Kjaer 4958 Array	7 mm	10–20000 Hz	112 dB	12,5 mV/Pa	501 EUR
G.R.A.S. 40DD + 26CD	7 mm	10–30000 Hz	134 dB	0,7 mV/Pa	2587 EUR
G.R.A.S. 46BD	7 mm	10–25000 Hz	134 dB	1,6 mV/Pa	1510 EUR
G.R.A.S. 40PH Array	7 mm	10–20000 Hz	103 dB	50 mV/Pa	390 EUR
G.R.A.S. 40PL Array	7 mm	10–20000 Hz	118 dB	10 mV/Pa	390 EUR
PCB 130E20 Array	7 mm	20–10000 Hz	122 dB	45 mV/Pa	408 EUR

So belaufen sich die Kosten für die Mikrofone auf je 390 EUR (exkl. MwSt.) und für die Anschlusskabel auf je 80 EUR (exkl. MwSt.).

Es wurden acht Mikrofone mit Anschlusskabeln verwendet, um bei den Messungen die Mikrofone nicht umstecken zu müssen, da für ein vollwertiges Ergebnis drei Messungen nötig sind (verschiedene Mikrofonabstände).

3.2.3 Messrohre

Für die Konstruktion der Messrohre gilt es zu beachten, dass die Anbindung an die Quellen und Mikrofone stabil und doch flexibel gelingt. Als Anbindung an den Trichter und das Messobjekt wurde eine Steckverbindung gewählt, bei der das Messrohr beidseitig eine Nut hat und mit den anderen Teilen zusammengesteckt werden kann. Weiters sind auf beiden Seiten des Messrohres Gewinde eingeschnitten, in die Schrauben gedreht werden um das Rohr an der Nut/Feder-Verbindung zu fixieren. Die Mikrofone werden mit Silikondichtungen in Bohrungen gesteckt.

Um die Schwingungen, die durch den Schall im Messrohr entstehen minimal zu halten hat das Messrohr eine Wandstärke von 4,9 mm. Der Innendurchmesser des Rohres beträgt von der Anbindung des Trichters bis zur Anbindung an das Messobjekt 10,2 mm. Die Bohrungen für die Mikrofone haben einen Durchmesser von 9 mm, der mit Silikondichtungen auf den Mikrofondurchmesser von 7 mm reduziert wird. Die Gesamtlänge jedes Messrohres beträgt 250 mm und als Material wurde Aluminium verwendet.

Allgemein gilt für die Schallausbreitung in Rohren eine obere Grenzfrequenz (abhängig vom Rohrdurchmesser d), die nicht überschritten werden soll, da sich ab dieser Frequenz auch Quermoden im Rohr ausbreiten können [9]:

$$f_{max} = \frac{0,58 \cdot c_0}{d} = \frac{0,58 \cdot c_0}{0,01 \text{ m}} = 19894 \text{ Hz} \quad (3.3)$$

Die Bohrungen für die Mikrofone haben 25 mm Abstand vom Rand des Rohres und der Abstand der Bohrungen zueinander ist ausschlaggebend für den messbaren Frequenzbereich (s. Abb. 3.8 bis 3.10).

Für die Messungen an diesem Prüfstand ist ein Frequenzbereich von 100 Hz bis 10000 Hz (Terzbandmittenfrequenzen) gefordert, was einem effektiven Messbereich von 89 Hz bis 11225 Hz entspricht. Aus der Norm DIN EN ISO 10534-2 für Impedanzrohrmessungen lassen sich die untere und die obere Grenzfrequenz nach folgenden Formeln berechnen [9]:

$$f_u = \frac{0,05 \cdot c_0}{s_1} \quad \text{bzw.} \quad s_1 = \frac{0,05 \cdot c_0}{f_u} \quad (3.4)$$

$$f_o = \frac{0,45 \cdot c_0}{s_2} \quad \text{bzw.} \quad s_2 = \frac{0,45 \cdot c_0}{f_o} \quad (3.5)$$

Wenn man nun $f_u = 89 \text{ Hz}$ und $f_o = 11225 \text{ Hz}$, sowie die Schallgeschwindigkeit bei 20°C ($c_0 = 343 \frac{\text{m}}{\text{s}}$) einsetzt, lassen sich die beiden Abstände errechnen. Demnach beträgt $s_1 = 193 \text{ mm}$ für die kleinste messbare Frequenz und $s_2 = 13,7 \text{ mm}$ für die größte messbare Frequenz. Die effektiven Mikrofonabstände wurden in Folge mit $s_{1,e} = 200 \text{ mm}$ und $s_{2,e} = 13 \text{ mm}$ festgelegt. So lässt sich mit dem weiten Mikrofonabstand (200 mm) ein Frequenzbereich von 86 Hz bis 772 Hz messen und mit dem engen Mikrofonabstand ein Frequenzbereich von 1320 Hz bis 11870 Hz.

Aufgrund dieser Überlegungen fällt gleich auf, dass ein Teil im mittleren Frequenzbereich gar nicht abgedeckt ist (772 Hz bis 1320 Hz), weshalb eine vierte Mikrofonbohrung hinzukommen muss. Diese wird bei einem effektiven Mikrofonabstand von $s_{3,e} = 26 \text{ mm}$ realisiert und mit dieser Messung lässt sich ein Frequenzbereich von 660 Hz bis 5937 Hz abdecken.

Die genauen gültigen Messbereiche zu diesen drei Mikrofonabständen sind nochmals in Tabelle 3.3 aufgelistet.



Abbildung 3.8: 3D-Modell des Messrohres

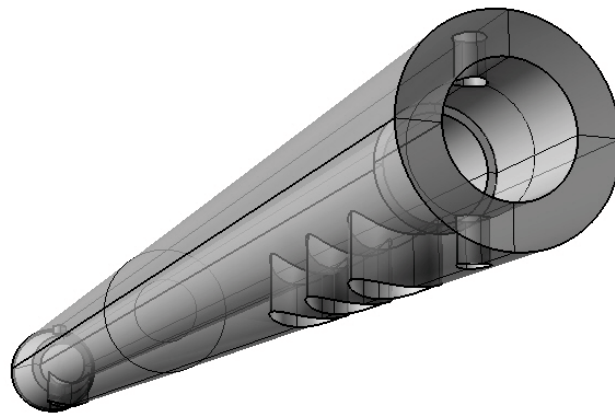


Abbildung 3.9: 3D-Modell des Messrohres

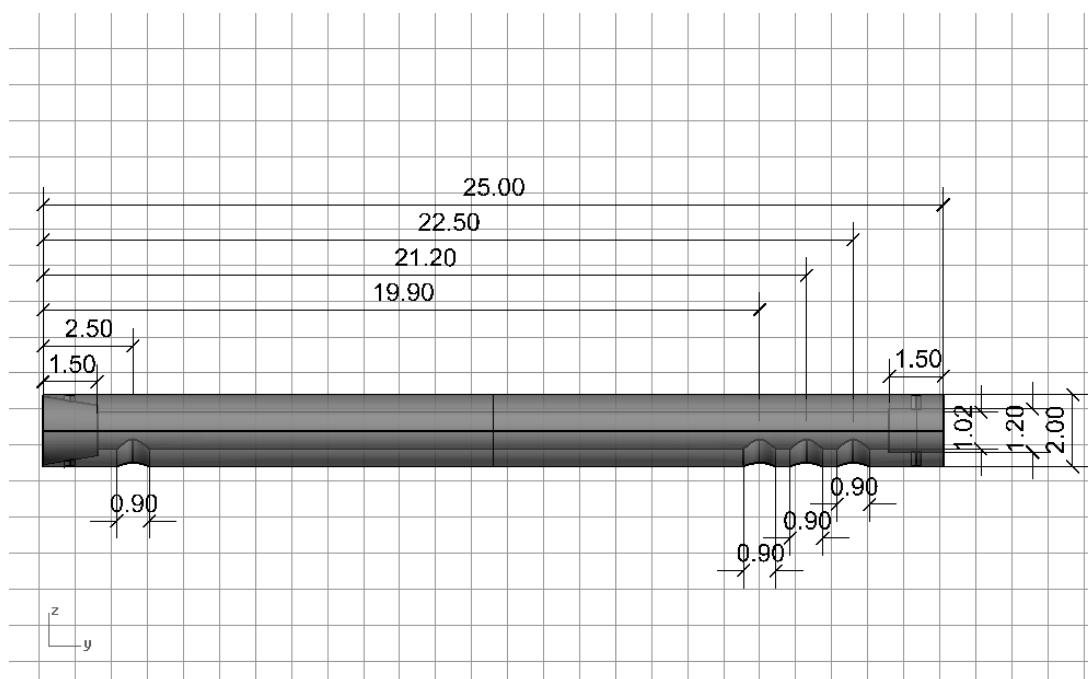


Abbildung 3.10: Aufriss des Messrohres mit Maßen in cm

Tabelle 3.3: Gültige Messbereiche der einzelnen Mikrofonabstände

Mikrofonabstand	untere Grenzfrequenz	obere Grenzfrequenz
200 mm	86 Hz	772 Hz
26 mm	660 Hz	5937 Hz
13 mm	1320 Hz	11870 Hz

Ist es beispielsweise für Testzwecke erwünscht, nicht benötigte Messbohrungen gut zu verschließen, wurden hierfür in der Werkstatt des Institutes für Elektronik an der TU Graz vier Stopfen aus Aluminium gefertigt (s. Abb. 3.11).

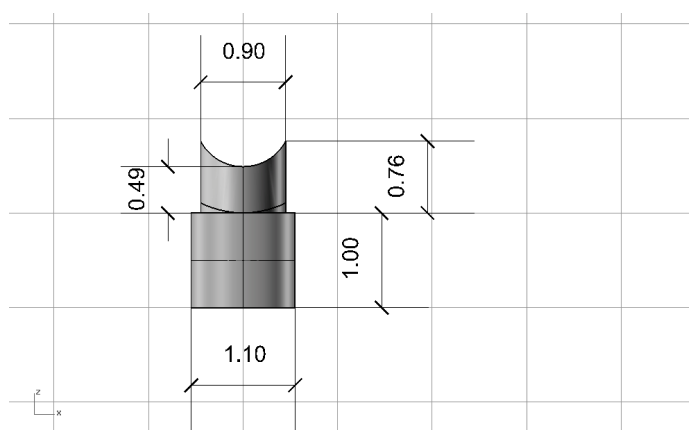


Abbildung 3.11: Verschluss für nicht benötigte Messbohrungen (mit Maßen in cm)

3.2.4 Anbindungsteile

Um das Quellsignal des Lautsprechers in das Messrohr einzuspeisen, wurde ein Trichter aus Aluminium konstruiert, der vom Durchmesser des Chassis auf den Messrohrdurchmesser zusammenläuft. Dieser Trichter wird mit einer Dichtung an das Lautsprechergehäuse montiert. Auf der anderen Seite wurde er exakt an das Messrohr angepasst. Wie beim Messrohr bereits beschrieben, wird diese Verbindung mit einer Stellschraube fixiert.

Der Trichter ist ein Serienmodell und wird von der Radkersburger Metallwarenfabrik in Bad Radkersburg gefertigt. In der Werkstatt des Institutes für Elektronik an der TU Graz wurde er dann für diesen Prüfstand adaptiert:

Der Originaltrichter wurde so gekürzt, dass er exakt den Durchmesser des Messrohres hat und der Flansch zum Anschrauben an den Lautsprecher wurde angebracht. Die genauen Maße des Trichters sind in Abbildung 3.12 zu sehen. Die Abbildungen 3.13 und 3.14 zeigen das 3D-Modell des Trichters.

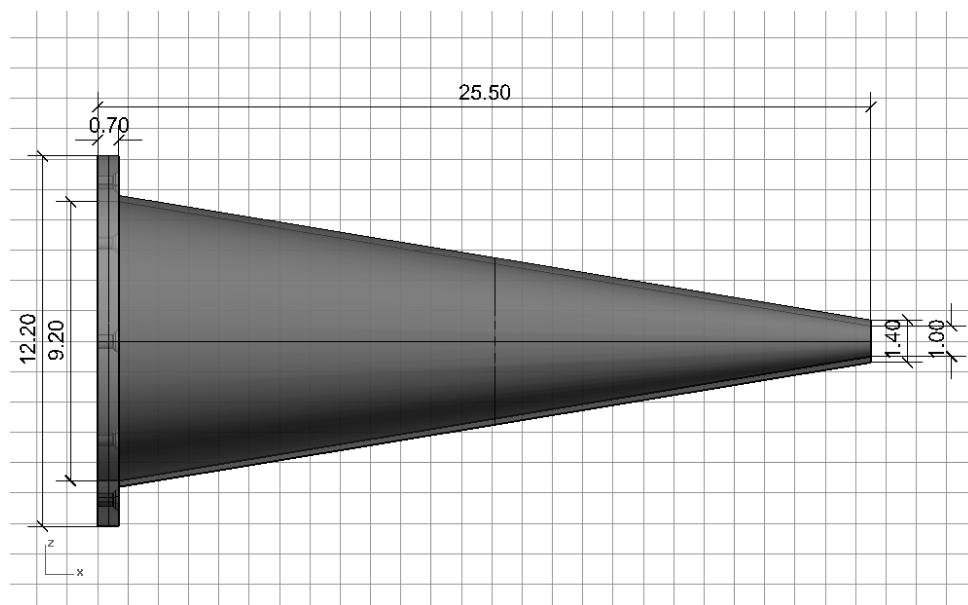


Abbildung 3.12: Aufriss des Trichters mit Maßen in cm

Die Kosten für die Fertigung der Trichter und der Messrohre belaufen sich auf 450 EUR für Material und Werkzeuge und 150 EUR für die Arbeitszeit.

Ein weiteres Anbindungsteil dient der Ankopplung der Messrohre an das Messobjekt. Auch hier kommt seitens des Messrohres wieder eine Nut/Feder-Verbindung zum Einsatz, in welcher der Innendurchmesser des Messrohres auf den Innendurchmesser des jeweiligen Messobjekts angepasst wird.

Auf der anderen Seite dieses Koppelstückes ist die Anbindung an den Ein- bzw. Ausgang des Messobjekts realisiert.

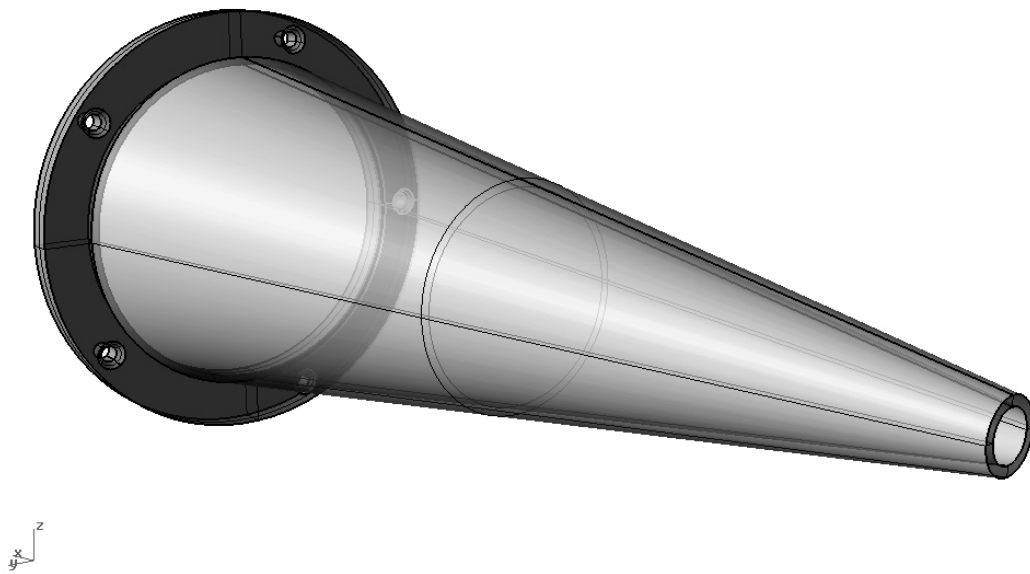


Abbildung 3.13: 3D-Modell des Trichters

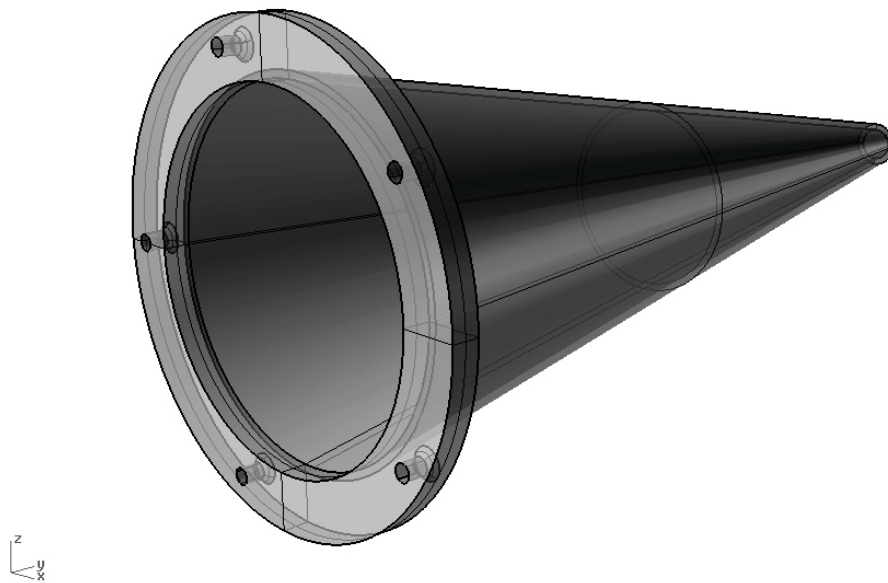


Abbildung 3.14: 3D-Modell des Trichters

3.3 Gesamtaufbau

Im Folgenden wird der Gesamtaufbau des Prüfstandes aus den einzelnen Komponenten beschrieben.

Am Prüfstand sollen Messungen an den verschiedensten Schalldämpfern mit kleinem Querschnitt möglich sein, weshalb ein möglichst modularer Aufbau realisiert wird. Je nach Schalldämpfer können der Ein- und der Ausgang auf einer Seite liegen oder im 90°- oder 180°-Winkel zueinander (siehe Abb. 3.15). Dementsprechend liegen die beiden Messstrecken annähernd parallel (grün), rechtwinklig (rot) oder gegenüber voneinander (blau). Hier wird nun ein Aufbau in einer rechtwinkligen Variante (rot) beschrieben.

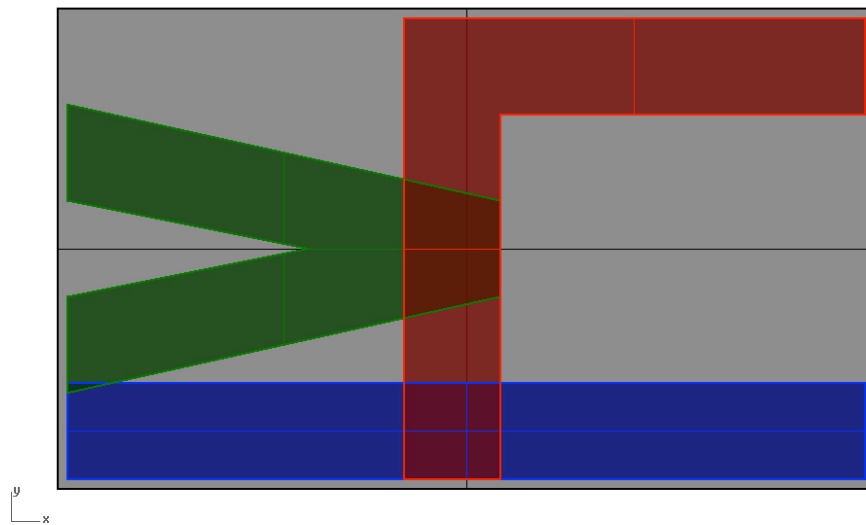


Abbildung 3.15: Ausrichtungen der beiden Messstrecken

Die Höhe der Messstrecken ist abhängig vom Ein- und Ausgang des zu vermessenden Schalldämpfers. So lassen sich die Stützen für die Lautsprecher und die Messrohre mit Flügelmuttern problemlos in ihrer Höhe verstellen.

Unter den Lautsprechern, sowie als Auflage für die Messrohrstützen wurde eine Synthetikkautschukmatte angebracht, um den Messaufbau möglichst gut vor Schwingungen von außen zu schützen (s. Abb. 3.16 bis 3.18). Auch zwischen den Trichtern und den Lautsprecherchassis wurde ein dünner Ring aus Synthetikkauschuk eingeklebt, damit die Verbindung dicht ist und die gesamte Schallenergie in das Messrohr weitergeleitet wird (alle Kautschuk-Teile sind in den folgenden Konstruktionszeichnungen blau eingefärbt (s. Abb. 3.16)).

Die Lautsprechergehäuse stehen auf Stützen und sind fest mit den Trichtern verschraubt worden. Die beiden Messrohre sind auf die Trichter gesteckt und mit den Feststellschrauben fixiert. Die Anbindung der Mikrofone erfolgt von unten und als stabile und dichte Verbindung dient ein Stück Silikonschlauch mit exakt 7 mm Innendurchmesser bei 1 mm Wandstärke. So passen die Mikrofone genau in die Bohrungen im Messrohr. Die Anbindung des Schalldämpfers erfolgt auch über eine Steckverbindung und ist wieder mit den Feststellschrauben fixiert.

In den Abbildungen 3.17 bis 3.21 ist der fertig aufgebaute Prüfstand, sowie die benötigte Hardware mit allen Anschlusskabeln zu sehen. Und in Tabelle 3.4 ist die Gesamtkostenrechnung mit allen Einzelkomponenten aufgelistet.

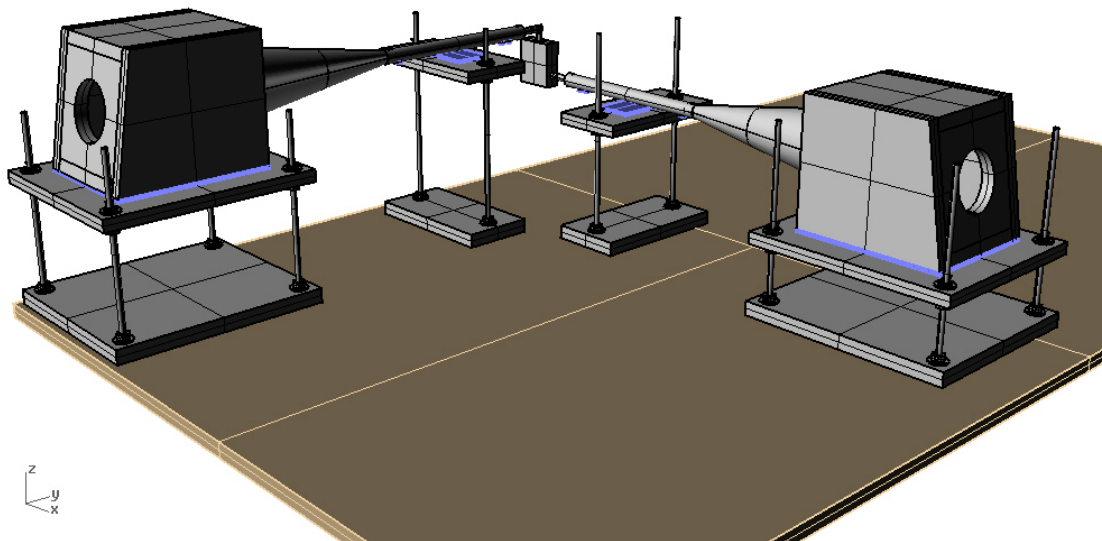
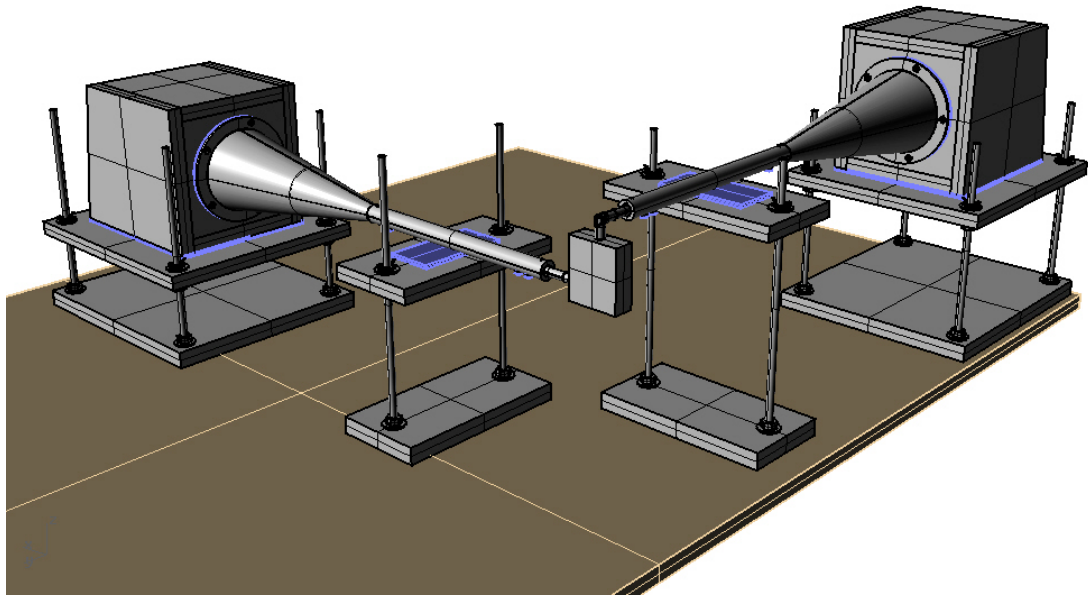


Abbildung 3.16: 3D-Modelle des Gesamtaufbaus

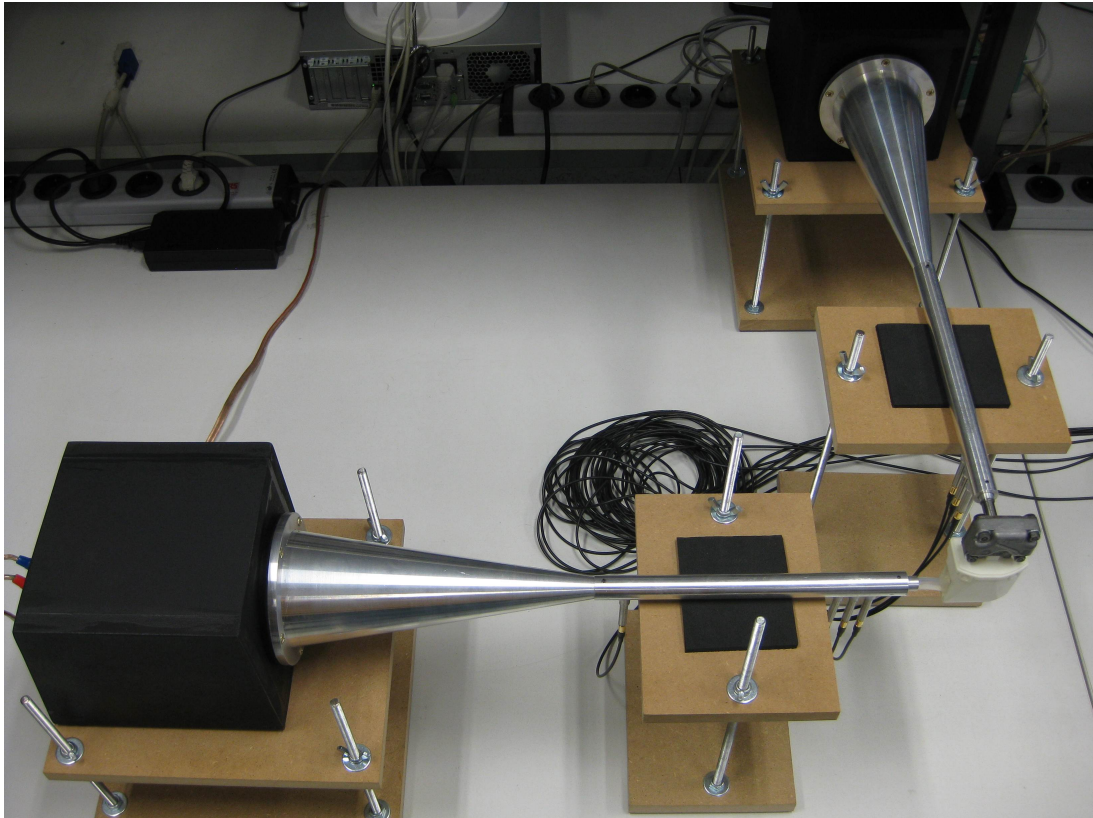


Abbildung 3.17: Prüfstand (Gesamtansicht)

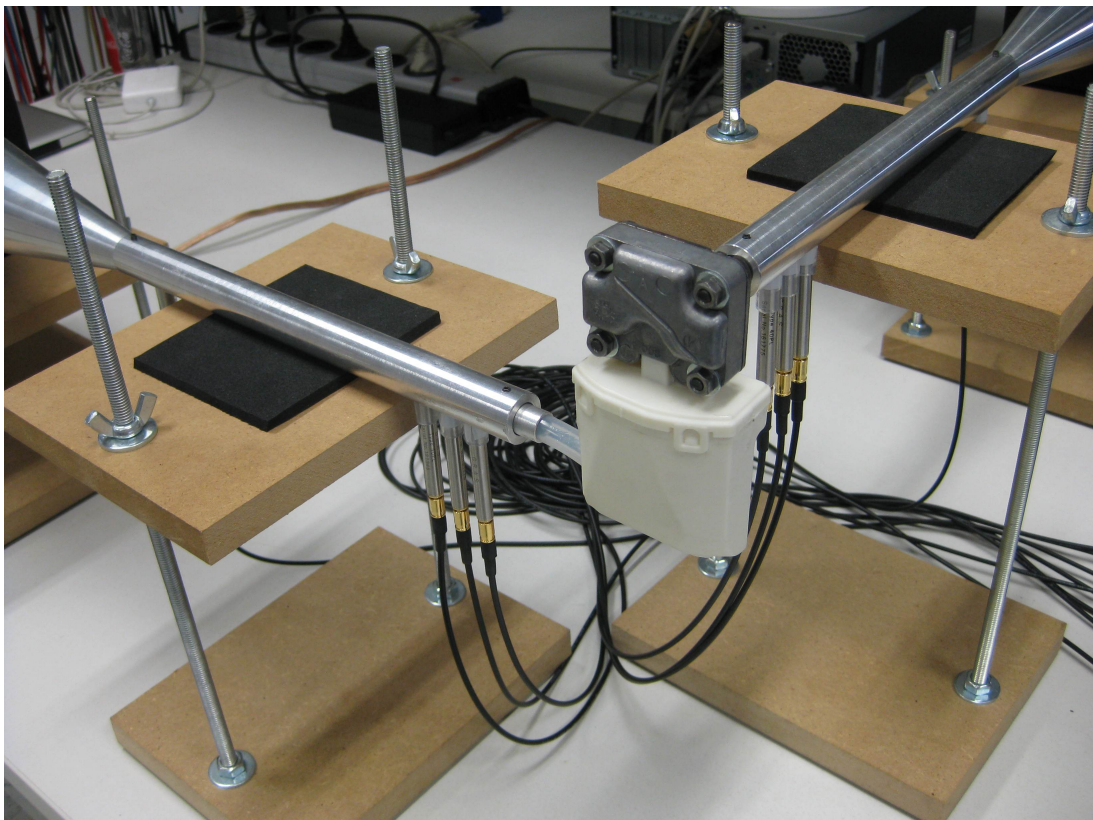


Abbildung 3.18: Prüfstand (Detailansicht)

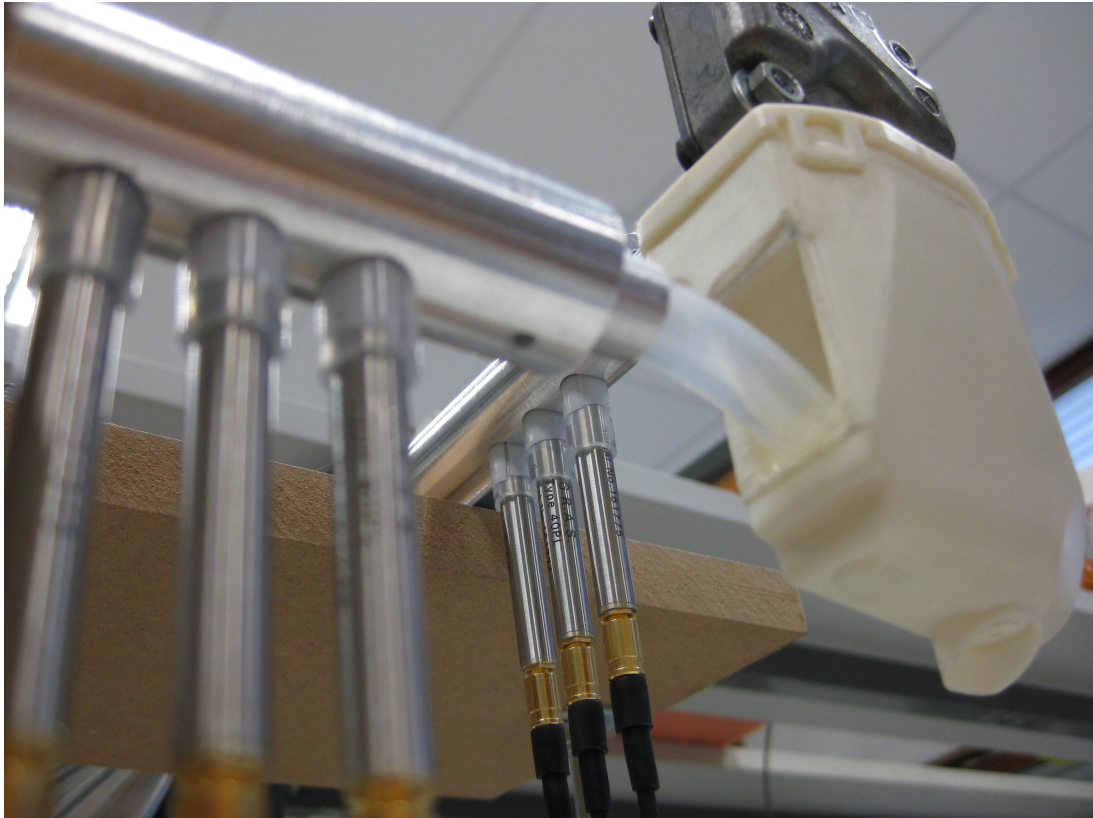


Abbildung 3.19: Mikrofonanbindung und Schalldämpfer

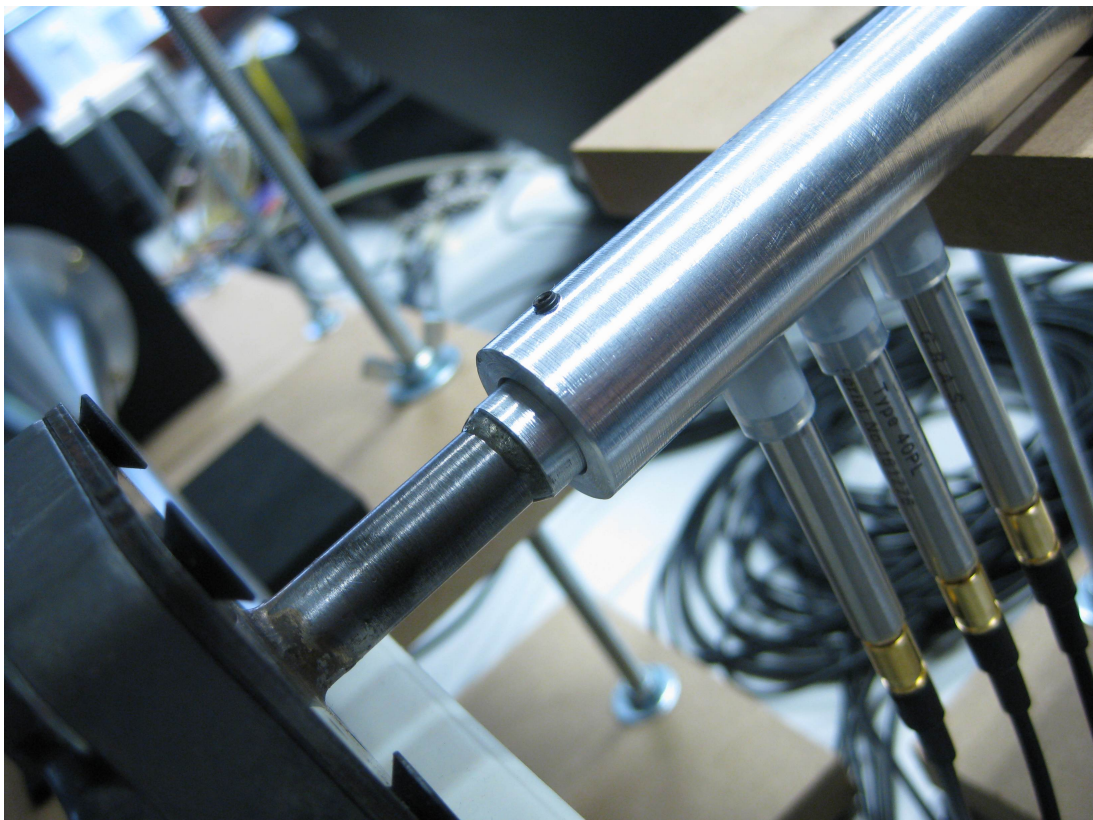


Abbildung 3.20: Anbindung Messrohr-Schalldämpfer



Abbildung 3.21: RME Fireface, PAK-Mobile MKII Interface und Leistungsverstärker

Tabelle 3.4: Gesamtkosten für fertigen Prüfstand (inkl. Mwst.)

2 x Lautsprecherchassis Visaton W100S	54 EUR
2 x Lautsprecher-Anschlussterminal	16 EUR
Holz für Lautsprecher	16 EUR
8 x Messmikrofon G.R.A.S. 40PL	3744 EUR
8 x Anschlusskabel BNC/SMB	768 EUR
2 x Messrohr, 2 x Trichter	600 EUR
Material für die 4 Stützen	27 EUR
Silikonschläuche, Synthetikgummi	14 EUR
Schrauben, Kleber, ...	11 EUR
	<u>5250 EUR</u>

4

Messablaufsteuerung

4.1 Kettenmatrixmethode

Als Messmethode für diesen Schalldämpferprüfstand wurde eine Impedanzrohrmessung nach der Kettenmatrixmethode (Transfer-Matrix-Method) gewählt, bei der das Messobjekt, sowie alle Verbindungsrohrstücke, jeweils als akustisches Zweitor betrachtet werden. Bei der Zwei-Quellen-Methode ist eine Anregung von beiden Seiten des Messobjekts nötig, weshalb auch zwei identische Lautsprecher verwendet werden. Die Impedanzrohrmessung ist so aufgebaut, dass vor und hinter dem Messobjekt je ein Messrohr angebracht ist, in dem je vier Schalldrücke gemessen werden, aus denen dann mithilfe der acht Mikrofonpositionen und den Werten für die Schallkennimpedanz und die aktuelle Frequenz der Transmission Loss berechnet werden kann.

Abbildung 4.1 zeigt den allgemeinen schematischen Aufbau einer Impedanzrohrmessung nach der Kettenmatrixmethode mit vier Mikrofonen. Hierbei sind die Bezeichnungen M1 bis M4 die Positionen der Mikrofone, Q1 und Q2 stehen für die Quellen (Lautsprecher) und die Abstände s ergeben sich aus der Geometrie des Aufbaus (s_{mu} und s_{md} für *Mikrofon upstream* und *Mikrofon downstream* und s_u und s_d für *Verbindungsrohr upstream* und *Verbindungsrohr downstream*). Jeder Abschnitt des Aufbaus kann so durch eine Matrix beschrieben werden ($\underline{\mathbf{T}}$, $\underline{\mathbf{T}}_{mu}$, $\underline{\mathbf{T}}_{md}$, $\underline{\mathbf{T}}_u$ und $\underline{\mathbf{T}}_d$) [7].

Die Kettenmatrixparameter des Messobjekts sind in Gleichung 4.1 bzw. Gleichung 4.2 dargestellt [7].

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \underline{\mathbf{T}}_{11} & \underline{\mathbf{T}}_{12} \\ \underline{\mathbf{T}}_{21} & \underline{\mathbf{T}}_{22} \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\underline{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_u^{-1} \cdot \underline{\mathbf{T}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_d^{-1} \quad (4.2)$$

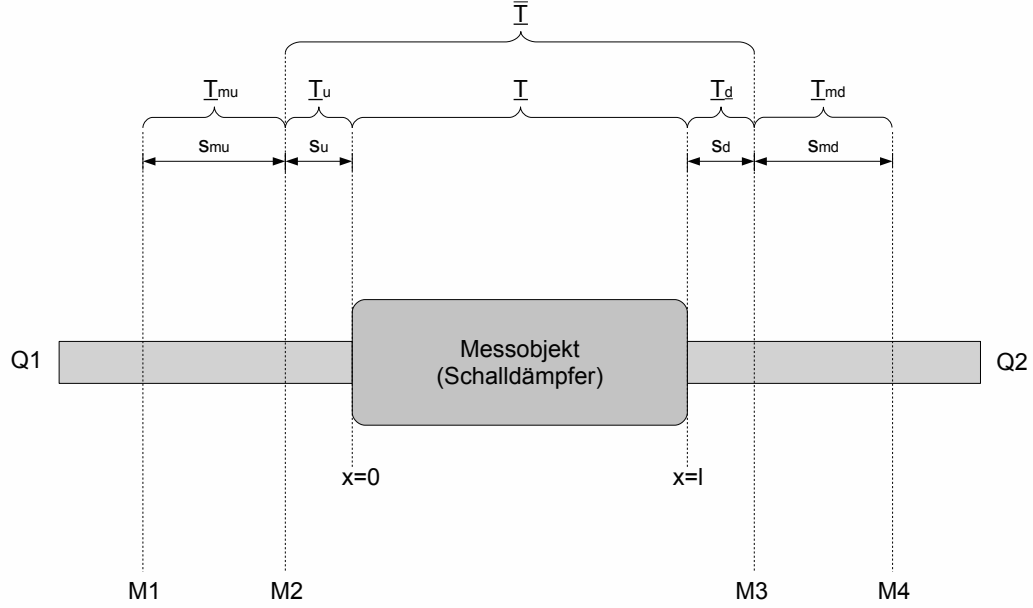


Abbildung 4.1: Kettenmatrixmethode

Die Kettenmatrizen der Messstrecken und die der Verbindungsrohre sind bekannt und sie sind nur von den Mikrophonabständen, der aktuellen Frequenz (in der Wellenzahl k) und der Schallkennimpedanz Z_0 in Luft abhängig (s. Gl. 4.3 bis 4.6).[7]

$$\underline{T}_{mu} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_{mu}) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(k \cdot s_{mu}) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_{mu}) & \cos(k \cdot s_{mu}) \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\underline{T}_{md} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_{md}) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(k \cdot s_{md}) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_{md}) & \cos(k \cdot s_{md}) \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\underline{T}_u = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_u) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(k \cdot s_u) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_u) & \cos(k \cdot s_u) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

$$\underline{T}_d = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_d) & j \cdot Z_0 \cdot \sin(k \cdot s_d) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_d) & \cos(k \cdot s_d) \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Mithilfe dieser bekannten Matrizen sowie den aufgenommenen Schalldrücken aus zwei Messungen (einmal mit Lautsprecher Q1 und einmal mit Lautsprecher Q2) lassen sich die vier Kettenmatrixparameter $\underline{T}_{11}$, $\underline{T}_{12}$, $\underline{T}_{21}$ und $\underline{T}_{22}$ aus den Gleichungen 4.1 und 4.2 bestimmen. Diese sind nötig um den in Gleichung 4.7 (für gleiche Querschnittsflächen am Eingang und Ausgang) angegebenen Transmission Loss zu berechnen.

$$L_{TL} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right) \right| \quad (4.7)$$

Da der für diesen Prüfstand geforderte Messbereich (100 Hz bis 10000 Hz als Terzbandmittenfrequenzen) nicht mit einem Mikrofonabstand pro Messrohr abgedeckt werden kann, wurde der Prüfstand um nochmals je zwei Mikrofonpositionen pro Messrohr erweitert (s. Kapitel 3.2.3). So ist ein Umstecken nicht mehr nötig und es können mit einer Messung alle zur Berechnung des Transmission Loss nötigen Mikrofonsignale aufgenommen werden. Diese sind jeweils 12 s lang und enthalten die aufgenommenen Schalldrücke der Anregung mit beiden Lautsprechern.

4.2 Messaufbau und Signalfluss

Die folgende Grafik zeigt das Blockschaltbild des Messaufbaus mit der verwendeten Hardware und Software (s. Abb. 4.2), sowie den Signalfluss aus dem Computer über Audio-Interface und Verstärker zu den Lautsprechern hin und die von den Mikrofonen aufgenommenen Signale über das PAK-Interface zum Computer zurück.

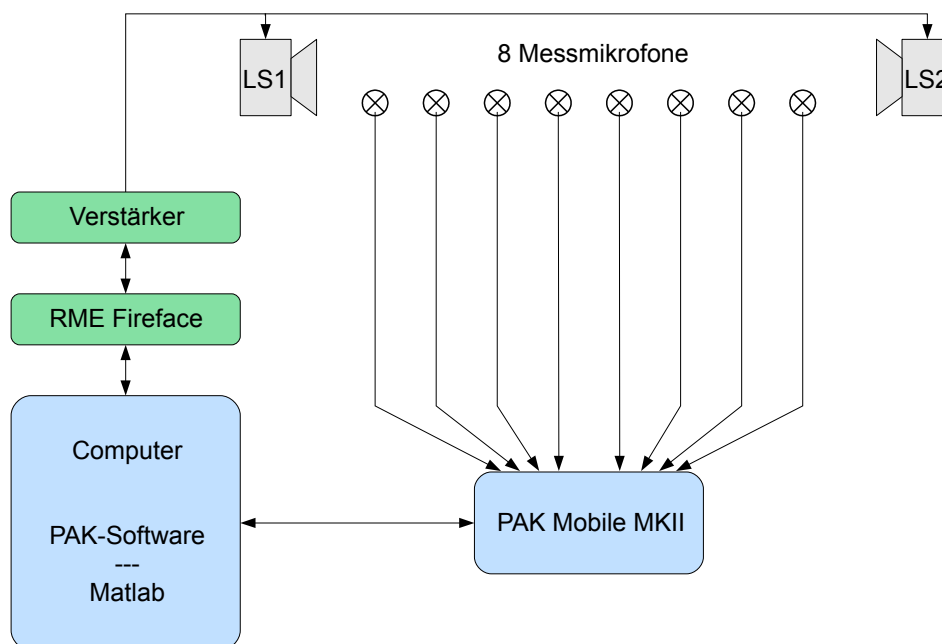


Abbildung 4.2: Blockschaltbild des Messvorgangs

In Tabelle 4.1 ist die für die Messungen am Prüfstand verwendete Hardware nochmals aufgelistet:

Tabelle 4.1: Messequipment

Müller-BBM PAK MobileII
Lenovo W520 Notebook
Parasound HCA-800 II Leistungsverstärker
RME Fireface 800
8 G.R.A.S. 40PL Messmikrofone
2 Lautsprecher mit Visaton W100S Chassis
Anschlusskabel für Mikrofone und Lautsprecher

4.3 Messablauf

In diesem Abschnitt wird der Messvorgang am fertig aufgebauten Prüfstand beschrieben. Hierbei wird etwas genauer auf die Software des PAK-Messsystems eingegangen. Es werden alle wichtigen Grundeinstellungen, sowie einige arithmetische Operationen beschrieben. Der Aufbau des Prüfstandes ist dabei wie in Kapitel 3 erläutert.

4.3.1 Müller-BBM PAK MKII Messsystem

Das PAK MKII Messsystem der Firma Müller-BBM ist ein professionelles Messsystem für Vibrations- und Akustikmessungen. Es besteht aus einem Hardware-Interface (hier ein *PAK Mobile MKII*) und einem Softwarepaket (Version 5.7), mit dem für jede Anwendung eigene Benutzeroberflächen generiert werden können.

Das Hardware-Interface ist modular aufgebaut und ist bei der Variante des SPSC mit drei 4-Kanal-Modulen mit ICP-Anschlüssen bestückt. Detaillierte Informationen zum PAK-Messsystem können in [10] nachgelesen werden.

4.3.2 Anregungssignal

Als Anregungssignal für die Messungen des Transmission Loss L_{TL} von Schalldämpfern an diesem Prüfstand wurde in Matlab ein Sweep generiert, der über 5 s Dauer von 50 Hz auf 12000 Hz exponentiell ansteigt (s. Abb. 4.3). Die Abtastrate des Messsystems beträgt 24 kHz und die Auflösung ist hierbei 24 Bit.

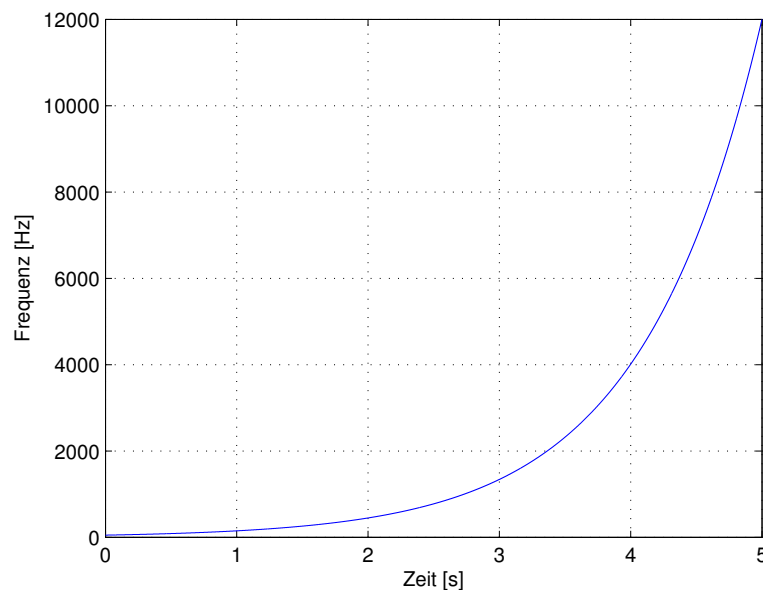


Abbildung 4.3: Exponentieller Sweep als Anregungssignal

Die Start- und Stopfrequenzen des Sweeps werden etwas großzügiger gewählt, damit eventuelle Einschwingvorgänge des Systems nicht den effektiv nutzbaren Frequenzbereich des Prüfstandes (85 Hz bis 11,87 kHz) beeinflussen.

Aufgrund einiger Probleme bei der Einbindung der Matlab-Berechnungen in die Software des PAK-Systems muss das Anregungssignal so generiert werden, dass beide Lautsprecher nacheinander den Sweep abspielen.

Hierfür wurde in Matlab ein Stereosignal generiert, das 0,5 s Stille am Anfang aufweist, dann auf dem linken Kanal den Sweep von 5 s Dauer spielt, wieder 1 s Stille hat und dann auf dem rechten Kanal den selben Sweep spielt. Am Ende wurde nochmals 0,5 s Stille eingefügt. So dauert das gesamte Anregungssignal 12 s (s. Abb. 4.4).

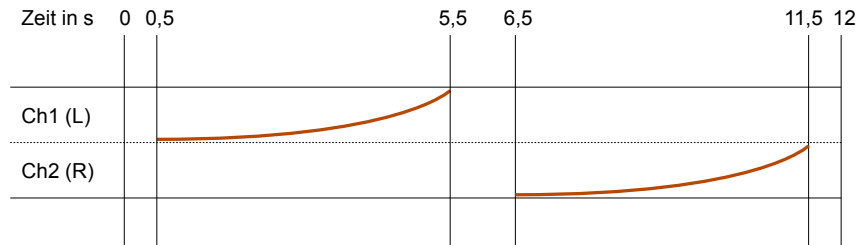


Abbildung 4.4: 5 s Sweeps im Stereosignal

Für die Wahl des Lautstärkepegels wurden einige Testmessungen gemacht und darauf geachtet, dass der maximale Schalldruck unter 120 Pa (ca. 135 dB) bleibt, damit es nicht zu Verzerrungen kommen kann, da der Grenzschalldruckpegel des G.R.A.S. 40PL Messmikrofons bei 150 dB liegt. Hierfür müssen im Software-Mixer des RME Fireface die richtigen Kanäle ausgewählt werden (Lautsprecher 1 spielt auf dem linken Kanal des Ausgangs Out1-2 und Lautsprecher 2 auf dem rechten Kanal) und die Ausgangslautstärke beider Kanäle auf -12 dB eingestellt werden, um bei der Justierung der Lautstärke am Verstärker etwas mehr Spielraum zu haben.

Wichtig hierbei ist es nicht nur auf den Grenzschalldruckpegel der Mikrofone zu achten, sondern auch darauf, dass die Resonanzen im Messrohr nicht hörbare Verzerrungen erzeugen. Wenn man bei den Messungen unter 100 Pa Maximalschalldruck bleibt, ist beides gewährleistet.

4.3.3 Messvorgang

Zu Beginn werden die Einstellungen für das Anregungssignal und die Testmessungen für den Lautstärkepegel gemacht. Die .wav-Datei des Anregungssignals befindet sich im Ordner der Messdaten des Schalldämpferprüfstandes auf der Festplatte (D:) des Prüfstand-Notebooks:

D:\Messdaten\Schalldämpferprüfstand\ExpSweep-50-12000Hz-5s-01.wav

Nun wird die PAK-Software (Version 5.7) gestartet und das Hauptfenster öffnet sich. Hier finden sich oben die Quick-Links zu den wichtigsten Einstellungen und Bedienelementen und rechts daneben die Auswahl des aktuellen Projekts, bei der nun das Projekt **Schalldämpferprüfstand** eingestellt wird (s. Abb. 4.5 und 4.6).

Die Quick-Links sind von links nach rechts:

- Daten-Betrachtung
- Messen
- Grafik-Definition
- (Mess- und Offline-Interface)
- (Einfacher Messablauf)

Ist das Projekt **Schalldämpferprüfstand** ausgewählt, sind die Voreinstellungen für die Messungen am Prüfstand bereits alle richtig definiert.

Falls allerdings ein ganz neues Projekt erstellt werden soll (in der Daten-Betrachtung mit Rechtsklick $\Rightarrow$ Erzeuge neues Projekt), müssen die Messeinstellungen, sowie die Grafikdefinition mit den arithmetischen Berechnungen richtig konfiguriert werden.

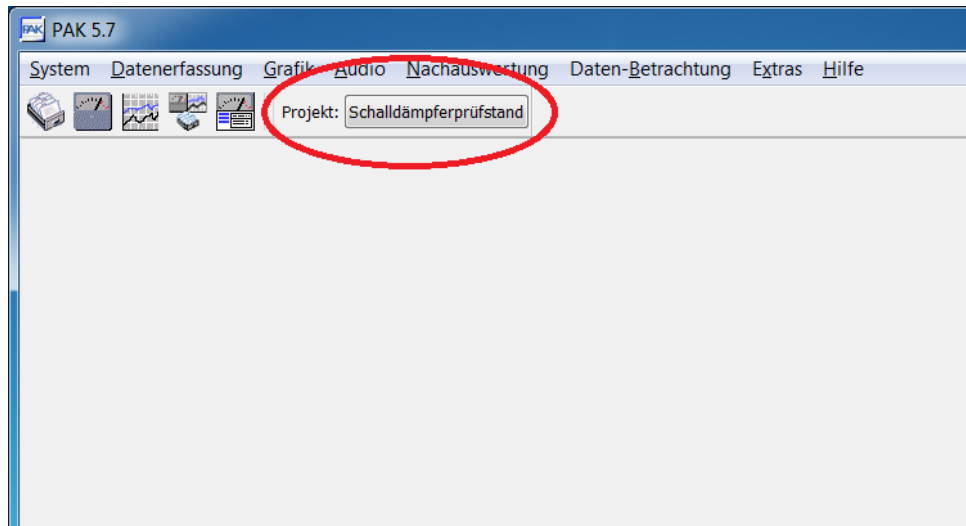


Abbildung 4.5: Hauptfenster der PAK-Software

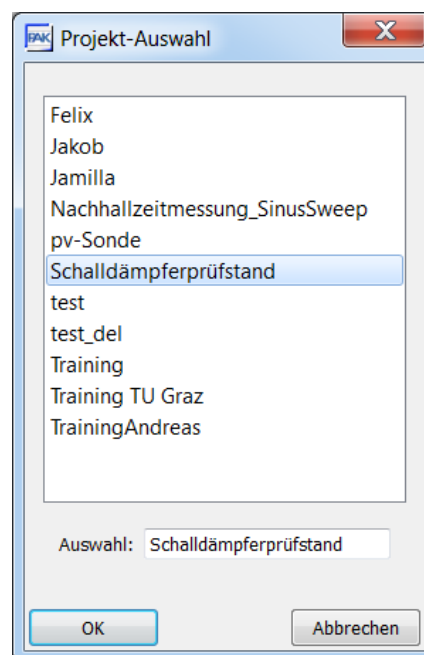


Abbildung 4.6: Projektauswahlfenster

Alle Messeinstellungen werden in der Software vorgenommen. Man öffnet die Messdefinition (über den Quick-Link "Messen"), in der der aktuelle Versuchsname und der jeweilige Untertitel benannt, sowie verschiedene Messeinstellungen und Grafikdefinitionen geladen und editiert werden können (s. Abb. 4.7).

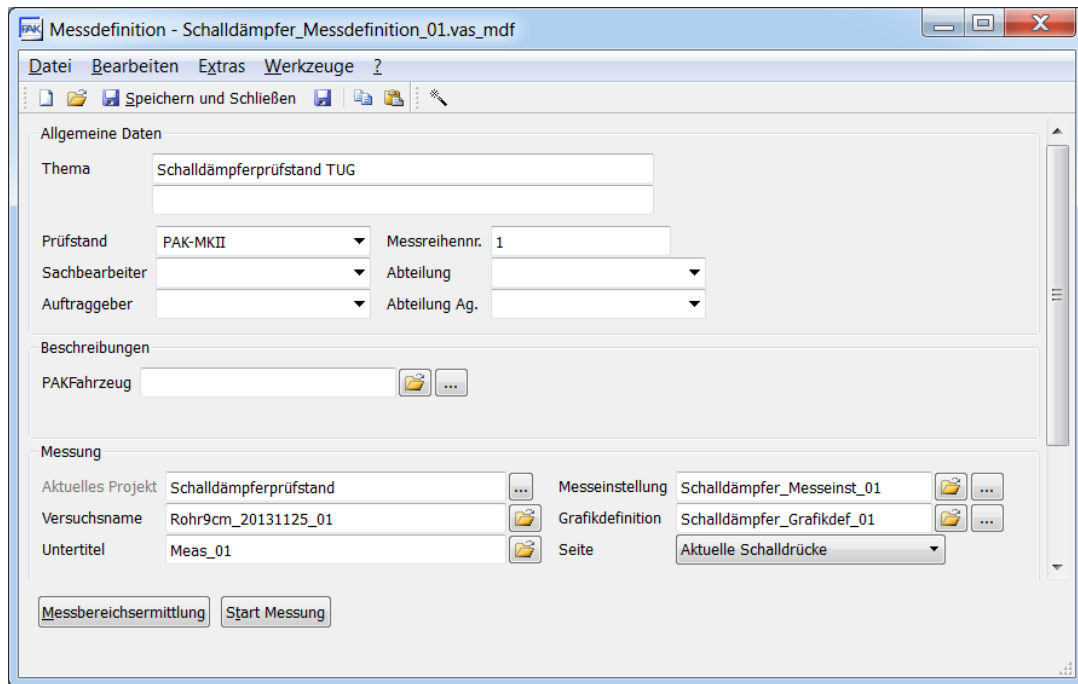


Abbildung 4.7: Fenster der Messdefinitionen

In den Messeinstellungen (s. Abb. 4.8) werden alle messrelevanten Voreinstellungen getroffen: Dazu gehört die Auswahl der richtigen Mikrofonkanäle mit den ausgelesenen TEDS-Daten (siehe Abb. 4.9, Kanaleinstellungen), die Messart unter Extras $\Rightarrow$ Optionen (einzelne Messungen (manuell) oder Messreihe (s. Abb. 4.10)), die Wahl der richtigen Hardware und der Samplefrequenz von 24 kHz, sowie die Einstellungen von Messdauer (diese muss mit 12 s gewählt werden) und des Triggerkanals mit der Triggerschwelle für den Startpunkt der Messung (1 Pa steigend).

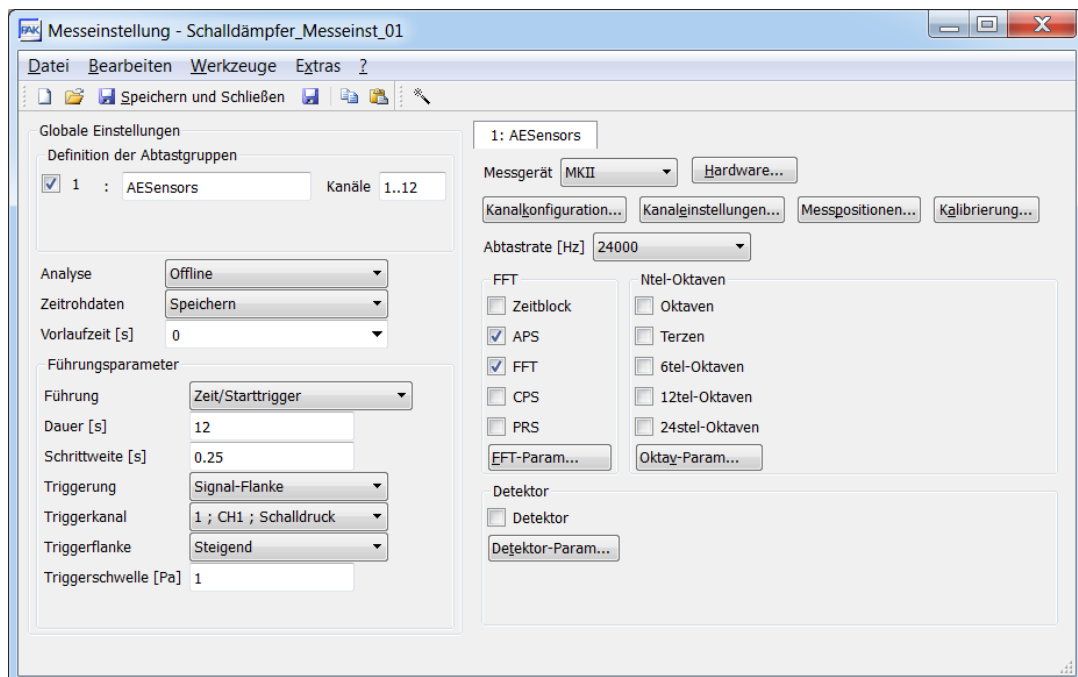


Abbildung 4.8: Fenster der Messeinstellungen

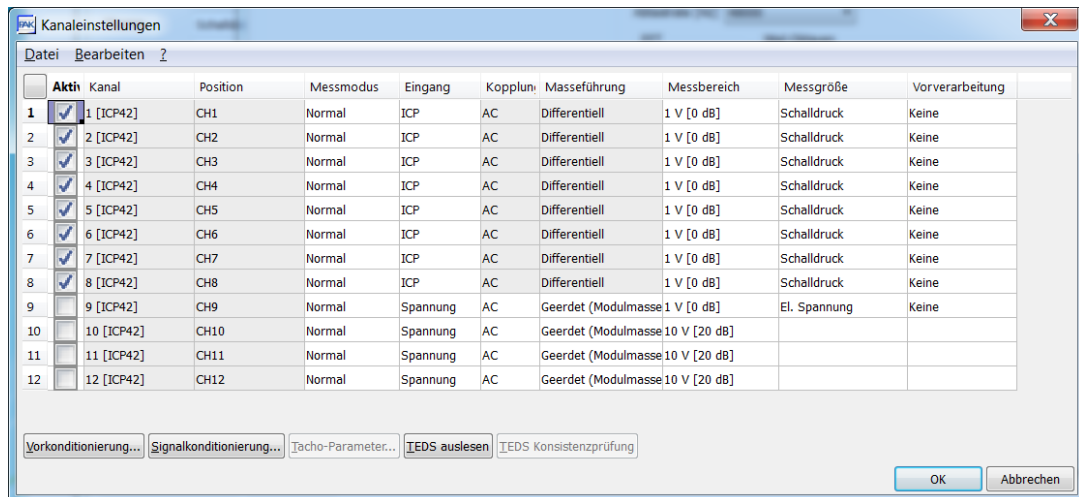


Abbildung 4.9: Fenster der Kanaleinstellungen

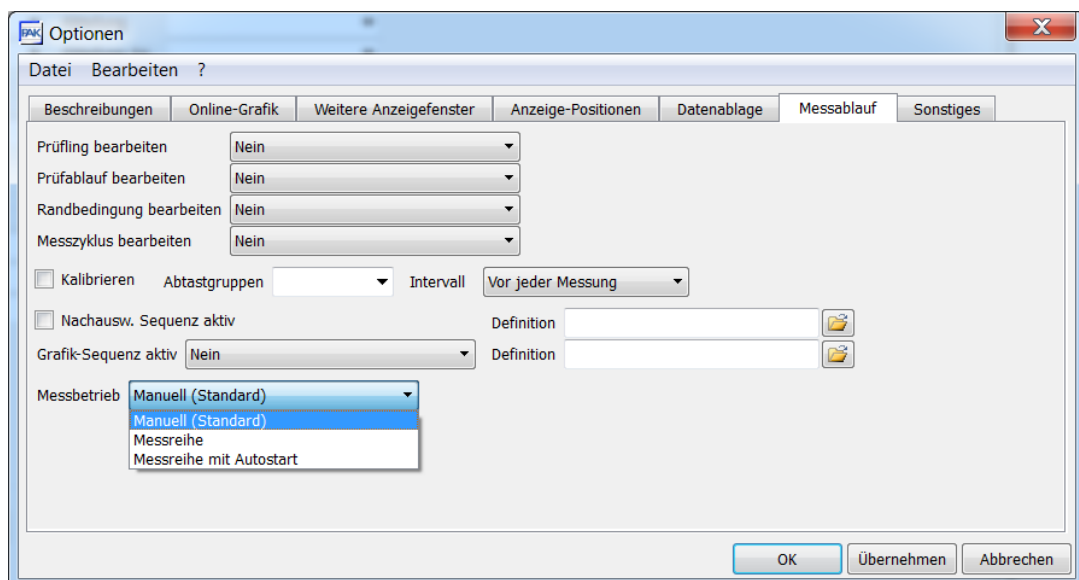


Abbildung 4.10: Fenster der Messoptionen

Wenn alle Parameter richtig eingestellt sind, wird die Messung gestartet (in der Messdefinition (Abb. 4.7) ⇒ **Start Messung**). Dann verbindet sich die Software mit dem PAK-Frontend und sobald in der Messleiste (s. Abb. 4.11) steht, dass die Messung gestartet werden kann, klickt man auf **Start** und spielt das Anregungssignal außerhalb der PAK-Software, im Explorer ab (hierfür kann jeder Mediaplayer verwendet werden, der .wav-Dateien abspielen kann (s. Abb. 4.12 und 4.13)). Die Triggerschwelle wird überschritten und die Messmikrofone zeichnen die Schalldrücke an ihrer Position auf. Die Aussteuerungsanzeige bringt während der Messung eine gewisse Kontrolle über alle aufgezeichneten Mikrofonpegel (s. Abb. 4.14).

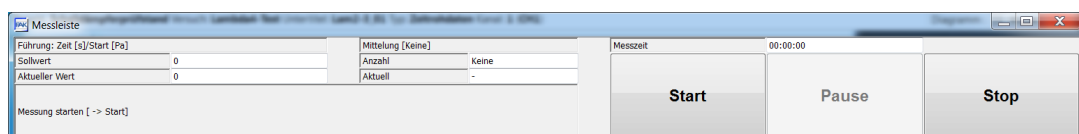


Abbildung 4.11: Messleiste

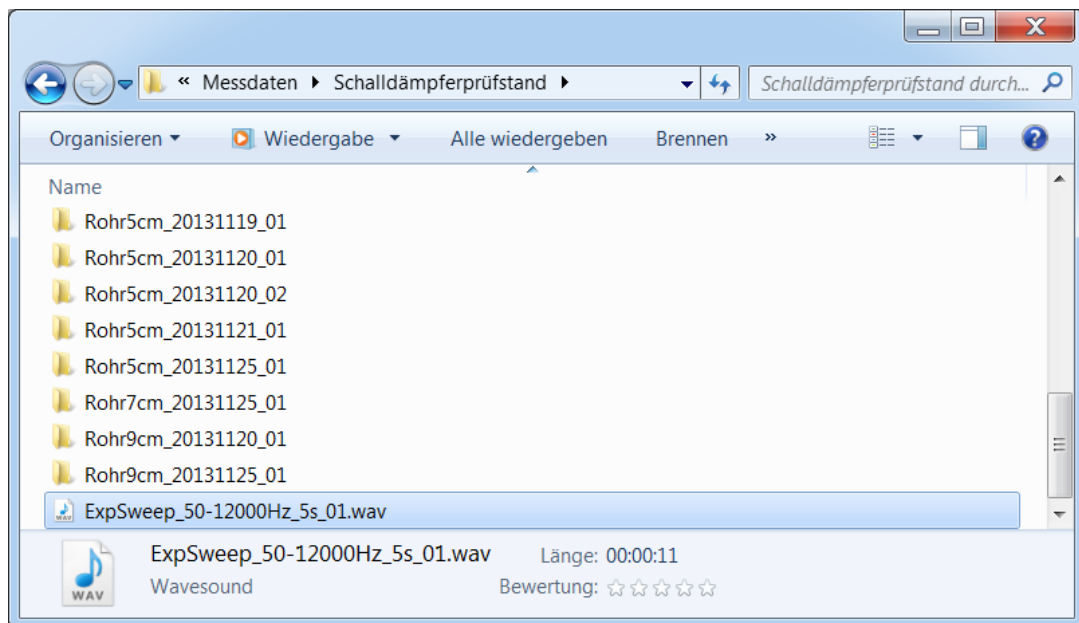


Abbildung 4.12: Fenster im Explorer (.wav-Datei)

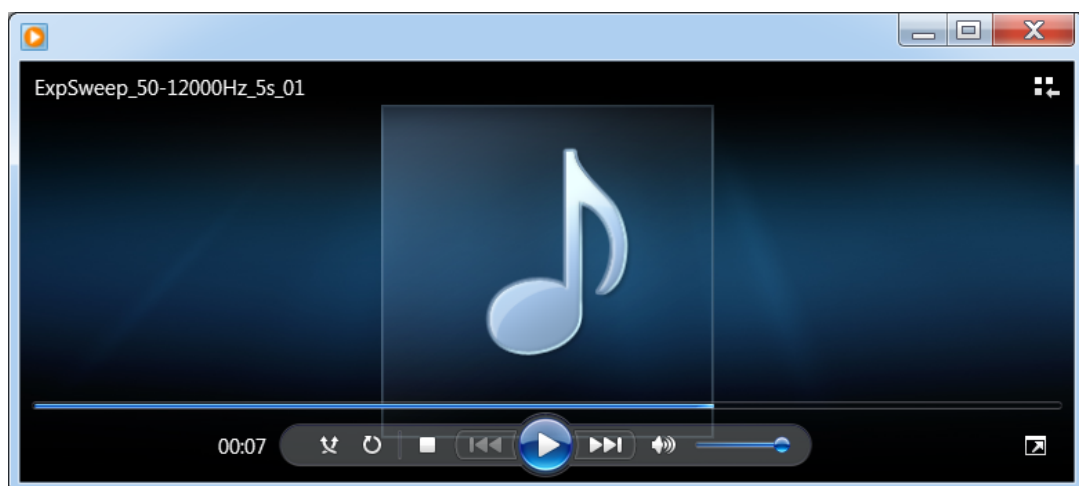


Abbildung 4.13: Abspielen der .wav-Datei (Mediaplayer)

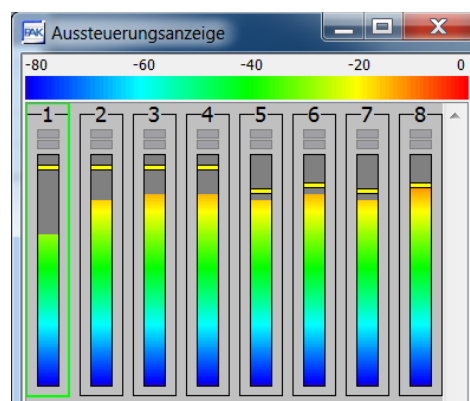


Abbildung 4.14: Aussteuerungsanzeige während der Messung

Hier wurde für die Beschreibung des Messvorgangs ein einfaches Rohrstück (10 mm Innendurchmesser, 9 cm Länge) in den Prüfstand eingebaut und vermessen.

Wenn die Messung abgeschlossen ist, schließen sich die Fenster **Messleiste** und **Aussteuerungsanzeige** automatisch.

Nun wird ein weiterer wichtiger Teil der PAK-Software beschrieben: Die Grafik-Definition. Sie wird in der Messdefinition (Abb. 4.7) aufgerufen und hier lässt sich alles einstellen, was mit der Anzeige und Auswertung der Messergebnisse zu tun hat.

Das Hauptfenster hat einzelne Registerkarten, in denen jeweils eigene Grafik-Ausgaben und Darstellungen der Messergebnisse definiert werden können (s. Abb. 4.15). Hier, bei den Messungen des Transmission Loss am Schalldämpferprüfstand, werden fünf Registerkarten verwendet:

In der ersten Karte sind alle Schalldrücke der Mikrofone in Pascal über der Zeit aufgetragen. Es wurde eine Grafikvorlage erstellt, die in je einem Diagramm ein Mikrofonsignal darstellt. Diese sind von M1 bis M8 durchnummeriert, die vier Mikrofonsignale des ersten Messrohres sind rot eingefärbt, die des zweiten Messrohres blau (s. Abb. 4.16).

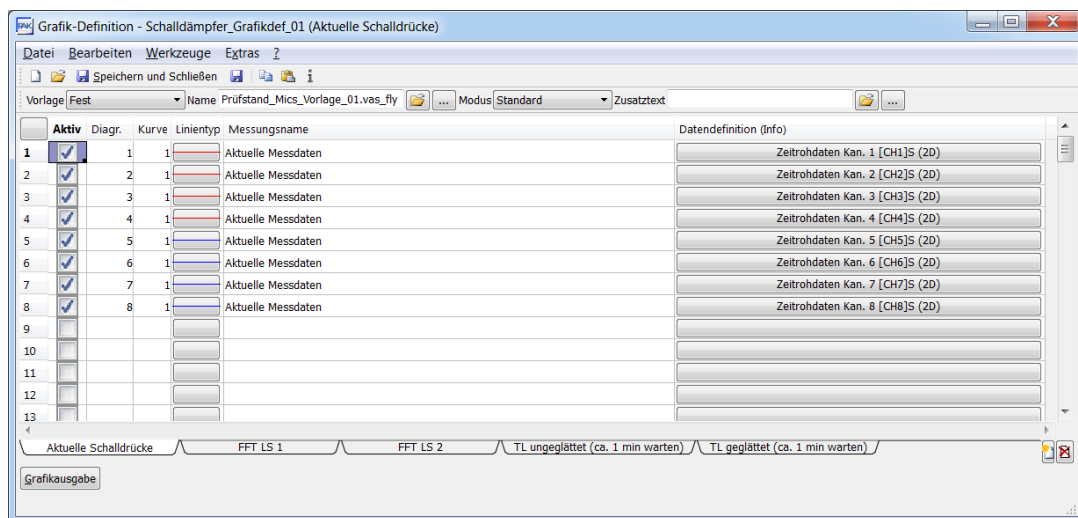


Abbildung 4.15: Hauptfenster der Grafik-Definition (Aktuelle Schalldrücke)

Diese Vorlage ist auch schon während der Messung zu sehen, um zu überprüfen, ob alle Mikrofone richtig aufzeichnen und um eventuelle Fehler direkt zu erkennen. Nach der Messung kann diese Darstellung jederzeit über den Button **Grafikausgabe** (s. Abb. 4.15 links unten) aufgerufen werden.

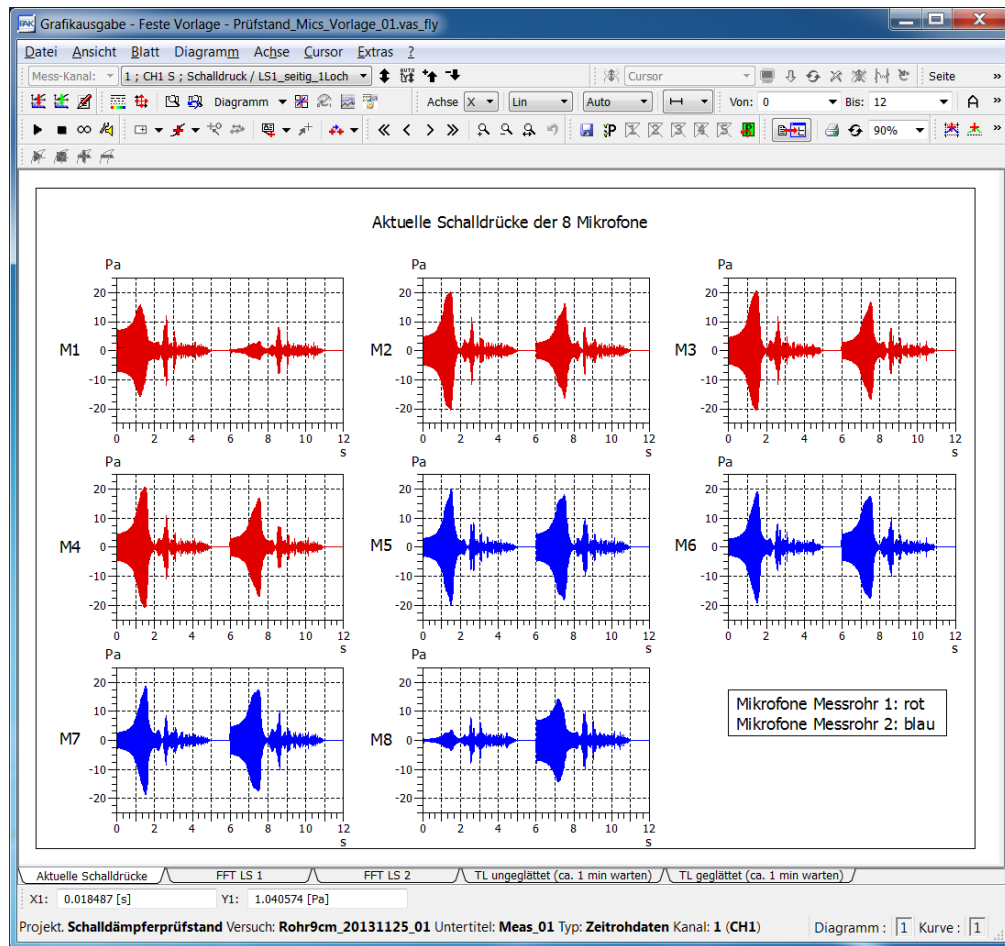


Abbildung 4.16: Grafikausgabe der ersten Registerkarte (Schalldrücke)

Die zweite und dritte Registerkarte zeigen die Frequenzgänge der Mikrofonsignale, einmal für das Anregungssignal aus Lautsprecher 1 und einmal für das aus Lautsprecher 2 (s. Abb. 4.17 und Abb. 4.18). Auch diese Grafiken können jederzeit über **Grafikausgabe** aufgerufen werden.

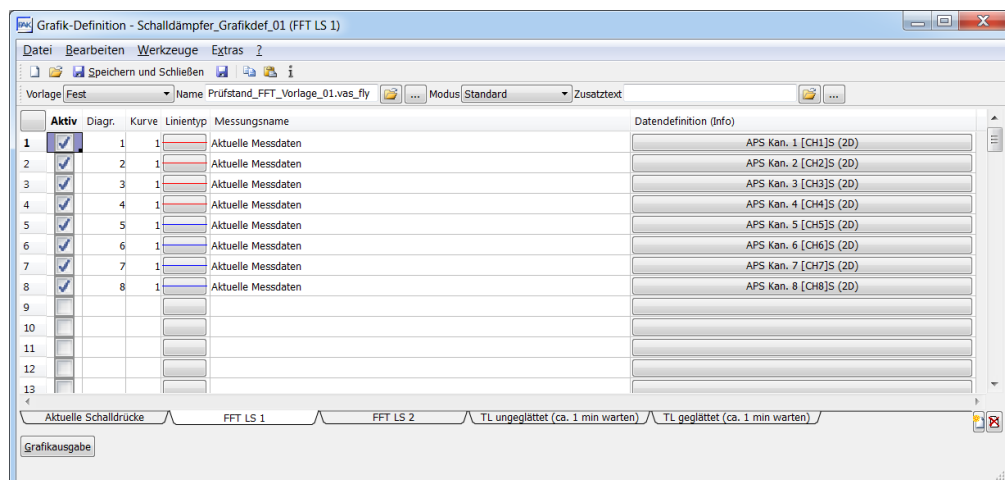


Abbildung 4.17: Hauptfenster der Grafik-Definition (Frequenzgänge)

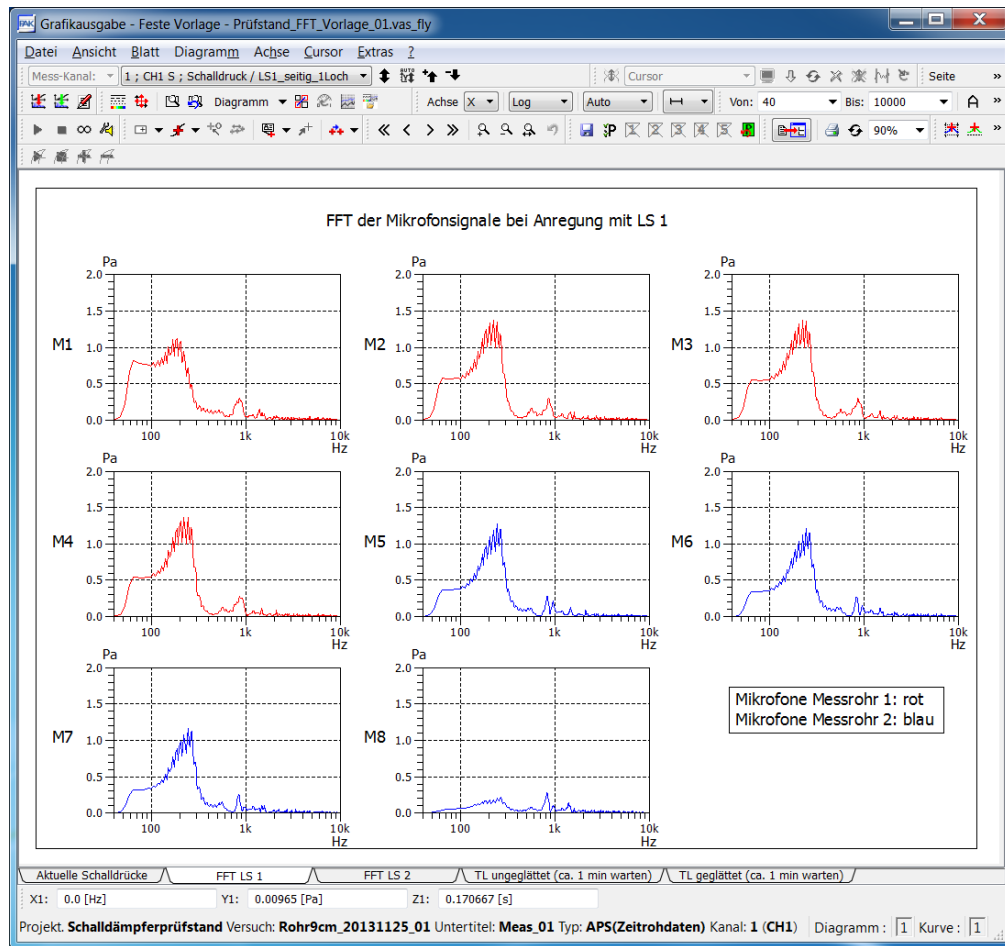


Abbildung 4.18: Grafikausgabe der zweiten Registerkarte (Frequenzgänge)

Die weiteren Registerkarten zeigen den Transmission Loss (TL) an. Hierbei ist in der vierten Karte eine ungeglättete Kurve zu sehen und in der fünften Karte eine geglättete Kurve. Auf die genauen Eigenschaften der Filterung wird bei der Implementierung in Matlab näher eingegangen (siehe Kapitel 4.4).

Die Grafik-Definition der Transmission Loss Berechnungen ist in Abbildung 4.19 zu sehen. Wenn hier als Messungsname **ARITHMETIK** gewählt ist und man auf die Datendefinition klickt, öffnet sich ein Fenster, in dem definierte Variablen und ein Formelskript geladen werden können. Die hier angewendeten Befehle für das Speichern der aufgenommenen Schalldrücke in .dat-Dateien, den Aufruf der Matlab-Funktion zur Berechnung und das Einlesen der endgültig berechneten und eventuell geglätteten Transmission Loss Kurve werden im Kapitel 4.5 genauer beschrieben.

In Abbildung 4.20 ist die Grafikausgabe der geglätteten Transmission Loss Kurve zu sehen. Das Ausgabefenster der ungeglätteten Kurve (vierte Registerkarte) ist identisch. Da das Einlesen der .dat-Dateien in Matlab einige Zeit beansprucht, muss man bei der Grafikausgabe etwa eine Minute warten.

Alle Einstellungen in den Definitionsfenstern und ihren Unterfenstern können einzeln abgespeichert und geladen werden. Eine Liste mit allen Datei-Pfaden zu den gespeicherten Einstellungen des Projekts **Schalldämpferprüfstand** ist im Anhang zu finden.

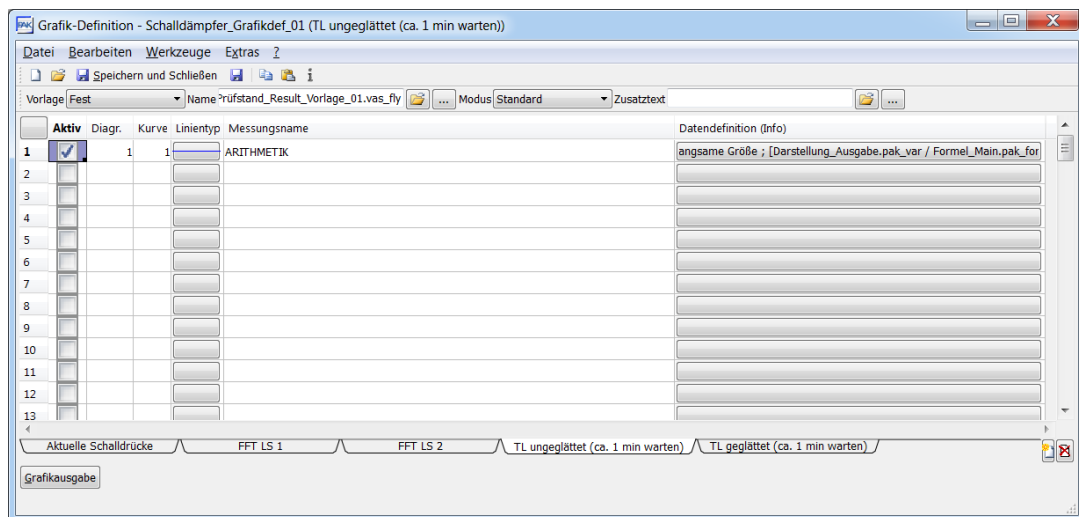


Abbildung 4.19: Hauptfenster der Grafik-Definition (Transmission Loss)

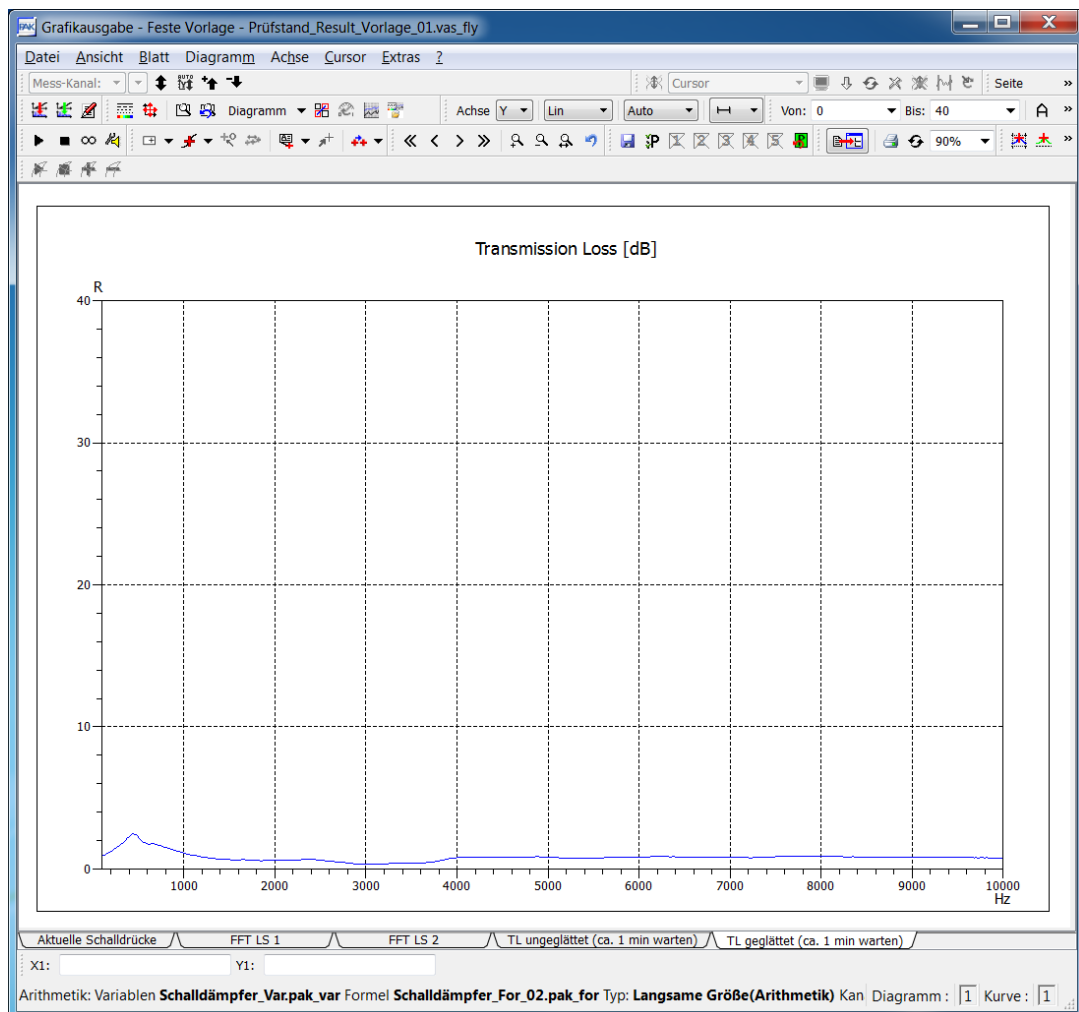


Abbildung 4.20: Grafikausgabe der fünften Registerkarte (TL geglättet)

4.4 Implementierung in Matlab

In Matlab wird eine Funktion geschrieben, die dann in eine .exe-Datei konvertiert wird und diese wiederum kann von der PAK-Software aufgerufen werden.

4.4.1 Beschneidung der Zeitrohdaten

In der Matlab-Funktion werden die acht Dateien mit den Zeitrohdaten der Schalldrücke importiert und in einer Matrix abgespeichert, aus der dann exakt die beiden 5 s langen Schalldrücke zu den Zeitpunkten der Sweeps beider Lautsprecher extrahiert werden. Die 16 Vektoren, die dadurch entstehen sind je 120.000 Samples lang (5 s bei 24 kHz) und lassen sich gut auf die Frequenz des Sweeps abbilden. Hierfür wurde das in Matlab generierte Anregungssignal mit den beschnittenen Zeitrohdaten verglichen und daraus die aktuelle Frequenz je Zeitpunkt bestimmt.

Eine kleine Ungenauigkeit taucht bei der Messdauer auf, denn die acht aufgenommenen Signale sind nicht exakt 12 s lang, sondern etwas länger. Dies kann daran liegen, dass die PAK-Software die Messung nicht direkt nach 12 s stoppt, was aber kein weiteres Problem ist, da die beschnittenen Vektoren exakt die Länge des generierten Anregungssignals aufweisen.

Um eventuelle Unstetigkeiten am Anfang und am Ende der Schalldrucksignale auszuschließen, werden alle Zeitrohdaten im nächsten Schritt noch mit einem Hanning-Fenster multipliziert und somit leicht ein- und ausgefadet.

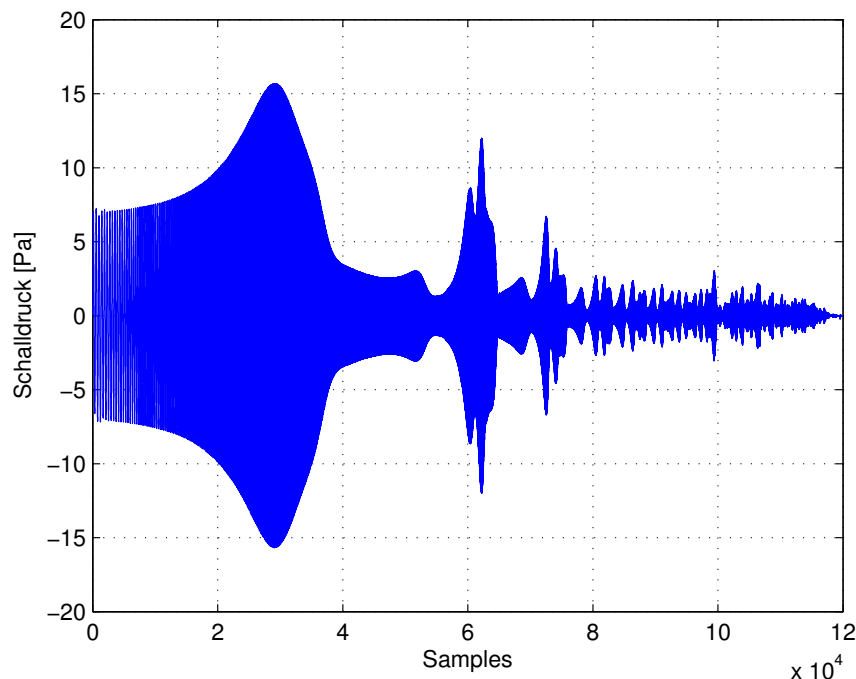


Abbildung 4.21: Gefensterter Schalldruck des ersten Mikrofons zum Zeitpunkt des Anregungssignals vom ersten Lautsprecher

4.4.2 Übertragungsfunktionen

Im nächsten Schritt werden die Schalldücke mit einer Fourier-Transformation in den Frequenzbereich transformiert. Mit diesen Frequenzgängen lassen sich nun die Mikrofonübertragungsfunktionen bilden, welche für die Berechnung der Kettenmatrixparameter benötigt werden.

Die Mikrofonübertragungsfunktionen sind aktuell noch sehr lang (240.001 Samples, 0–24 kHz), enthalten aber nur bis 12000 kHz Information. Deshalb können sie auf den relevanten Frequenzbereich verkürzt werden, was gleichzeitig zu einer schnelleren Berechnung führt.

4.4.3 Berechnung der Kettenmatrixparameter

Mit den Übertragungsfunktionen, der Wellenzahl k und den notwendigen Werten für die Mikrofonabstände und die Schallkennimpedanz werden dann die Teilmatrizen $\underline{\mathbf{T}}_{11}$, $\underline{\mathbf{T}}_{12}$, $\underline{\mathbf{T}}_{21}$ und $\underline{\mathbf{T}}_{22}$ für jeden der drei Mikrofonabstände berechnet (s. Gl. 4.1).

In den folgenden drei for-Schleifen durchläuft die Variable n die Werte des Frequenzvektors und es werden für jedes Sample die Werte der Teilmatrizen der drei Hauptmatrizen ausgerechnet. Nun folgt noch die Invertierung der Matrizen mit $\underline{\mathbf{T}}_u$ und $\underline{\mathbf{T}}_d$ nach Gleichung 4.2, um die korrekten Teilmatrizen $\underline{\mathbf{T}}_{11}$, $\underline{\mathbf{T}}_{12}$, $\underline{\mathbf{T}}_{21}$ und $\underline{\mathbf{T}}_{22}$ des Messobjekts für jeden Mikrofonabstand zu bekommen.

Mit diesen drei Matrizen, die nun die Transfermatrizen des Messobjekts sind, lässt sich im nächsten Schritt der Transmission Loss der drei Frequenzbereiche (s. Tab. 3.3) berechnen. Dies geschieht noch in den for-Schleifen und es wird für jedes Sample des Frequenzvektors ein Wert in dB berechnet (s. Gl. 4.7).

4.4.4 Zusammenlegung der 3 Frequenzbänder

Weiters wird in der Matlab-Funktion eine Gewichtung und Zusammenrechnung der Transmission Loss Kurven der drei gültigen Frequenzbänder durchgeführt.

Die gültigen Frequenzbereiche der drei gemessenen Mikrofonabstände wurden schon in Tabelle 3.3 aufgelistet. In Matlab werden nun zwei Variablen für die beiden Terzmittenfrequenzen eingeführt. Über die Terzbandverhältnisse (s. Gl. 3.1 und 3.2) lässt sich so die untere und die obere Terzbandgrenzfrequenz bestimmen und somit das zugehörige Terzband.

Aus den gültigen Frequenzbereichen und deren Überschneidungen wurden die Übernahmefrequenzen, bei denen die Gewichtung exakt die Hälfte ist, wie folgt gewählt:

Tabelle 4.2: Übernahmefrequenzen für die Gewichtung

Übernahmefrequenz 1	720 Hz	(170 Hz Bandbreite)
Übernahmefrequenz 2	1700 Hz	(395 Hz Bandbreite)

Abbildung 4.22 zeigt die Gewichtungsfunktionen über der Frequenz. Dabei steht die blaue Kurve für die Gewichtung des weitesten Mikrofonabstands, die rote Kurve für die des mittleren Mikrofonabstands und die türkise Kurve für die des engsten Mikrofonabstands.

Nun müssen die drei Transmission Loss Kurven entlogarithmiert werden, um sie im nächsten Schritt mit den Gewichtungsfunktionen zu multiplizieren (s. Gl. 4.8). Danach wird die gesamte Transmission Loss Kurve wieder in dB-Werte umgerechnet.

$$TL = TL_1 \cdot G_1 + TL_2 \cdot G_2 + TL_3 \cdot G_3 \quad (4.8)$$

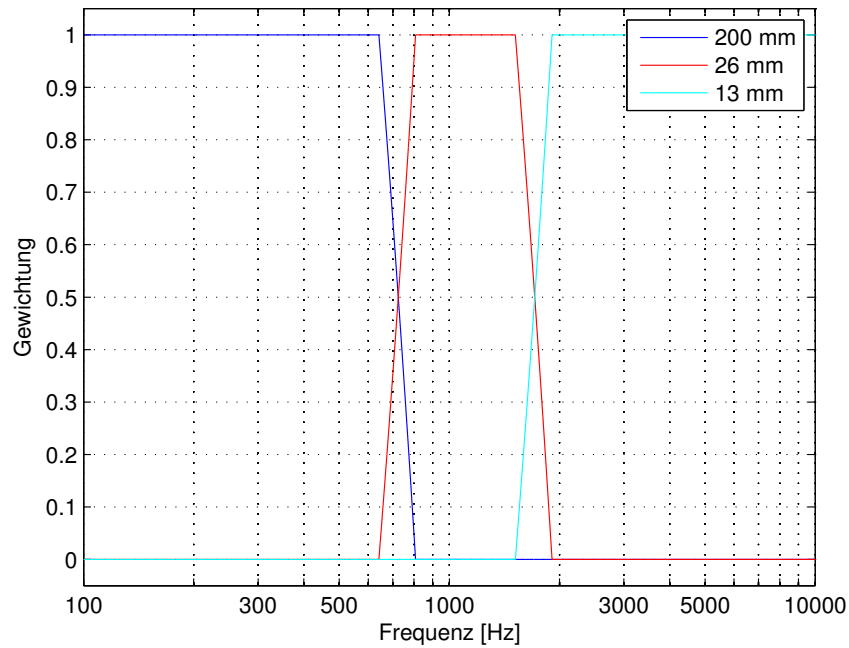


Abbildung 4.22: Gewichtungsfunktionen der 3 Frequenzbänder

Die folgende Abbildung zeigt die Transmission Loss Kurven der drei Mikrofonabstände und die Übernahmebereiche, bei denen die Kurven zusammengerechnet werden. Man kann gut erkennen, dass die Dämpfungen durch das Stehwellenverhältnis im Rohr nur bis zu bestimmten Frequenzen gültig sind (vgl. Gl. 3.4 und 3.5). Der ideale Transmission Loss eines Rohrstückes hat über den gesamten Frequenzbereich 0 dB.

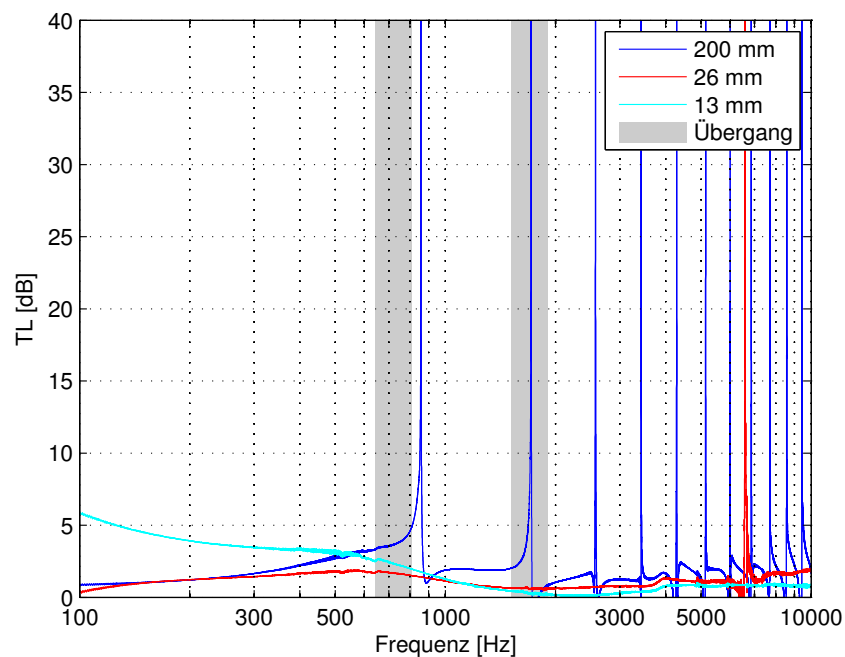


Abbildung 4.23: Die 3 TL-Kurven mit den Übernahmebereichen

4.4.5 Filterung

Der Transmission Loss ist nun als Vektor gespeichert und muss nur noch geglättet werden, da die ungeglättete Kurve teilweise stärkere Pegelschwankungen aufweist.

Als Glättungsfilter kommt ein RMS-Filter (Root Mean Square) zum Einsatz, dessen Fensterbreite der Mittelung (N) variiert werden kann. Weiters lässt sich in der Matlab-Funktion `rms` ein Overlap der Mittelungsfenster und ein Zero-Padding definieren. Gleichung 4.9 beschreibt die Filterung. Für die Anwendung auf die Transmission Loss Kurve wurde eine Fensterbreite von $N = 256$ und ein Fensteroverlap von $N/2$ gewählt.

Durch die Filterung verkürzt sich der Vektor auf 774 Werte, da immer $N/2$ Werte zu einem neuen, gemittelten Wert zusammengefasst werden. Bei einer Fensterbreite von 256 Samples sind aber noch genug Werte vorhanden, um eine gute Frequenzauflösung (ca. 12 Hz) darstellen zu können.

$$L_{TL_{RMS}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |L_{TL_n}|^2} \quad (4.9)$$

Abbildung 4.24 zeigt einen Vergleich von ungefilterter zu gefilterter Transmission Loss Kurve des 9 cm langen Rohres der Testmessung.

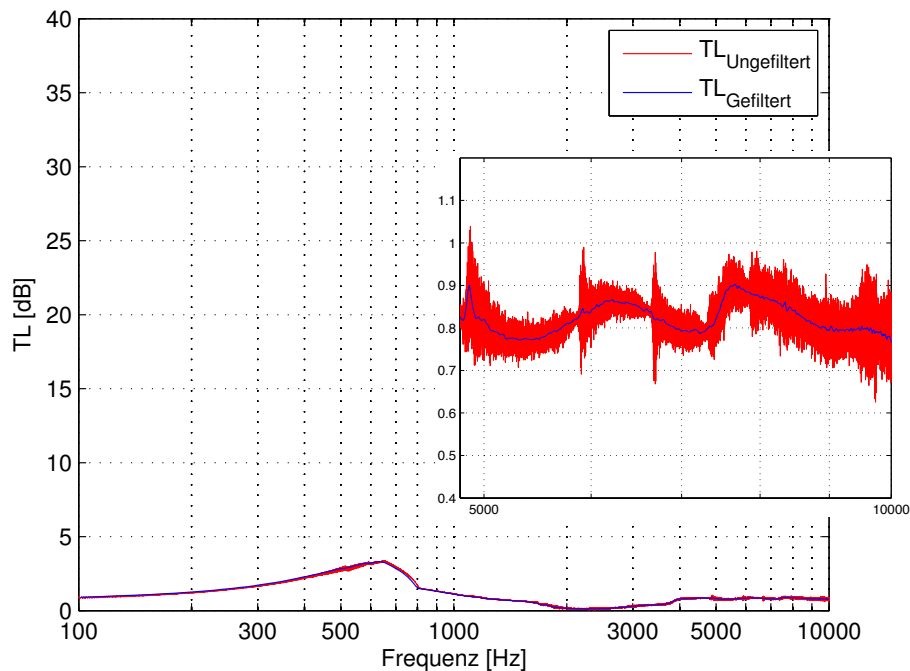


Abbildung 4.24: Vergleich der TL-Kurve mit und ohne Glättungsfilter

Im letzten Schritt der Matlab-Funktion wird der Vektor, in dem der gesamte Transmission Loss steht, noch auf den Frequenzbereich begrenzt, in dem die Messung gültig ist (100 Hz bis 10000 Hz) und zusammen mit dem Frequenzvektor wieder in eine .dat-Datei exportiert.

4.5 Einbindung von Matlab in die PAK-Software

Wie schon erwähnt, lassen sich in der Grafik-Definition der PAK-Software auch arithmetische Operationen durchführen. Um nun die Kommunikation zwischen der PAK-Software und Matlab herzustellen, müssen hier erst Variablen definiert und die Matlab-Funktion aufgerufen werden (s. Abb. 4.25).

In der Arithmetik werden acht Variablen für die aufgenommenen Schalldrücke definiert (M1 bis M8) (s. Abb. 4.26 $\Rightarrow$ Registerkarte **Variablen**).

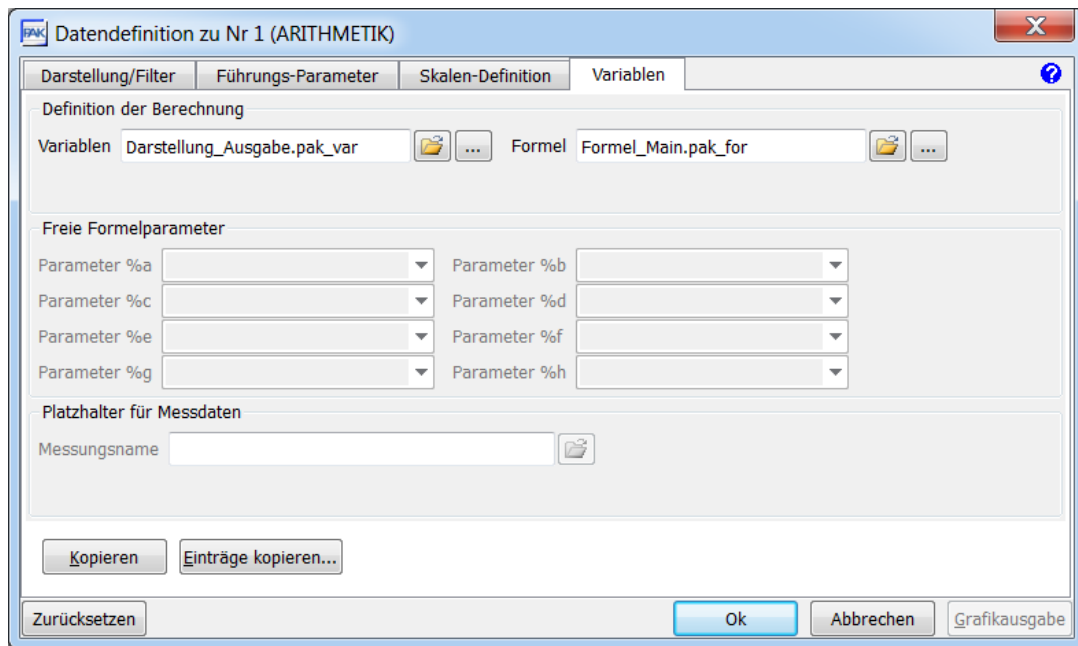


Abbildung 4.25: Arithmetik-Hauptfenster der Daten-Definition

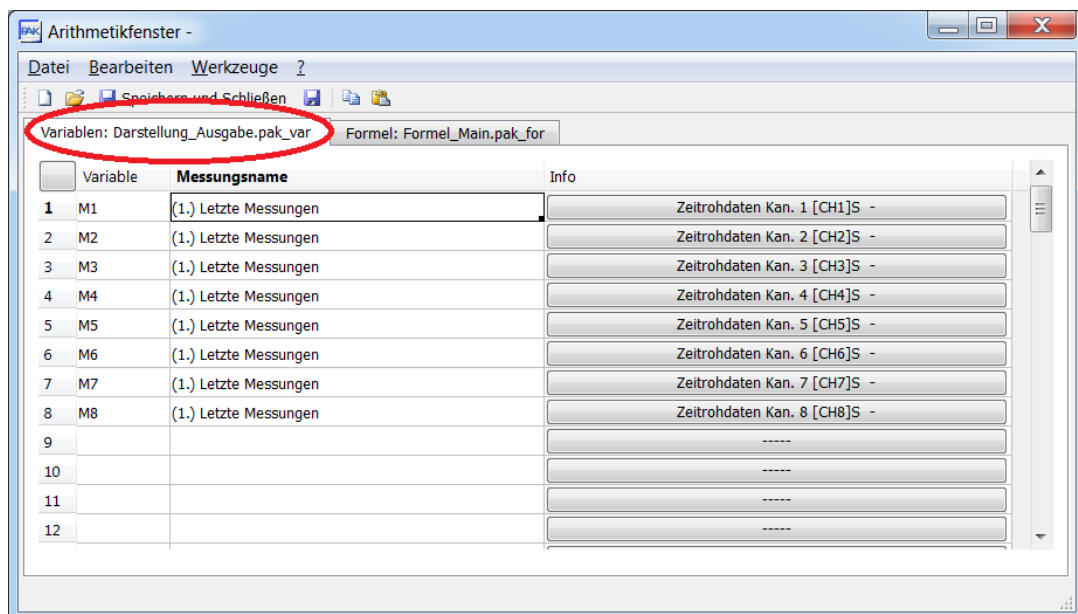


Abbildung 4.26: Definition der Variablen

In der Registerkarte **Formel** wird nun ein PAK-Programm geschrieben, das die aufgenommenen Schalldrücke (Zeitrohdaten) jeweils in eine neue Datei, im .dat-Format, speichert. Diese Dateien können in Matlab importiert werden, um die Berechnungen des Transmission Loss durchzuführen. Mit dem Befehl `CALL_EXE` wird als nächstes die in Matlab erstellte .exe-Datei aufgerufen und ausgeführt. Diese lädt die Zeitrohdaten und führt alle Berechnungen durch. Die endgültige, eventuell geglättete Kurve des Transmission Loss wird dann von Matlab wieder als .dat-Datei gespeichert und von der PAK-Software eingelesen und dargestellt (s. Abb. 4.27 und 4.20).

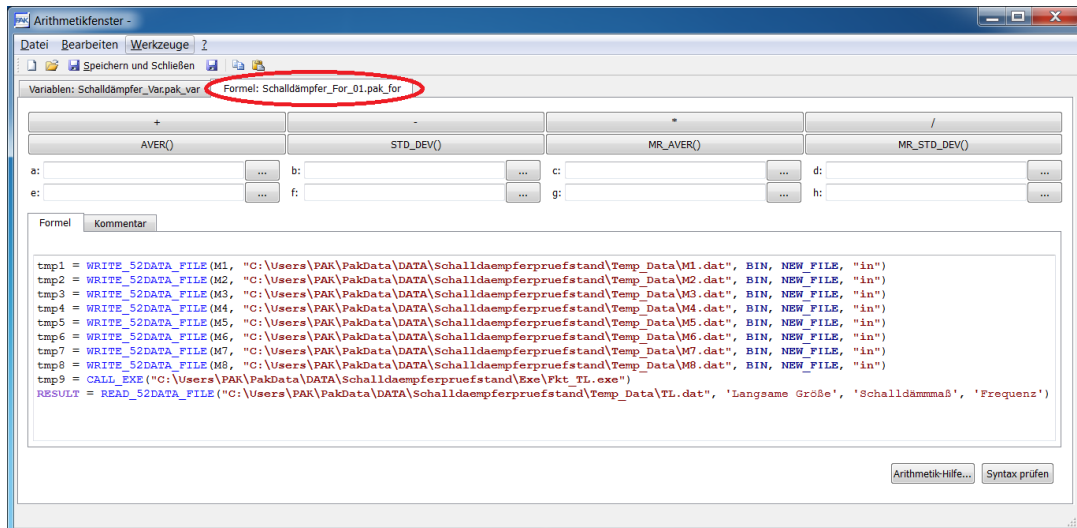


Abbildung 4.27: PAK-Programm (Registerkarte Formel)

Die hier verwendeten Befehle, sowie eine Liste aller Pfade zu den verwendeten Formel- und Variablen-Definitionen befinden sich im Anhang.

5

Prinzipschalldämpfer

Im Folgenden wird die Konstruktion und die Fertigung von drei verschiedenen Prinzipschalldämpfern beschrieben. Ein Prinzipschalldämpfer ist ein Schalldämpfer, dessen Dämpfungsverlauf bereits bekannt ist, da durch die Abmessungen und die bekannten Transfermatrizen der theoretische Transmission Loss berechnet werden kann.

Ein einfacher Kammerschalldämpfer, ein $\lambda/4$ -Resonator mit Kammer und ein Helmholtz-Resonator mit zylindrischem Kammervolumen sollen nun dazu dienen, den Prüfstand zu validieren und zu optimieren.

Auch hier wurde für die Konstruktion wieder das 3D-Zeichenprogramm *Rhinoceros*® (Version 4.0) verwendet.

5.1 Grundüberlegungen

Für die Überlegungen zur Geometrie der Prinzipschalldämpfer wird der reale Schalldämpfer herangezogen. Das Volumen wurde durch Einfüllen von Wasser in das Leergehäuse bestimmt und beträgt 76 cm^3 . Die mittlere Querschnittsfläche beträgt ca. $12,5 \text{ cm}^2$ und die Eingangs- und Ausgangsrohre wurden mit einem Durchmesser von 10 mm festgelegt. Dies entspricht nicht exakt dem Durchmesser der Zuleitungsrohre des realen Schalldämpfers (dieser liegt bei 8 mm), aber dadurch ist eine einfachere Anbindung an die Messrohre möglich.

Da die Transfermatrizen von Rohren bekannt sind, wird auch bei den Prinzipschalldämpfern auf eine Kombination von Rohren mit verschiedenen Durchmessern und Längen zurückgegriffen.

Die Idee hinter dieser Konstruktion ist, dass die Schalldämpfer modular zusammengebaut werden können. So werden nur zwei verschiedene Rohrdurchmesser eingesetzt:

Die Zuleitungsrohre haben immer einen Innendurchmesser von 10 mm mit einer Wandstärke von 1 mm und die Kammer der Schalldämpfer hat einen Innendurchmesser von 40 mm (Querschnittsfläche von ca. $12,5 \text{ cm}^2$) und eine Wandstärke von 2,5 mm.

Durch zwei verschiedene Deckelscheiben und Zuleitungsrohre verschiedener Längen können dann alle drei Prinzipschalldämpfer zusammengesetzt werden.

5.2 Kammerschalldämpfer

5.2.1 Konstruktion

Hierfür wurden die Abmessungen aus den Grundüberlegungen übernommen. Die Kammer hat eine effektive Länge von 6 cm, was mit der Querschnittsfläche von $12,5 \text{ cm}^2$ zu einem Kammer-volumen $V_K = 75 \text{ cm}^3$ führt und damit sehr nahe am Volumen des leeren realen Schalldämpfers liegt.

Die Deckelscheibe hat eine Nut, in die das Zuleitungsrohr einfach hineingesteckt wird. Die Länge der Zuleitungsrohre beträgt beim Kammerschalldämpfer exakt 5 cm. Weiters weist die Deckelscheibe eine Stufe von 2 mm Tiefe und 2,5 mm Breite auf, damit sie passgenau auf das Kammerrohr aufgesetzt werden kann.

In den Abbildungen 5.1 und 5.2 sind 3D-Ansichten der einzelnen Teile zu sehen, Abbildung 5.3 zeigt den gesamten Schalldämpfer und in den Abbildungen 5.4 und 5.5 sind die genauen Maße eingetragen.

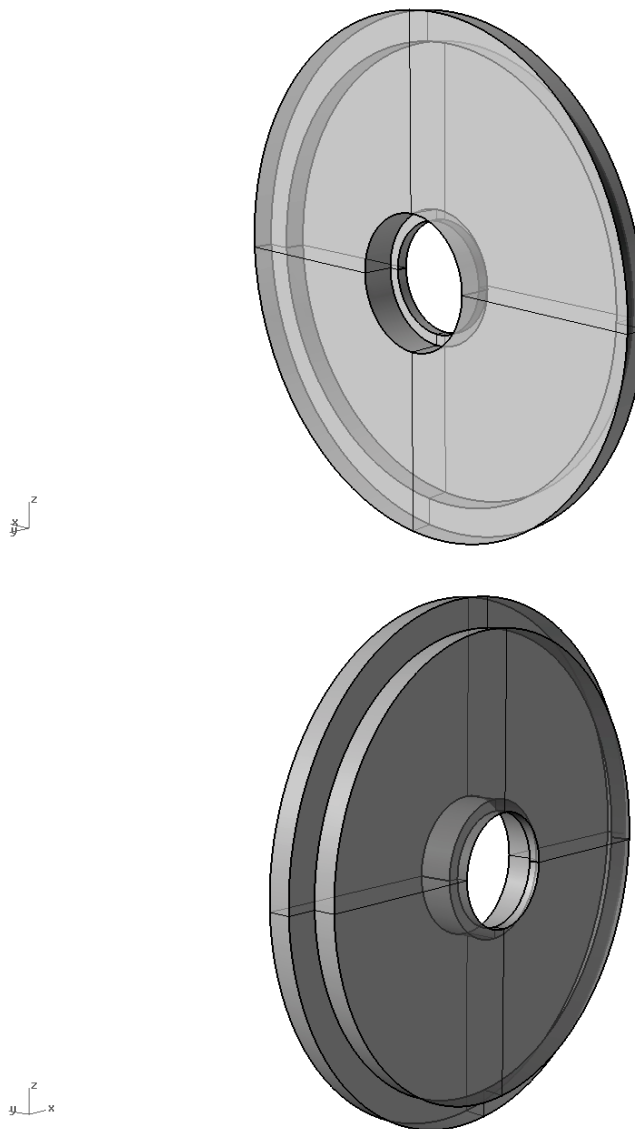


Abbildung 5.1: 3D-Modell des Deckels

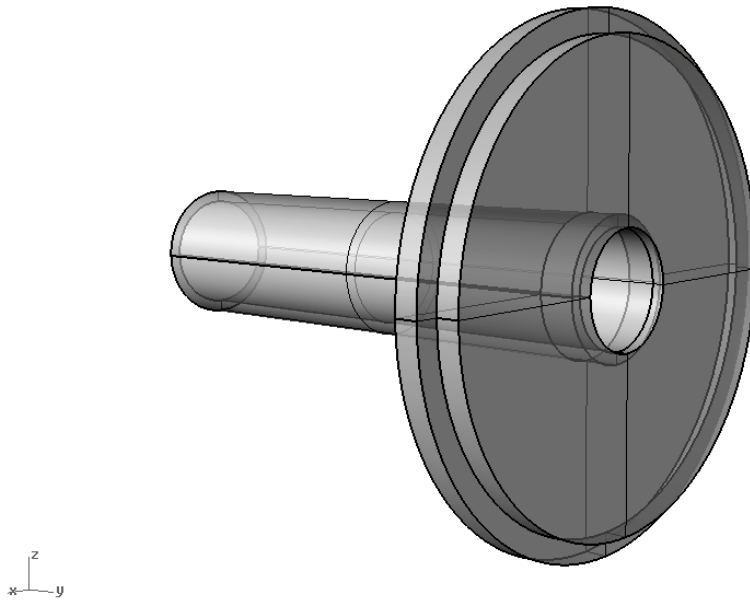


Abbildung 5.2: Deckelscheibe mit Ein- bzw. Ausgangsrohr

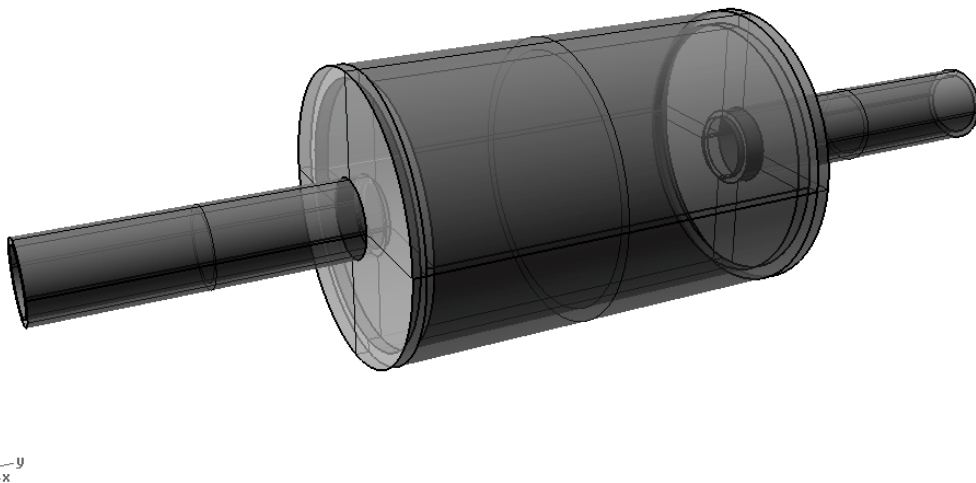


Abbildung 5.3: Kammerschalldämpfer aus Rohren verschiedener Durchmesser

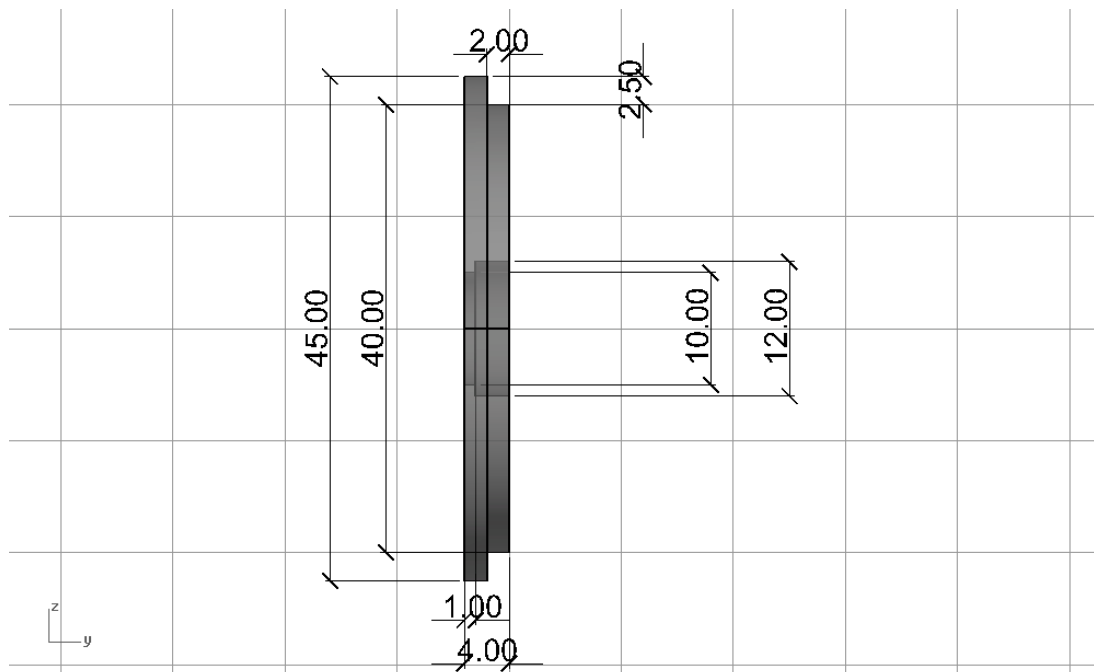


Abbildung 5.4: Maße des Deckels mit Nut für Ein- bzw. Ausgangsrohr (in mm)

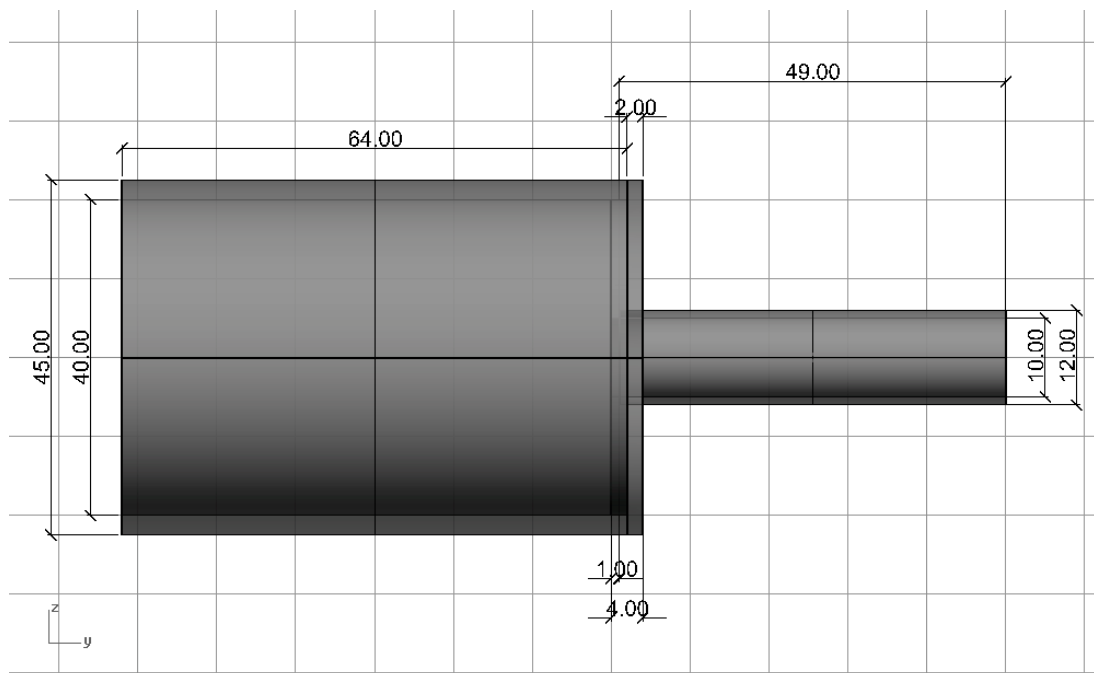


Abbildung 5.5: Maße des Kammerschalldämpfers (in mm)

5.2.2 Vergleich von Simulation und Messung

Die Berechnungen des Transmission Loss wurden mit Matlab durchgeführt und entsprechen den Berechnungen aus Kapitel 2.3.7 für den Dämpfungsverlauf aus der Transfermatrix-Methode.

Wie in Abbildung 5.6 zu sehen, handelt es sich beim Transmission Loss des Kammerschalldämpfers um einen gleichmäßigen Kammfilterverlauf mit einer periodischen Wiederholung der Minima und Maxima. Der Abstand zwischen zwei Minima (oder Maxima) ist nur über die Kammerlänge gegeben und die Amplitude der Dämpfung nur durch das Querschnittsflächenverhältnis von Ein- bzw. Ausgangsrohr zum Kammerrohr. Die genauen Frequenzen der Minima und Maxima dieses Kammerschalldämpfers sind nochmals in Tabelle 5.1 aufgelistet.

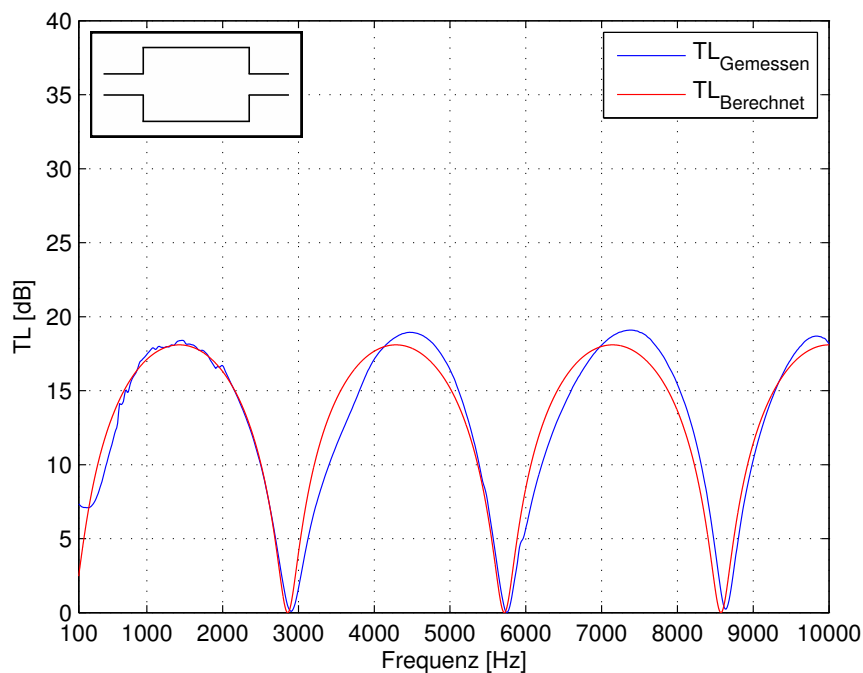


Abbildung 5.6: TL des Kammerschalldämpfers (Vergleich von Messung und Berechnung)

An den Stellen der minimalen Dämpfung ($f = \frac{1}{2} \cdot n \cdot c / l_K$) kann man erkennen, dass die Messung leicht zu größeren Frequenz hin verschoben ist. Dies ist auf die Kammerlänge l_K zurückzuführen, die in diesem Fall nicht exakt 6 cm aufweist, sondern etwas kürzer ist (im Zehntelmillimeterbereich). Solch geringe Abweichungen können bei der Fertigung der Prinzipschalldämpfer nicht ausgeschlossen werden.

Weiters ist zu erkennen, dass die Dämpfung zu hohen Frequenzen hin leicht ansteigt, was auf die Dissipation durch innere Reibung zurückgeführt werden kann (frequenzabhängig mit $\sqrt{f}$) [7].

Tabelle 5.1: Minima und Maxima des Transmission Loss

Maxima	Minima
1430 Hz	2860 Hz
4290 Hz	5720 Hz
7150 Hz	8580 Hz
10010 Hz	11440 Hz

5.3 $\lambda/4$ –Resonator mit Kammer

5.3.1 Konstruktion

Beim $\lambda/4$ –Resonator steht mindestens ein Zuleitungsrohr (eventuell auch beide) in die Kammer hinein. Die hineinstehende Länge bestimmt zusammen mit den Abmessungen des Schalldämpfers (Volumen, Rohrdurchmesser) den Transmission Loss des $\lambda/4$ –Resonators.

Für den Aufbau wurden die selben Maße wie beim Kammerschalldämpfer verwendet, da auch hier das Volumen und die Querschnittsfläche mit den Maßen des realen Schalldämpfers übereinstimmen soll. Das heißt die Kammer ist identisch, die Deckelscheiben auf den Seiten, bei denen das Eingangs- oder Ausgangsrohr ins Kammerrohr ragen, haben hier aber keine Nut, sondern eine durchgängige Bohrung und die Zuleitungsrohre gibt es in verschiedenen Längen (6 cm, 7 cm und 8 cm).

Der $\lambda/4$ –Resonator kann also sehr variabel aufgebaut werden: So dass nur ein Zuleitungsrohr in die Kammer hineinragt (1 cm, 2 cm oder 3 cm), die andere Seite ist dann wie beim Kammerschalldämpfer ein Querschnittsprung, oder dass auf beiden Seiten die Zuleitungsrohre hineinstehen (mit gleichen oder unterschiedlichen Längen).

Die Abbildungen 5.7 und 5.8 zeigen das 3D–Modell eines $\lambda/4$ –Resonators, bei dem nur auf einer Seite ein Zuleitungsrohr in die Kammer hineinsteht. In Abbildung 5.9 sind die Maße eines solchen Schalldämpfers mit 3 cm Überstand in die Kammer eingetragen.

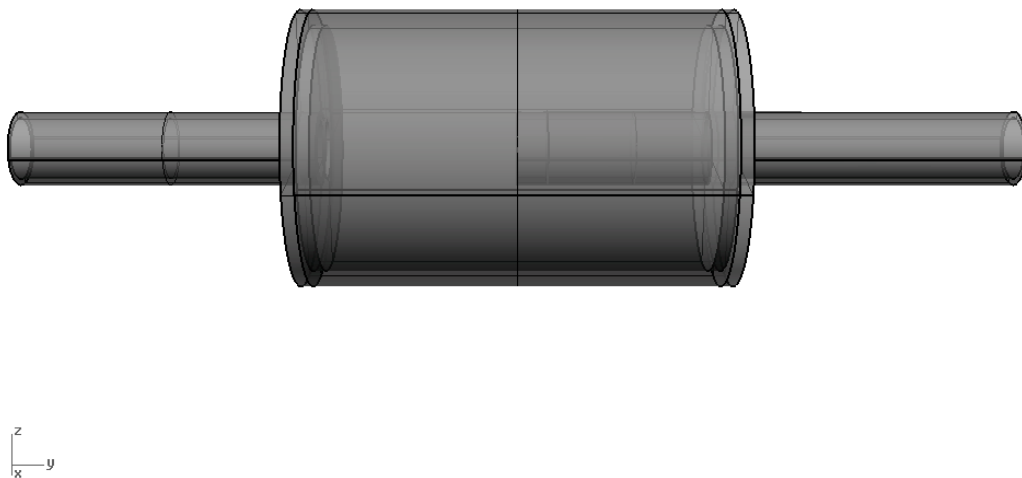


Abbildung 5.7: 3D–Modell des $\lambda/4$ –Resonators

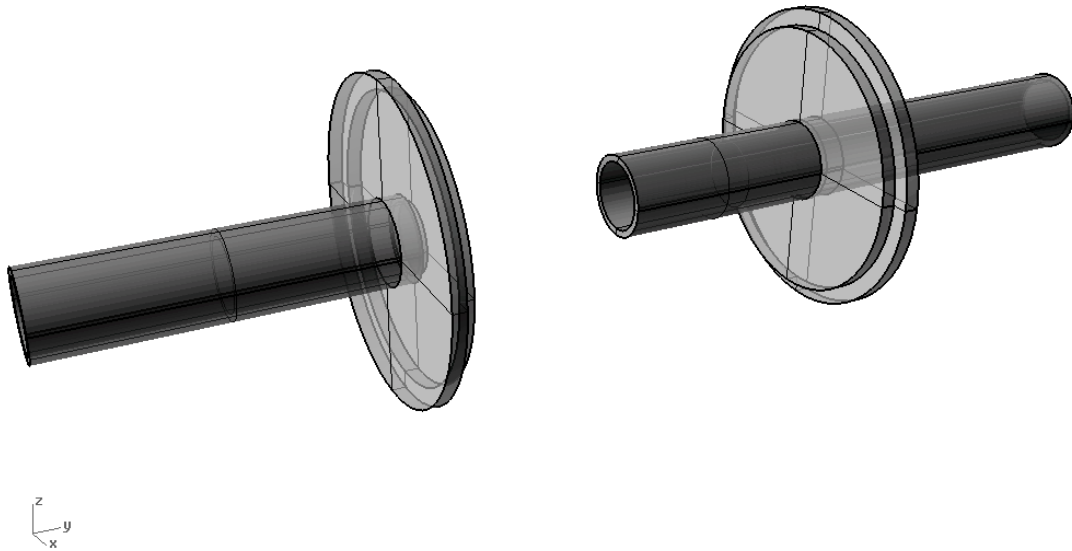


Abbildung 5.8: 3D-Modell des $\lambda/4$ -Resonators ohne Kammerrohr

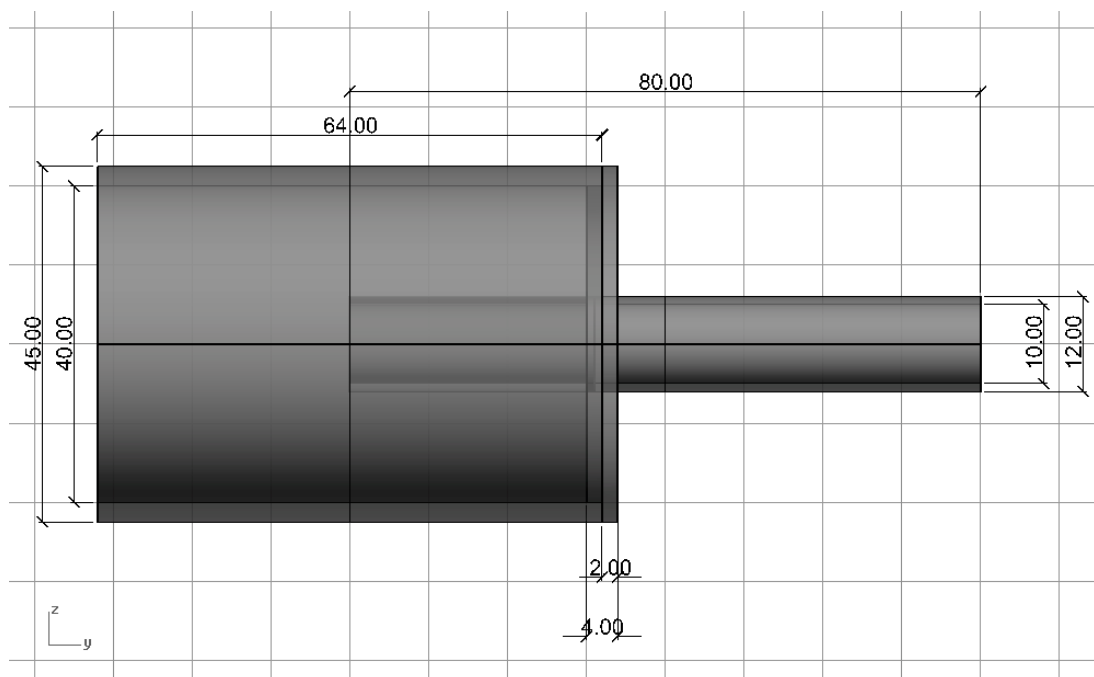


Abbildung 5.9: Maße des $\lambda/4$ -Resonators (in mm)

5.3.2 Vergleich von Simulation und Messung

Die Berechnungen des Transmission Loss der verschiedenen $\lambda/4$ -Resonatoren wurden in Matlab mit der Kettenmatrixmethode durchgeführt.

In den Abbildungen 5.10 bis 5.17 sind die Dämpfungsverläufe von verschiedenen konfigurierten Schalldämpfern zu sehen.

Es fällt auf, dass der kammfilterartige Verlauf des Kammerschalldämpfers auch hier wieder zu finden ist, da die Volumina und die Verhältnisse von den Zuleitungs- zu den Kammerrohren die selben sind. Allerdings treten bei den $\lambda/4$ -Resonatoren je nach Bauart ein, zwei, drei oder vier Maxima im relevanten Frequenzbereich auf, deren Werte weit über den Dämpfungswerten des Kammerschalldämpfers liegen, da die Resonanzspitzen der $\lambda/4$ -Resonanzen sich mit dem Dämpfungsverlauf der Kammer überlagern. Die berechneten Kurven haben bei unendlich feiner Frequenzauflösung theoretisch unendlich große Dämpfungswerte bei diesen Maxima.

Bei den $\lambda/4$ -Resonatoren gibt es zwischen den Messungen und den Berechnungen teilweise deutliche Unterschiede bei den Frequenzen der Resonanzspitzen. Aus diesem Grund wurde eine Mündungskorrektur, ähnlich der des Helmholtz-Resonators entwickelt, die die Resonanzspitzen der Berechnung an die der Messung anpasst. Diese Korrektur ist abhängig von der Länge l des hineinstehenden Rohrstücks und dem Zustand von einseitigem oder beidseitigem hineinstehenden Rohrstück (einseitig $q = 1$, beidseitig $q = 2$):

$$l_{eff} = l + \Delta l \quad \text{mit} \quad \Delta l = 0,0029 + q \cdot 0,02 \cdot l \quad \text{in [m]} \quad (5.1)$$

Diese Mündungskorrektur auf jedes hineinstehende Rohr angewandt, führt zu den berechneten Kurven, die im Folgenden mit den Messungen verglichen werden.

Für die Schalldämpfer mit 1 cm Überstand ins Kammerrohr liegt die Resonanzfrequenz bei 6545 Hz und der kammfilterartige Verlauf unterhalb und oberhalb dieser Resonanz ist auf die Kammerlänge von 6 cm zurückzuführen.

Man kann deutlich erkennen, dass die Dämpfung steigt, wenn Eingangs- und Ausgangsrohr in die Kammer hineinstehen (im Vergleich zu einem einzelnen hineinstehenden Rohr), die Resonanzfrequenz aber gleich bleibt (vgl. Abb. 5.10 und 5.11).

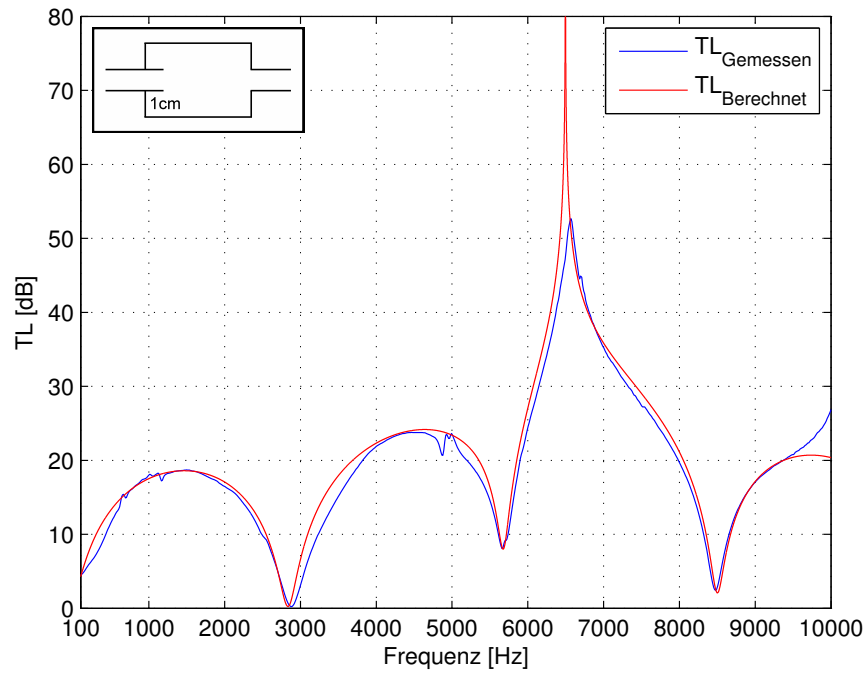
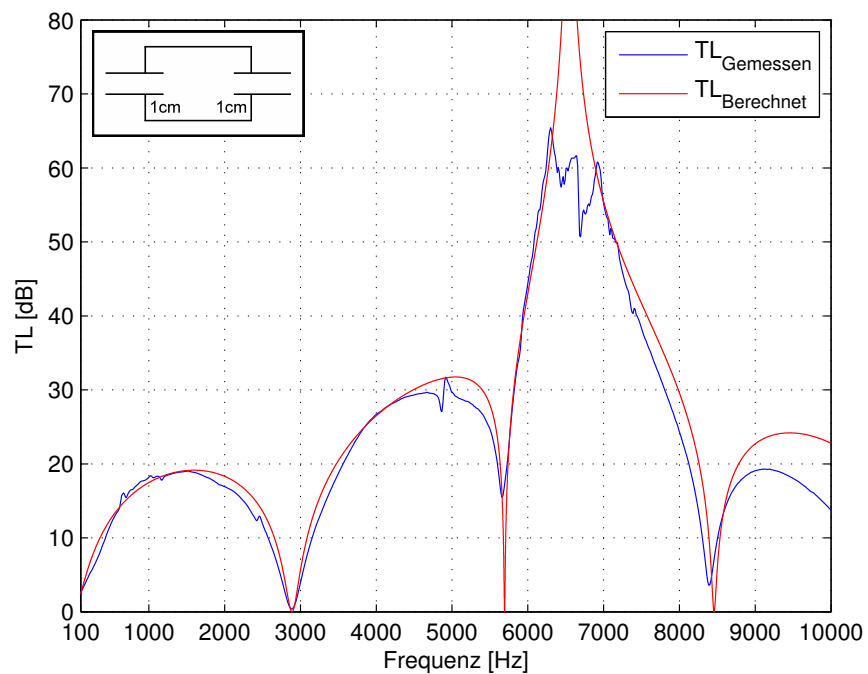
An den Minima lässt sich auch hier ein kleiner Versatz feststellen. Dieser ist wieder auf die Fertigungsgenauigkeit zurückzuführen, was bedeutet, dass die Kammerlänge bei den $\lambda/4$ -Resonatoren nicht exakt 6 cm ist.

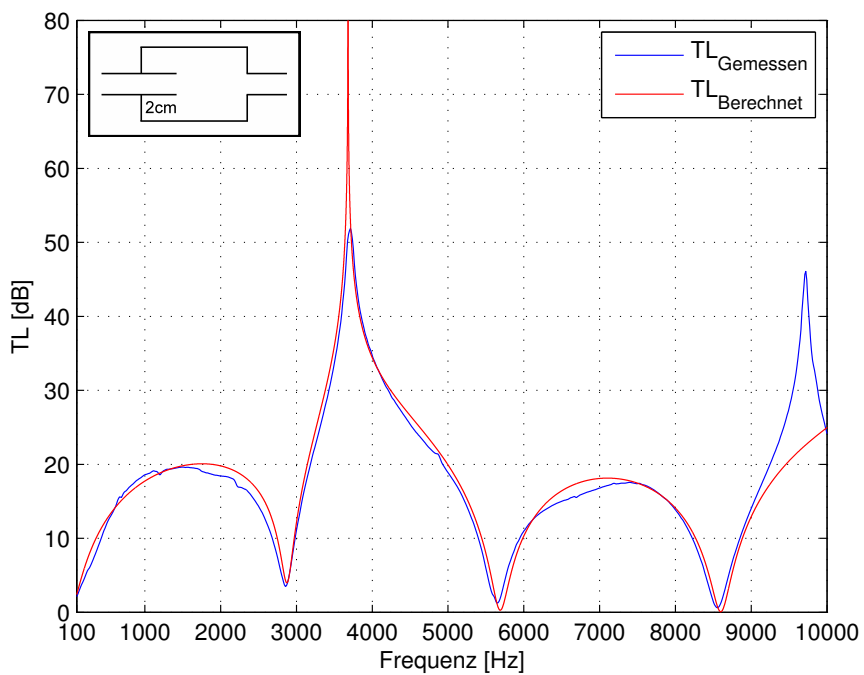
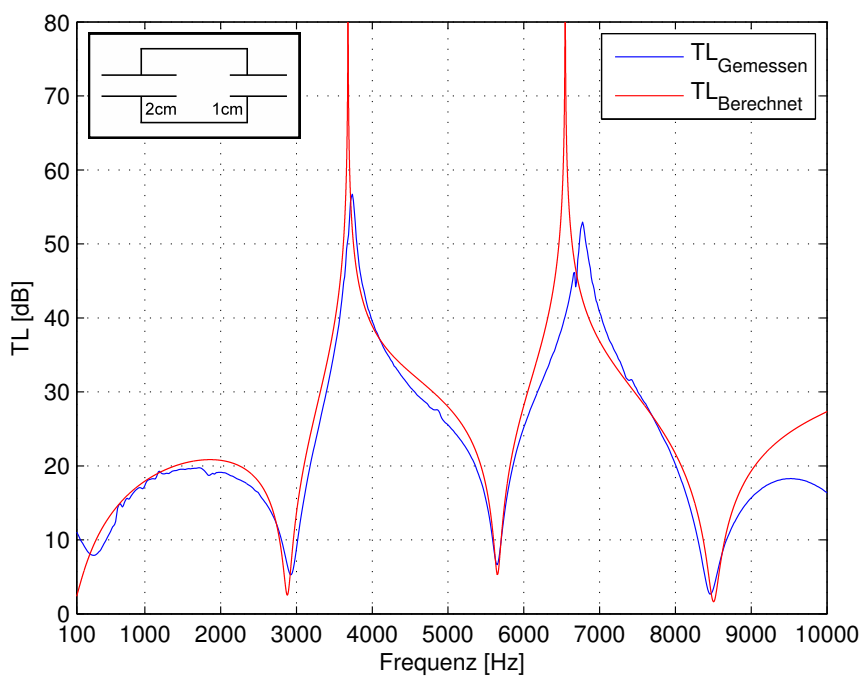
Bei den Schalldämpfern mit 2 cm Überstand ins Kammerrohr ist bereits zusätzlich zur $\lambda/4$ -Resonanz (3680 Hz) die $3\lambda/4$ -Resonanz zu sehen (ca. 9700 Hz). Hier funktioniert die Mündungskorrektur leider nicht optimal, da der berechnete $3\lambda/4$ -Wert bei 11040 Hz liegt.

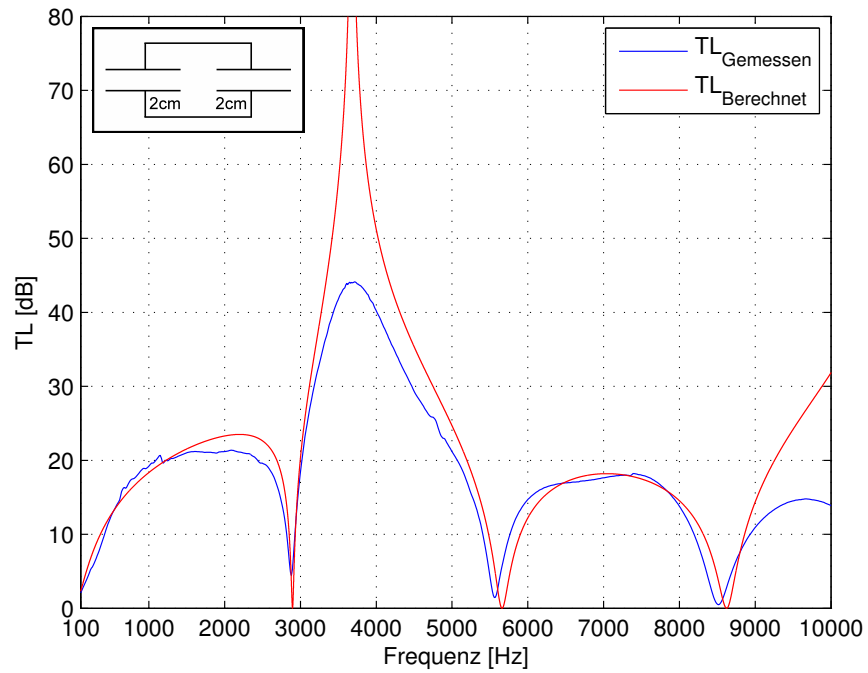
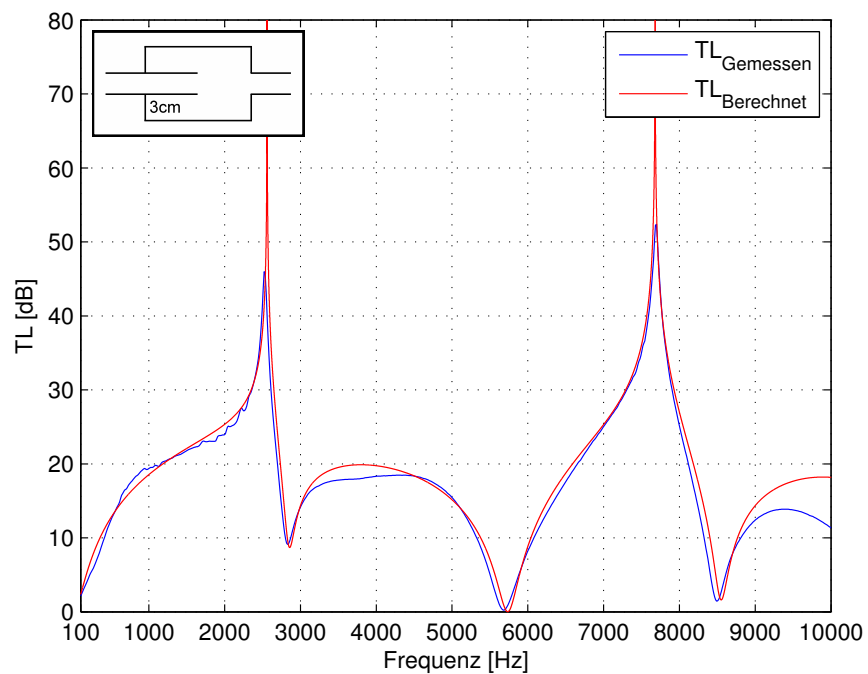
Bei der Variante mit 2 cm und 1 cm Überstand (s. Abb. 5.13) treten zwei unterschiedliche Grundresonanzen auf: 3680 Hz und ca. 6545 Hz.

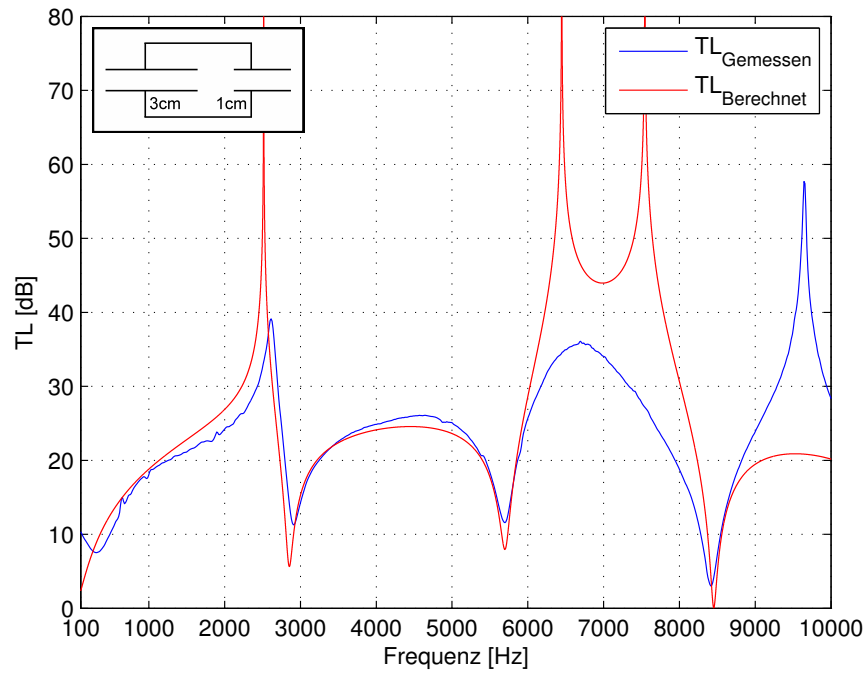
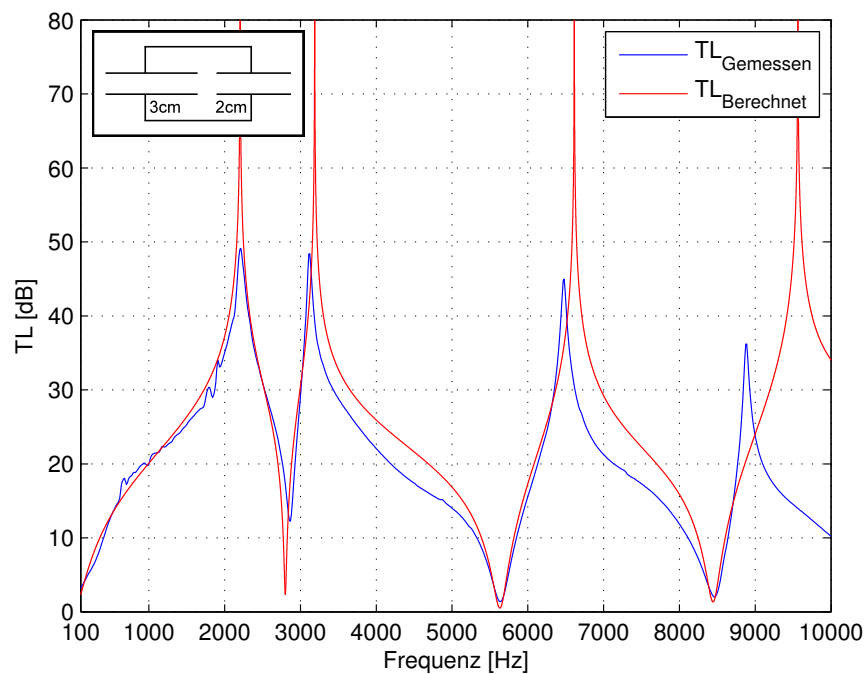
Aufgrund der Messergebnisse lässt sich feststellen, dass die Varianten, bei denen zwei Rohrstücke der selben Länge ins Kammerrohr stehen, zwar insgesamt eine größere Dämpfung aufweisen, aber bei ihren Resonanzspitzen nicht so gut ausgeprägt sind, wie die Varianten mit der jeweils selben Länge nur einseitig (vgl. Abb. 5.11 und 5.14).

Auch bei den Varianten mit 3 cm und 1 cm, bzw. 3 cm und 2 cm lässt sich erkennen, dass sie im Vergleich zu der einseitigen Variante mit 3 cm etwas größere Abweichungen aufweisen (s. Abb. 5.15 bis 5.17).

Abbildung 5.10: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)Abbildung 5.11: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)

Abbildung 5.12: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)Abbildung 5.13: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)

Abbildung 5.14: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)Abbildung 5.15: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)

Abbildung 5.16: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)Abbildung 5.17: TL des $\lambda/4$ -Resonators (Vergleich von Messung und Berechnung)

5.4 Helmholtz–Resonator

5.4.1 Konstruktion

Der Helmholtz–Resonator ist im Prinzip identisch zum $\lambda/4$ –Resonator aufgebaut, nur dass hier ein Rohr komplett durch das Kammerrohr führt. In diesem Rohr ist mittig eine Bohrung, die das Rohr mit dem Volumen der Kammer verbindet.

Da das Resonatorvolumen entscheidend für die Resonanzfrequenz ist und auch dem Volumen des realen Schalldämpfers entsprechen soll, wurde das Kammerrohr mit einer effektiven Länge von 6,5 cm gefertigt, da das Volumen des dünneren, durchgeführten Rohres abgezogen werden muss:

$$l = \frac{V}{\pi \cdot (r_1^2 - r_2^2)} = \frac{75}{\pi \cdot (2^2 - 0,6^2)} \approx 6,5 \text{ cm} \quad (5.2)$$

Da die beiden Deckelscheiben mit ihrer Nut direkt auf das Kammerrohr aufgesetzt werden und auf jeder Seite 2 mm in die Kammer ragen, muss dieses nochmals 4 mm länger sein (69 mm, s. Abb. 5.20).

Das durchgeführte Rohr hat eine Länge von 16,5 cm und damit ebenso 5 cm Zuleitung auf beiden Seiten. Dieses Rohr wurde in zwei verschiedenen Varianten gefertigt, einmal mit einer Bohrung von 6 mm Durchmesser und einmal mit einer Bohrung von 8 mm Durchmesser, die exakt in der Mitte des Rohres liegt. So kann auch bei diesem Prinzipschalldämpfer einfach das durchgeführte Rohr ausgetauscht werden und man bekommt durch die andere Bohrung eine andere Resonanzfrequenz und somit einen anderen Transmission Loss.

Die Abbildungen 5.18 und 5.19 zeigen 3D–Modelle des Helmholtz–Resonators und die Abbildungen 5.20 und 5.21 zeigen die Konstruktionszeichnungen mit Maßen.

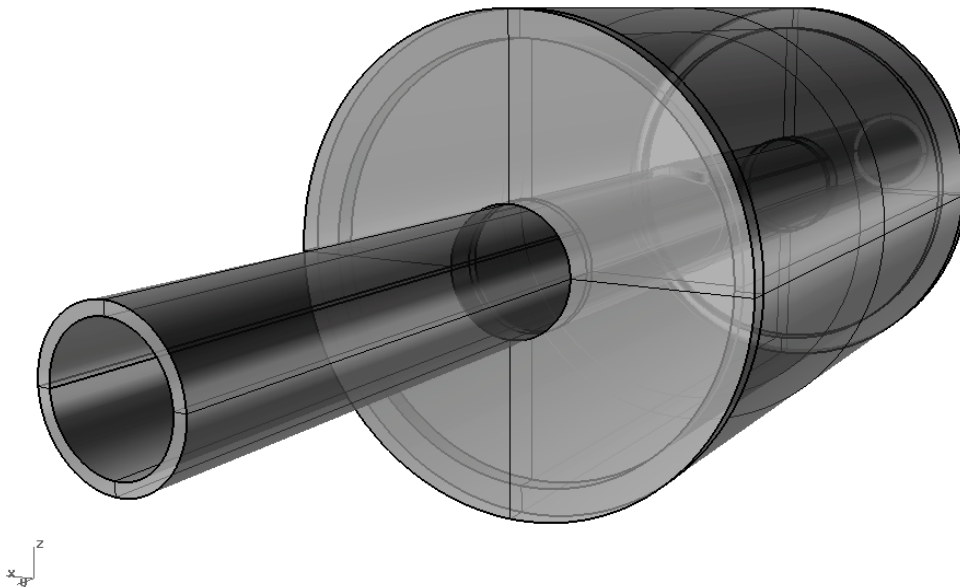


Abbildung 5.18: 3D–Modell des Helmholtz–Resonators

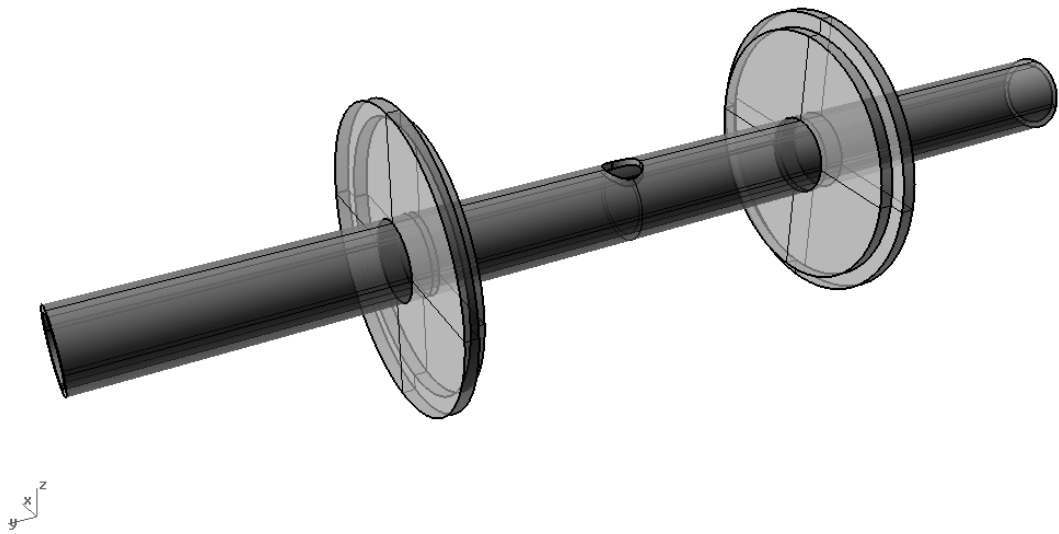


Abbildung 5.19: 3D-Modell des Helmholtz-Resonators ohne Kammerrohr

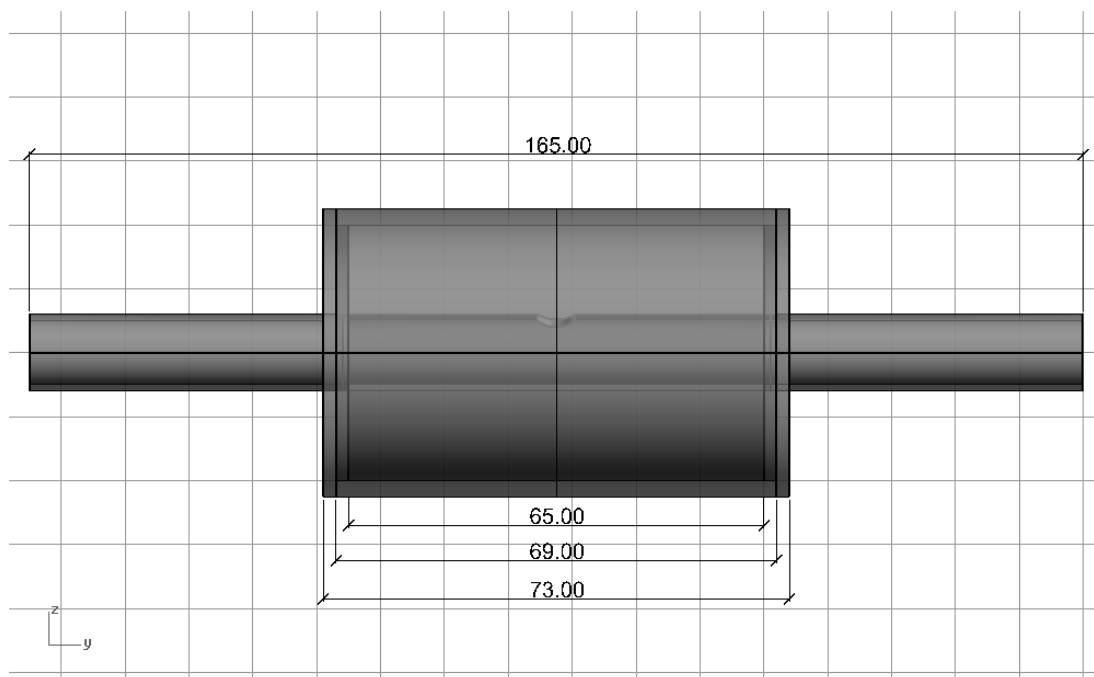


Abbildung 5.20: Maße des Helmholtz-Resonators (in mm)

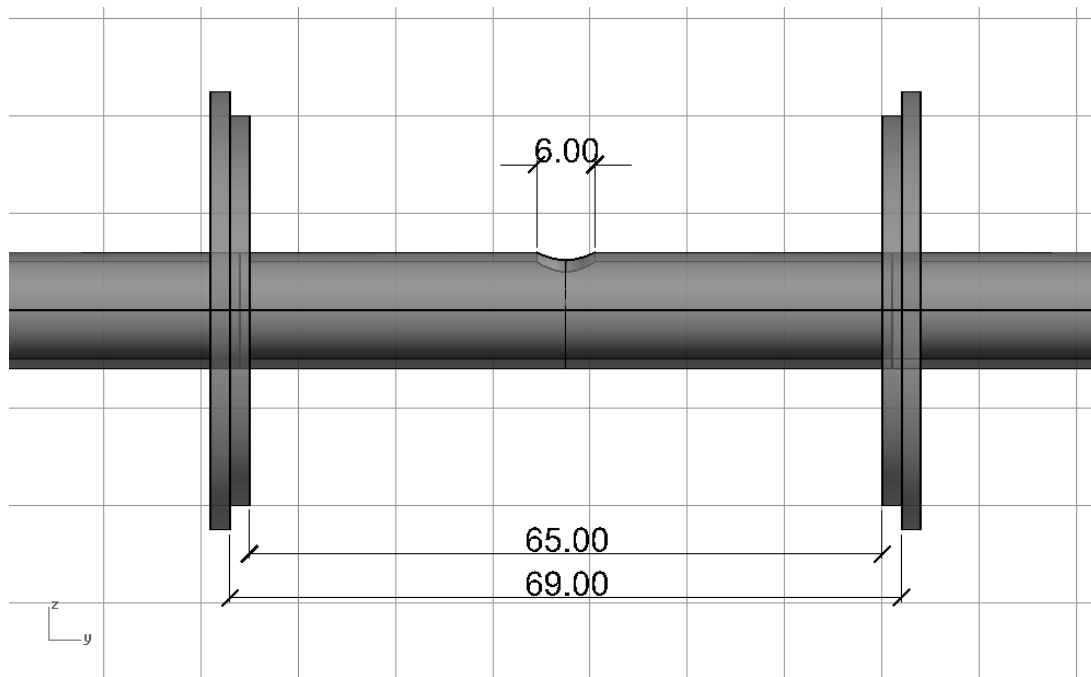


Abbildung 5.21: Maße des Resonanzlochs (in mm), Durchmesser 6 mm bzw. 8 mm

5.4.2 Vergleich von Simulation und Messung

Für die Berechnung des Transmission Loss wird die Resonanzfrequenz des Helmholtz-Resonators benötigt. Diese wurde mit Gleichung 2.38 berechnet und in die Berechnung der Transfermatrix-Methode eingesetzt (s. Gl. 2.106 bis 2.110).

Allerdings wurde hier eine etwas abgeänderte Mündungskorrektur verwendet, um die Helmholtz-resonanz der Berechnung an die der Messung anzupassen:

$$d_{eff} = d + 0,14 \sqrt{r_H \cdot 1m} \quad \text{in [m]} \quad (5.3)$$

In den Abbildungen 5.22 und 5.24 sind die Dämpfungsverläufe für die Prinzipschalldämpfer mit 6 mm und 8 mm Resonanzloch zu sehen. Die Resonanzfrequenzen stimmen bei Messung und Berechnung ziemlich genau überein, nur die Güte der Resonanzen ist bei den Messungen etwas geringer, als bei den berechneten Verläufen.

Bei beiden Resonatoren (6 mm und 8 mm Resonanzloch) fällt jedoch auf, dass zusätzlich zur Helmholtz-Resonanz noch drei etwas geringer ausgeprägte Spitzen ab 4000 Hz im Dämpfungsverlauf erscheinen.

Die mittlere dieser Resonanzen hängt mit der Kammerlänge zusammen, da beide Schalldämpfer zusätzlich als $\lambda/4$ -Resonatoren wirken. Dabei ist die Länge von Resonanzloch bis Kammerrand (in diesem Fall $l_1 = l_2 = l_K/2 = 3,25$ cm) entscheidend für die Frequenz dieser Resonanz, die auch bei den berechneten Transmission Loss Kurven ca. 5300 Hz beträgt (vgl. Kapitel 2.3.9). Wie bei den anderen Prinzipschalldämpfern, gibt es auch hier minimale Abweichungen bei den Frequenzen der Resonanzen, da eine gewisse Ungenauigkeit bei der Fertigung nicht ausgeschlossen werden kann.

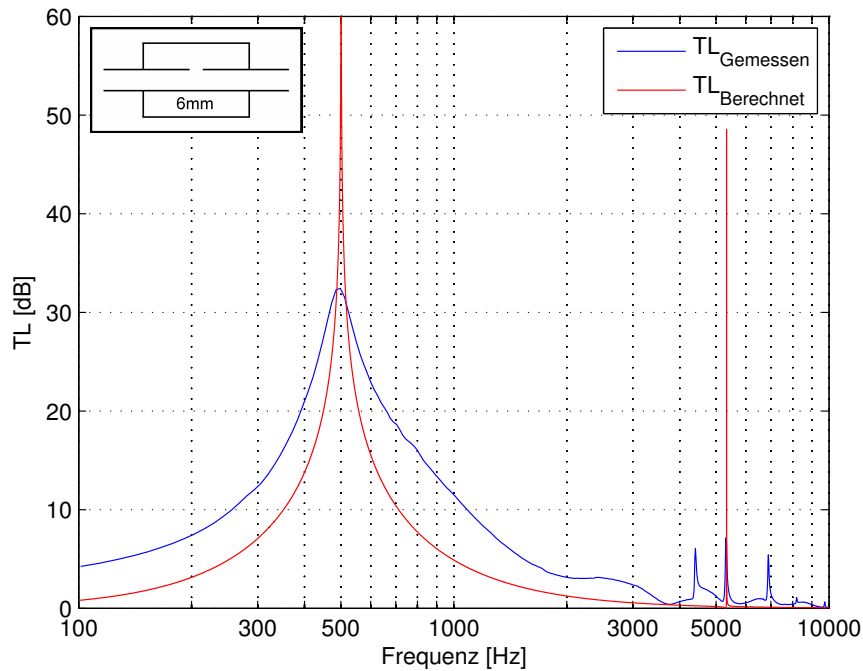


Abbildung 5.22: TL des Helmholtz-Resonators mit 6 mm Resonanzloch (Vergleich von Messung und Berechnung)

Die anderen beiden Resonanzen entstehen durch Quersmoden im Rohr, die bei der Berechnung des Transmission Loss nicht berücksichtigt werden.

Doch die Frequenzen dieser Resonanzen lassen sich aber auf zwei relativ eindeutige Längen projizieren:

So entspricht die Resonanz bei ca. 4400 Hz einer Länge $\lambda/2 \approx 3,9$ cm, was ziemlich genau auf den Durchmesser der Kammer passt ($l_3 = 4$ cm). Und die Resonanz bei ca. 6900 Hz entspricht einer Länge $\lambda/2 \approx 2,5$ cm, was sich auf die Strecke zwischen Kammerwand und Rohrwand des durchgeführten Rohres (l_4) abbilden lässt (s. Abb. 5.23).

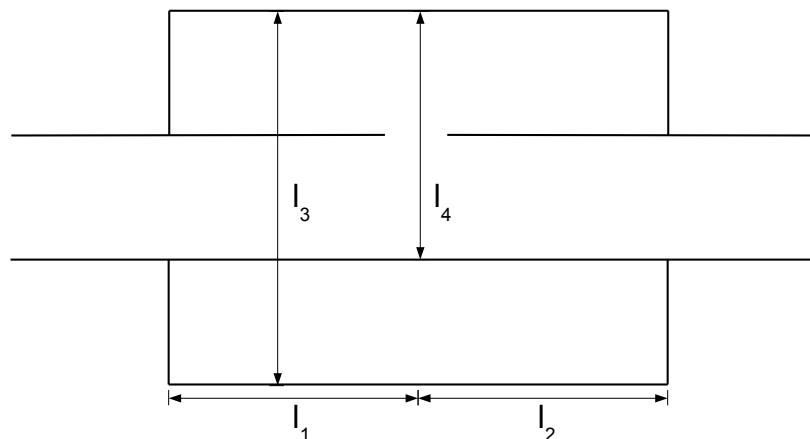


Abbildung 5.23: Relevante Längen für die zusätzlichen Resonanzspitzen bei den Helmholtz-Resonatoren

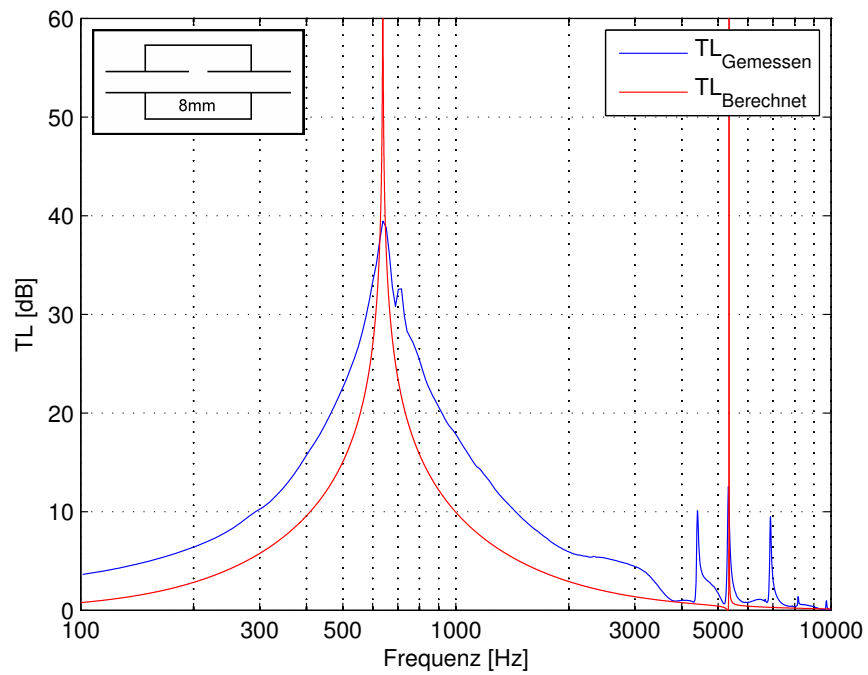


Abbildung 5.24: TL des Helmholtz-Resonators mit 8 mm Resonanzloch (Vergleich von Messung und Berechnung)

6

Realer Schalldämpfer

6.1 Aufbau und Funktion

In diesem Kapitel wird kurz der Aufbau eines realen Schalldämpfers beschrieben und im nächsten Kapitel die Messergebnisse diskutiert.

Dieser Schalldämpfer wird zur Geräuschreduzierung bei Haushaltsgeräten eingesetzt. Er ist als Ansaugschalldämpfer ausgelegt und an einem Kompressor montiert.

Der Schalldämpfer ist aus Kunststoff gefertigt und hat ein Gesamtvolumen von 76 cm^3 . Im Inneren ist er in drei Kammern (klein, mittel, groß) aufgeteilt, die u.a. als Helmholtz-Resonatoren funktionieren.

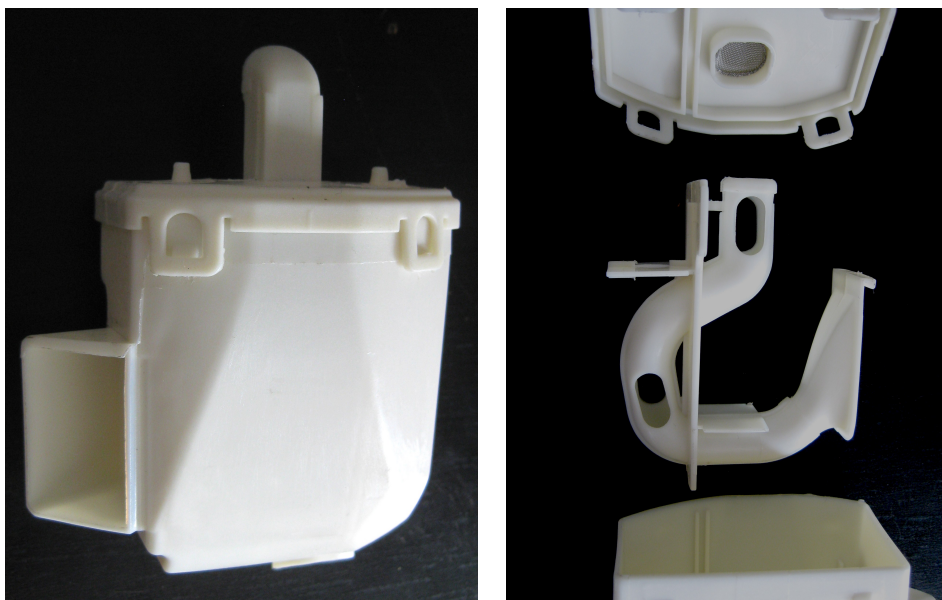


Abbildung 6.1: Realer Schalldämpfer (geschlossen & zerlegt)

Die große und die mittlere Kammer sind über je zwei gegenüber liegende, längliche Löcher (jeweils ca. 68 mm^2 Fläche) im Rohr, das durch den Schalldämpfer führt, angebunden. Die kleinere,

angekoppelte Kammer ist durch ein rundes Loch von 7 mm Durchmesser (ca. 38 mm^2 Fläche) mit der mittleren Kammer verbunden.

Für die Anbindung an den Prüfstand wurde bei diesem Schalldämpfer der Ansaugtrichter abgeschnitten (breite Öffnung unten links in Abb. 6.1) und da sich das Rohr im Inneren zum Eingang hin trichterförmig weitet wurde ein Silikonschlauch mit dem selben Innendurchmesser (8 mm) eingeklebt, so dass der Eingang problemlos an das Messrohr angebunden werden kann (s. Abb. 3.19).

Ausgangsseitig wurde eine Ventilplatte angebracht, die auf das Ausgangsrohr des Schalldämpfers geschraubt wurde und mit dem Ankopplungsstück eine exakte Anbindung an das Messrohr ermöglicht (s. Abb. 3.20).

6.2 Messung

In Abbildung 6.2 ist die Transmission Loss Kurve des realen Schalldämpfers zu sehen. Der Schalldämpfer hat auf der Unterseite zwei kleine Bohrungen, die als Ölablass dienen, damit sich beim Betrieb kein Öl im Inneren des Dämpfers sammeln kann. Es wurden Messungen mit offenem und geschlossenem Ölablass durchgeführt und miteinander verglichen.

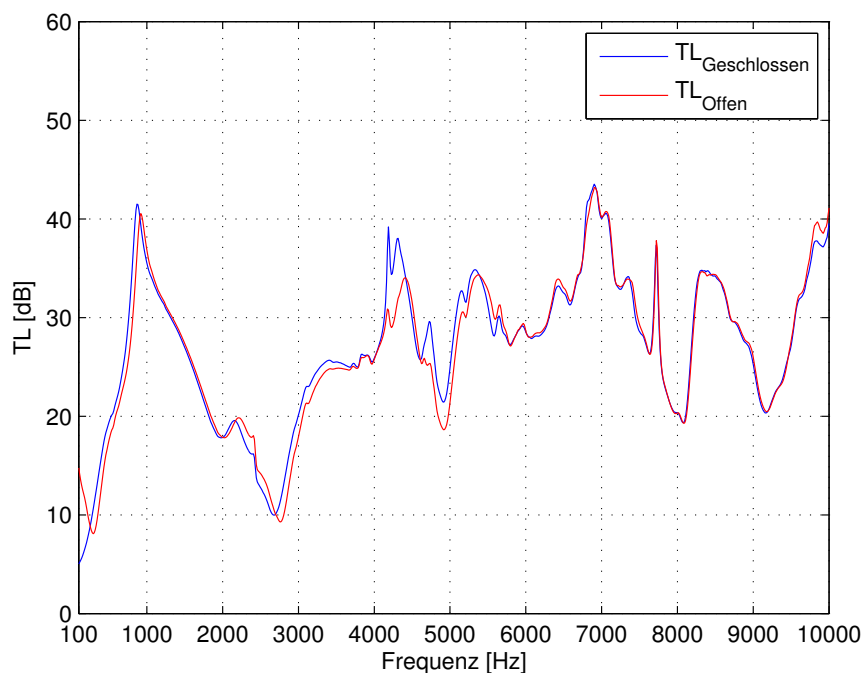


Abbildung 6.2: TL des realen Schalldämpfers (Ölablass: geschlossen & offen)

Die Unterschiede sind allerdings relativ gering. Man sieht, dass die Kurven zwischen ca. 4200 Hz und 5200 Hz leicht voneinander abweichen. Bei ca. 4300 Hz ist die Dämpfung bei geschlossenem Ölablass teilweise bis zu 7 dB größer. Im Frequenzbereich oberhalb von etwa 6000 Hz unterscheiden sich die Transmission Loss Kurven nur noch sehr minimal, sodass man davon ausgehen kann, dass der Zustand des offenen bzw. geschlossenen Ölablasses hier keine Auswirkungen mehr hat.

Mit den bekannten Größen für die Volumina und die Resonanzlöcher der einzelnen Kammern lassen sich mit Gleichung 2.38 einige Resonanzfrequenzen berechnen (s. Tab. 6.1).

Hierfür wurden die länglichen Resonanzlöcher als rund angenommen (mit der selben Querschnittsfläche).

Die Resonanz bei ca. 1000 Hz (große Kammer) ist in der Transmission Loss Kurve deutlich zu erkennen. Die weiteren Dämpfungsmaxima entstehen durch Rohrresonanzen, Abstände zu Kammerwänden ($\lambda/4$ -Prinzip) und Kombinationen mit den Helmholtz-Resonatoren. Dies ist im Rahmen dieser Arbeit aber nicht weiter untersucht worden.

Tabelle 6.1: Kenndaten der einzelnen Kammern des realen Schalldämpfers

	Volumen	Resonanzlochradius
kleine Kammer	7,5 cm ³	3,5 mm
mittlere Kammer	10 cm ³	(2 x) 4,6 mm
große Kammer	45 cm ³	(2 x) 4,6 mm

7

Zusammenfassung und Ausblick

7.1 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde ein Impedanzrohr-Prüfstand zur Bestimmung des Transmission Loss von kleinen Schalldämpfern entwickelt und aufgebaut. Aus theoretischen Überlegungen und den Vorgaben aus der Norm DIN EN ISO 10534-2 [9], sowie einem geforderten Messbereich von 100 Hz bis 10 kHz wurden die Quellen, Messrohre und Anbindungsteile konstruiert und gefertigt und die acht Messmikrofone ausgewählt.

Für die Messungen mit dem PAK-System der Firma Müller-BBM wurde ein Programm in der Arithmetik der Software geschrieben, das eine .exe-Datei mit einer Matlab-Funktion zur Berechnung des Transmission Loss aufruft und das Ergebnis im Ausgabefenster anzeigt. Die Mess- und Grafikdefinitionen der PAK-Software wurden abgespeichert und können jederzeit für neue Messungen am Prüfstand aufgerufen werden.

Auf Basis der Theorie von Reflexionsschalldämpfern wurden drei Prinzipschalldämpfer konstruiert und gefertigt: Ein Kammerschalldämpfer, ein variabel aufbaubarer $\lambda/4$ -Resonator mit Kammer und ein Helmholtz-Resonator mit Kammervolumen in zwei Varianten (6 und 8 mm Resonanzlochdurchmesser).

Die Transmission Loss Kurven dieser Schalldämpfer wurden mithilfe der Kettenmatrixmethode berechnet und mit den jeweiligen Messergebnissen verglichen. Weiters wurde ein realer Schalldämpfer vermessen.

Im folgenden Kapitel werden einige Optimierungsvorschläge und Weiterentwicklungen diskutiert.

7.2 Ausblick

Aufgrund der Erkenntnisse dieser Arbeit, lassen sich einige Überlegungen für eine Optimierung und Weiterentwicklung des Prüfstandes anstellen, welche in einer Folgearbeit umgesetzt werden könnten:

Eine Möglichkeit den Messablauf etwas einfacher zu gestalten, wäre die Implementierung der Transmission Loss Berechnung in der Arithmetik der PAK-Software. Dann müssten die aufgenommenen Zeitrohdaten nicht exportiert und in Matlab wieder importiert werden, was zu einer deutlich schnelleren Berechnung führt. Die für die Berechnung benötigten Mikrofonübertragungsfunktionen könnten in der PAK-Software direkt bestimmt werden, es müssten aber trotzdem drei Berechnungen durchgeführt werden, da für den geforderten Frequenzbereich drei Mikrofonabstände nötig sind.

Eine weitere Optimierung ließe sich bei der Mikrofonanbindung durchführen, die momentan über die Silikonschlauchdichtungen realisiert ist. Wenn hier eine fertigungstechnisch genauere Anbindung eingesetzt wird, können die Auswirkungen der Unebenheiten an den Rohrrinnenwänden deutlich reduziert werden.

Bei der Berechnung des Transmission Loss eines Helmholtz-Resonators mit zylindrischem Volumen (s. Kap. 2.3.9) sollte die zusätzliche Impedanz Z_{zK} (durch das Kammervolumen) noch verifiziert und die genauen Ursachen der Resonanzspitzen geprüft werden. Weiters gilt es zu klären, warum die Resonanzen bei den Messungen der $\lambda/4$ -Resonatoren im oberen Frequenzbereich teilweise nicht mit den berechneten Transmission Loss Kurven übereinstimmen (s. Kap. 5.3.2).

Eine interessante Weiterentwicklung wäre die simultane Messung der vom Schalldämpferkorpus abgestrahlten Schallleistung an die Umgebung, um den Transmission Loss mit der Körperschallabstrahlung eines Schalldämpfers zu vergleichen. Eine mögliche Vorgehensweise wäre Vibrationsaufnehmer am Schalldämpferkorpus anzubringen, aus denen man die abgestrahlte Schallleistung berechnen könnte.

Eine weiterführende Arbeit an diesem Prüfstand könnte auch in Form einer umfangreichen Messreihe mit deutlich mehr Schalldämpfern gemacht werden. Es können auch Schalldämpfer vermessen werden, in die zusätzliches Absorptionsmaterial eingebracht wird oder man ändert das Kammervolumen um größere Dämpfungen und andere Frequenzbereiche zu beurteilen. Aus den Messergebnissen können die Mündungskorrekturen für die $\lambda/4$ -Resonatoren und die Helmholtz-Resonatoren optimiert und eine Korrektur für die Dissipation eingeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] M. L. Munjal, *Acoustics of Ducts and Mufflers With Application to Exhaust and Ventilation System Design*. Wiley-Interscience, 1987.
- [2] W. Weselak, *Technische Akustik VO Version 7.0*. Graz University of Technology, 2008.
- [3] L. L. Beranek, *Noise and Vibration Control*. Inst. of Noise Control Engineer, 1988.
- [4] W. Weselak and G. Graber, *Raumakustik VO*. Graz University of Technology, 2007.
- [5] M. Möser, *Technische Akustik*. Springer, 2009.
- [6] I. L. Vér and L. L. Beranek, *Noise and Vibration Control Engineering: Principles and Applications*. Wiley, 2005.
- [7] W. Weselak, *Akustische Messtechnik 1 VO Version 2.0*. Graz University of Technology, 2008.
- [8] R. Brunnader, “Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter,” Diplomarbeit, Graz University of Technology, 2002.
- [9] DIN, “EN ISO 10534: Akustik - Bestimmung des Schallabsorptionsgrades und der Impedanz in Impedanzrohren,” *DIN Deutsches Institut für Normung eV, Germany*, 2001.
- [10] J. Spötl, “Implementierung einer Nachhallzeitmessung mit Sinus-Sweep,” Toningenieur-Projekt, Graz University of Technology, 2013.
- [11] H. Fuchs, Z. Xueqin, and G. Babuke, *Schallabsorber und Schalldämpfer: Innovative Akustik-Prüfstände*. Springer, 2004.
- [12] S. Rienstra and A. Hirschberg, *An Introduction to Acoustics*. Eindhoven University of Technology, 2004.

- [13] M. Möser, Ed., *Messtechnik der Akustik*. Springer, 2009.
- [14] V. Ovidiu and V. Kolumban, “Reactive silencer modeling by transfer matrix method and experimental study,” *9th WSEAS Int. Conference on Acoustics & Music*, 2008.
- [15] R. Liepins, “Messmikrofone,” Toningenieur-Projekt, Graz University of Technology, 2009.
- [16] W. Truppe and F. Kappler, “Messsystem für akustische Zweitore,” Diplomarbeit, Graz University of Technology, 2008.
- [17] W. Weselak, “Messung akustischer Parameter durchstömter Zweitore,” Dissertation, Graz University of Technology, 2006.
- [18] C. Svendsen, “Acoustics of suction mufflers with multiple chambers,” *International Compressor Engineering Conference*, 2006.
- [19] Z. Tao and A. Seybert, “A review of current techniques for measuring muffler transmission loss,” *SAE International*, 2003.
- [20] S. Jung and T. Kim, “Measurement of sound transmission loss by using impedance tubes,” *Journal of the Korean Physical Society*, 2008.
- [21] S. Braun, “Helmholtzresonatoren,” Bachelorarbeit, Graz University of Technology, 2009.
- [22] A. Selamet and I. Lee, “Helmholtz resonator with extended neck,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2003.

Code der PAK–Arithmetik

Hier finden sich die Formeln aus der PAK–Software, mit denen die Messdaten gespeichert werden, die Matlab–Funktion zur Berechnung des Transmission Loss aufgerufen wird und das Ergebnis von der PAK–Software wieder eingelesen wird:

```
tmp1 = WRITE_52DATA_FILE(M1, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M1.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp2 = WRITE_52DATA_FILE(M2, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M2.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp3 = WRITE_52DATA_FILE(M3, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M3.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp4 = WRITE_52DATA_FILE(M4, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M4.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp5 = WRITE_52DATA_FILE(M5, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M5.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp6 = WRITE_52DATA_FILE(M6, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M6.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp7 = WRITE_52DATA_FILE(M7, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M7.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp8 = WRITE_52DATA_FILE(M8, "C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\M8.dat", BIN, NEW_FILE, "in")
tmp9 = CALL_EXE("C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Exe\Fkt_TL_Filt.exe")
RESULT = READ_52DATA_FILE("C:\Users\PAK\PakData\DATA\Schalldaempferpruefstand\Temp_Data\TL.dat", 'Langsame Größe', 'Schalldämmmaß', 'Frequenz')
```

Dateipfade der PAK–Voreinstellungen

Hier ist eine Liste der Dateipfade aller PAK–Voreinstellungen für das Projekt **Schalldämpferprüfstand** (auf dem Messnotebook):

Tabelle A.1: Liste der Dateipfade

Schalldämpfer_Messdef_01.vas_mdf	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Messdef
Schalldämpfer_Messeinst_01	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Setup
Schalldämpfer_Grafikdef_01	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\PlotEditor
Schalldämpfer_Var.pak_var	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Arithmetic \Variables
Schalldämpfer_For_01.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Arithmetic \Formulas
Schalldämpfer_For_02.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Arithmetic \Formulas
Prüfstand_FFT_Vorlage_01.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Format
Prüfstand_FFT_Vorlage_02.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Format
Prüfstand_Mics_Vorlage_01.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Format
Prüfstand_Result_Vorlage_01.pak_for	C:\Benutzer\PAK\PakData\Tables\Format