

Messsystem für akustische Zweitore

Diplomarbeit

durchgeführt von

Wolfgang Truppe und Felix Kappler

Institut für Breitbandkommunikation
der Technischen Universität Graz

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

Begutachter: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber

Betreuer: Ao. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Gerhard Graber
Dipl.-Ing. Dr.techn. Werner Weselak

Graz, im April 2008

Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit dem Aufbau eines 4-Mikrofon-Impedanzrohrmesssystems als Erweiterung eines bestehenden 2-Mikrofon-Impedanzrohres. Damit lassen sich neben den akustischen Materialparametern Reflexionsfaktor, Absorptionsgrad, Wandimpedanz und Admittanz, die über die Übertragungsfunktionsmethode mit dem 2-Mikrofon-Impedanzrohr bestimmt werden können, durch Anwendung der Kettenmatrixmethode zusätzlich der Transmissionsfaktor und die Durchgangsdämpfung von akustischen Absorbern bestimmen.

Es wird die Theorie der Übertragungsfunktionsmethode und der Kettenmatrixmethode beschrieben und die daraus ablesbaren Materialparameter definiert und erklärt.

Bei der Adaptierung der Theorie nimmt vor allem die Kalibrierung des Messsystems großen Raum ein.

Anschließend wird die Hardware des Vier-Mikrofon-Impedanzrohres vorgestellt, und die Softwareentwicklung mit den Programm- und Datenstrukturen ausführlich beschrieben.

Eine als Benutzerhandbuch verfasste Beschreibung des Messsystems mit einigen ausgewählten Beispielmessungen zur Evaluierung des Messsystems bildet den Abschluss der Arbeit.

Abstract

This thesis deals with the construction of a four-microphone impedance tube as an extension of an existing two-microphone impedance tube. Besides the acoustic parameters reflection factor, absorption coefficient, acoustic impedance and admittance, which are determined with the transfer function method using the two-microphone impedance tube, also the transmission factor and the transmission loss of acoustic absorbers can be determined using the transfer matrix method.

The theory of the transfer-function-method and the transfer matrix method is described and the resulting parameters are defined and explained.

When adapting the theory, there is a focus on the calibration of the measuring system.

Then, the hardware of the four-microphone impedance tube is presented, and the software development with the program and data structures are described in detail.

A description of the measuring system, which is written as a user manual and a few selected sample measurements for the evaluation of the measurement system is the completion of the work.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
1.1	Allgemeines.....	6
1.2	Aufgabenstellung	6
1.3	Durchführung der Arbeit.....	7
1.4	Gliederung der Arbeit	7
2	Grundlagen und Theorie	8
2.1	Messungen in Messrohren	8
2.2	Trennungsmethode / Übertragungsfunktionsmethode.....	9
2.3	Kettenmatrixmethode.....	11
2.3.1	Kettenmatrix.....	11
2.3.2	Kettenmatrix eines verlustbehafteten homogenen Zweitores	13
2.3.3	Bestimmung der Kettenmatrixparameter eines verlustbehafteten inhomogenen Zweitores	15
2.4	Berechnung akustischer Parameter	18
2.4.1	Reflexionsfaktor, Reflexionsgrad und Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall.....	18
2.4.2	Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung (TL)	22
2.4.3	Wandimpedanz.....	24
3	Adaptierung der Theorie	26
3.1	Wahl der Methode.....	26
3.2	Messbereich	26
3.3	Kalibrieren	28
3.3.1	Übersicht der Signalwege.....	28
3.3.2	Kalibrierung – 2-Mikrofonmethode.....	30
3.3.2.1	2-mic-Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU-Kal.).....	32
3.3.2.2	2-mic-Kalibrierung nach ISO 10534-2 (ISO-Kal.).....	33
3.3.3	Kalibrierung – 4-Mikrofonmethode.....	34
3.3.3.1	4-mic-Kalibrierung in Anlehnung an ISO 10534-2	37
3.3.3.2	4-mic-Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU).....	38
3.3.4	Vergleich von Kalibrierproben für 2-mic-Messungen	40
3.3.4.1	Kalibrierung nach ISO 10534-2.....	47
3.3.4.2	Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU).....	47
3.3.4.3	Beispiele zur Kalibrierung.....	48
3.3.5	Vergleich von Kalibrierproben für 4-mic-Messungen.....	58
3.3.6	Auswahl einer geeigneten Kalibrierprobe.....	67
3.4	Mittelung.....	68

4	Aufbau des Messsystems	70
4.1	Messrohr und Probenhalter	70
4.2	Lautsprecher	72
4.3	Mikrofonhalterungen	73
4.4	Hardware und Aufbau des gesamten Messsystems	74
5	Softwareentwicklung	77
5.1	Wahl der Programmiersprache	77
5.2	Allgemeines	78
5.3	Entwurf der Benutzeroberfläche (GUI)	78
5.3.1	Fenster „CATS8_graph“	79
5.3.2	Fenster „CATS8“	80
5.4	Programmstruktur	81
5.4.1	Programmmodul „CATS8“	82
5.4.2	Programmmodul „CATS8_graph“	84
5.4.3	Programmmodule „CATS8_messen_2mic“ und „CATS8_messen_4mic“	87
5.4.4	Programmmodul „ReportErstellen“	88
5.4.5	Programmmodul „CATS8_Pegel“	88
5.5	Datenstrukturen	88
5.5.1	Programminterne Strukturen	88
5.5.2	Dateistrukturen	89
5.6	Aufnahmen der Eingangsgrößen	90
6	Programmbeschreibung	93
6.1	Einleitung	93
6.2	Vorbereitung des Messsystems	94
6.2.1	Aufbau des Messsystems	94
6.2.2	Anlegen eines Projektes	96
6.2.3	Voreinstellungen	97
6.2.3.1	Einpegeln	97
6.2.3.2	Kalibrieren	98
6.3	Durchführung einer Messung	100
6.4	Darstellung der Messergebnisse	104
6.4.1	Anzeigen der Parameter	104
6.4.2	Verwalten der Messungen	109
6.4.3	Erstellung eines Reports	110
6.5	Globale Parameter	112
7	Evaluierung des Messsystems	113
7.1	Beispielmessungen verschiedener Absorber	115
7.1.1	Reflexionsfaktor	116

7.1.2 Reflexionsgrad.....	118
7.1.3 Absorptionsgrad	120
7.1.4 Wandimpedanz.....	122
7.1.5 Wandadmittanz.....	124
7.1.6 Transmissionsfaktor	126
7.1.7 Durchgangsdämpfung	128
7.2 Vergleichsmessung 4-mic- / 2-mic-Methode.....	130
8 Zusammenfassung und Ausblick	131

8.1 Zusammenfassung.....	131
8.2 Ausblick	131
8.2.1 Erweiterungen der Software.....	131
8.2.2 Erweiterungen der Hardware	132

9 Literaturverzeichnis	133
-------------------------------	------------

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Die Bestimmung von akustischen Materialparametern ist für den Einsatz von Materialien zur Schalldämmung oder Schallabsorption sehr wichtig. Sie werden gebraucht, um gewünschte Anforderungen, die an ein Material gestellt werden, zu spezifizieren. Neben den Parametern, die eine Aussage über den reflektierten und absorbierten Schall machen, sind auch jene interessant, die das Schallfeld hinter dem Absorber charakterisieren, und damit Auskunft über den Transmissionsfaktor bzw. die Durchgangsdämpfung des Absorbers liefern.

1.2 Aufgabenstellung

Ziel dieser Arbeit ist es, aufbauend auf der Diplomarbeit von Rudolf Brunnader¹, das bestehende 2-Mikrofon-Impedanzrohr auf vier Mikrofone zu erweitern, womit die Kettenmatrixparameter akustischer Absorbermaterialien bestimmt werden können. Mit diesen lassen sich weitere akustische Materialparameter ermitteln.

Dazu ist der vorhandene Messaufbau um Rohrstücke, weitere Mikrofonhalterungen und einen zusätzlichen Lautsprecher zu erweitern.

Den zentralen Punkt der Arbeit stellt die Entwicklung der Software, insbesondere der Benutzeroberfläche (GUI) dar. Der Funktionsumfang der alten Software soll erhalten bleiben, jedoch um folgende Punkte erweitert werden:

- Verarbeitung von vier Mikrofonsignalen für die 4-Mikrofonmethode und Bestimmen der Kettenmatrix
- Berechnung und Darstellung von Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung
- neue, übersichtlichere grafische Benutzeroberfläche (GUI), die sich auf einige wenige Fenster und logische Funktionseinheiten beschränkt

¹ Rudolf Brunnader: Diplomarbeit TU-Graz 2002: *Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter*

- einfacheres Konzept für die Pfadverwaltung und Datenspeicherung
- Mittelungsmöglichkeit für mehrere Messungen
- komfortablere Auswahlmöglichkeit zur Parameterberechnung- und Darstellung
- automatische Überprüfung der Mikrofonpositionen
- Möglichkeit zur Überblendung zweier Kurven
- Reporterstellung in .html

1.3 Durchführung der Arbeit

Am Anfang stand die Einarbeitung in die Literatur zum 2-Mikrofonmesssystem, wie auch der 4-Mikrofonmethode, und die Erstellung eines neuen, einfacheren und übersichtlicheren Benutzeroberflächen (GUI) Konzeptes, welches beide Ansätze vereint und sich auf einige wenige Fenster beschränkt. Die Programmierung in MATLAB® und Erweiterung der Hardware stellte den Hauptteil der Arbeit dar. Anschließende Beispielmessungen evaluierten das Messsystem.

1.4 Gliederung der Arbeit

In Kapitel 2 werden die Grundlagen und der theoretische Hintergrund der Übertragungsfunktionsmethode einerseits, und der Kettenmatrixmethode andererseits, erläutert, sowie die Definitionen der zu messenden Materialparameter vermittelt.

Darauf aufbauend wird in Kapitel 3 beschrieben, wie die Theorie für die praktische Umsetzung adaptiert wurde. Neben der Wahl der Messmethode, dem Messbereich und der Messbereichserweiterung, stellt das Kalibrieren des Messsystems einen zentralen Punkt dieses Kapitels dar.

In Kapitel 4 wird die Entwicklung der nötigen Hardware, also der Messanordnung, beschrieben, gefolgt von der Beschreibung der Softwareentwicklung und des GUI-Entwurfs in Kapitel 5.

In Kapitel 6 folgt die Beschreibung der Software, die als Benutzerhandbuch verstanden werden will.

Kapitel 7 präsentiert einige ausgewählte Beispielmessungen, die die Funktionalität der Software veranschaulichen sollen.

Im anschließenden Kapitel 8 wird die Arbeit zusammengefasst, und ein Ausblick gegeben, der mögliche Erweiterungen der Hard- und Software aufzeigt.

Im abschließenden Kapitel 9 werden die Papers, Normen, und Skripten, deren Inhalte Anregungen zur Entstehung der hier vorliegenden Arbeit geliefert haben, in achronologischer Reihenfolge aufgelistet.

2 Grundlagen und Theorie

Für das folgende Kapitel dient das Vorlesungsskript „Raumakustische Messtechnik“¹ von Dr. Werner Weselak als Grundlage. Es werden die Übertragungsfunktionsmethode, sowie die Kettenmatrixmethode erläutert, sowie die einzelnen akustischen Parameter definiert und hergeleitet.

2.1 Messungen in Messrohren

Ausgangspunkt ist der allgemeine Lösungsansatz für die Wellengleichung der ebenen Welle bei verlustfreier Schallausbreitung (harmonische Erregung):

$$\underline{p}(x,t) = \underline{p}_i(x,t) + \underline{p}_r(x,t) = \left(\hat{p}_i \cdot e^{-jkx} + \hat{p}_r \cdot e^{jkx} \right) \cdot e^{j\omega t}$$

Dieser Ansatz wird nun um die *Dämpfung der Schallwellen* (z.B. an der Rohrwand des Messrohres oder aber auch in einem porösen Absorber als Testmaterial) erweitert:

$$jk \rightarrow \underline{\Gamma} = \mu + jk$$

$\underline{\Gamma}$ komplexe Ausbreitungskonstante

μ Dämpfungsmaß, Dämpfungskoeffizient, Dissipationskoeffizient

Der allgemeine Lösungsansatz für die Wellengleichung der ebenen Welle bei harmonischer Erregung lautet daher für *verlustbehaftete Schallausbreitung*:

$$\underline{p}(x,t) = \underline{p}_i(x,t) + \underline{p}_r(x,t) = \left(\hat{p}_i \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x} + \hat{p}_r \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x} \right) \cdot e^{j\omega t}$$

Dieser Ansatz berücksichtigt eine hinlaufende (*incident*) und eine rücklaufende (*reflected*) Welle einschließlich der durch innere Reibung und Wärmeleitung auftretenden Dämpfung. Wird die Wellenausbreitung z.B. in einem leeren Rohr betrachtet, so treten solche Verluste an der Rohrwand auf, wird die Wellenausbreitung in einem mit homogenem Absorber gefüllten Rohr betrachtet, so handelt es sich um jene Verluste *im* Absorber. Das Frequenzspektrum des Schalldruckes erhält man durch Fourier-Transformation:

¹ Vgl. Dr. Werner Weselak : *Raumakustische Messtechnik, Kap. 2: Messungen in Messrohren*, Skriptum SS2007

$$F\{\underline{p}(x,t)\} = \underline{p}(x,f) = \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x} + \underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x}$$

Zur Schreibvereinfachung wird ab hier die Frequenzvariable f in der Klammer weggelassen, es handelt sich aber weiterhin um Frequenzspektren. Für Schalldruck und Schallschnelle gilt also:

$$\underline{p}(x) = \underline{p}_i(x) + \underline{p}_r(x) = \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x} + \underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x} \quad (2.1)$$

$$\underline{v}(x) = \underline{v}_i(x) + \underline{v}_r(x) = \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot [\underline{p}_i(x) - \underline{p}_r(x)] = \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot [\underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x} - \underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x}] \quad (2.2)$$

\underline{Z}_K Schallkennimpedanz (entspricht z.B. bei Luft dem Schallkennwiderstand Z_0 , bei einem Absorber der Absorberimpedanz \underline{Z}_A)

Zur Messung bzw. Berechnung der akustischen Parameter (siehe Kap. 2.4) werden die Trennungsmethode (Kap.2.2), die mit ihr eng verwandte Übertragungsfunktionsmethode (Kap. 2.2) und die Kettenmatrixmethode (Kap. 2.3) angewandt. Alle drei Methoden bedienen sich direkt der primären Schallfeldgrößen Druck [Gl.(2.1)] und Schnelle [Gl.(2.2)].

2.2 Trennungsmethode / Übertragungsfunktionsmethode

Das Prinzip der Trennungsmethode beruht auf der Zerlegung des (messbaren) Gesamtschalldruckes in die Anteile der hin- und rücklaufenden Wellen. Aus diesen können in Folge alle interessierenden akustischen Parameter verschiedenster akustischer Zweitore bestimmt werden (Kap. 2.4).

Um den Gesamtschalldruck $\underline{p}(x)$ in Gl.(2.1), der ja unabhängig von den Randbedingungen immer direkt messbar ist, rechnerisch in den Anteil der hin- und rücklaufenden Wellen $\underline{\hat{p}}_i$ und $\underline{\hat{p}}_r$ zu zerlegen (1 Gl. in 2 Unbek.), muss dieser an *zwei* Stellen des ebenen Schallfeldes gemessen werden (2 Gln. in 2 Unbek.):

$$\underline{p}_1 = \underline{p}(x_1) = \underline{p}_i(x_1) + \underline{p}_r(x_1) = \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x_1} + \underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x_1} \quad (2.3)$$

$$\underline{p}_2 = \underline{p}(x_2) = \underline{p}_i(x_2) + \underline{p}_r(x_2) = \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x_2} + \underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x_2} \quad (2.4)$$

$$s = x_2 - x_1 \text{ Mikrofonabstand} \quad (2.5)$$

Die nun folgende Formulierung basiert auf der direkten Lösung des Gleichungssystems (2.3) und (2.4) nach den Unbekannten $\underline{\hat{p}}_i$ und $\underline{\hat{p}}_r$. Aus Gl.(2.3) folgt:

$$\underline{\hat{p}}_r \cdot e^{\Gamma \cdot x_1} = \underline{p}_1 - \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-\Gamma \cdot x_1} \quad \underline{\hat{p}}_r = \underline{p}_1 \cdot e^{-\Gamma \cdot x_1} - \underline{\hat{p}}_i \cdot e^{-2\Gamma \cdot x_1} \quad (2.6)$$

Eingesetzt in Gl.(2.4):

$$\begin{aligned} \underline{p}_2 &= \hat{\underline{p}}_i \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_2} + \underline{p}_1 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_2 - x_1)} - \hat{\underline{p}}_i \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_2 - x_1)} \\ \hat{\underline{p}}_i \cdot \left[e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_2} - e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_2 - x_1)} \right] &= \underline{p}_2 - \underline{p}_1 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_2 - x_1)} \\ \hat{\underline{p}}_i &= \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x_2}}{e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)} - e^{-\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Mit Gl.(2.5) folgt:

$$\hat{\underline{p}}_i = \frac{\underline{p}_1 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x_1}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s)} = \underline{p}_1 \cdot \frac{e^{\underline{\Gamma} \cdot x_2} - \underline{H}_{12} \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot x_1}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s)} \quad (2.8)$$

Gl. (2.7) eingesetzt in Gl.(2.6):

$$\hat{\underline{p}}_r = \underline{p}_1 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} - \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)}}{e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)} - e^{-\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)}} = \frac{\underline{p}_1 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} \cdot e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)} - \underline{p}_2 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1}}{e^{\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)} - e^{-\underline{\Gamma} \cdot (x_1 - x_2)}}$$

Mit Gl.(2.5) folgt:

$$\hat{\underline{p}}_r = \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_2}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s)} = \underline{p}_1 \cdot \frac{\underline{H}_{12} \cdot e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_1} - e^{-\underline{\Gamma} \cdot x_2}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s)} \quad (2.9)$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\hat{\underline{p}}_i = j \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{jkx_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{jkx_2}}{2 \cdot \sin(k \cdot s)} = j \underline{p}_1 \cdot \frac{\underline{H}_{12} \cdot e^{jkx_1} - e^{jkx_2}}{2 \cdot \sin(k \cdot s)} \quad (2.10)$$

$$\hat{\underline{p}}_r = j \frac{\underline{p}_1 \cdot e^{-jkx_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{-jkx_1}}{2 \cdot \sin(k \cdot s)} = j \underline{p}_1 \cdot \frac{e^{-jkx_2} - \underline{H}_{12} \cdot e^{-jkx_1}}{2 \cdot \sin(k \cdot s)} \quad (2.11)$$

Mit Hilfe dieser 4 Ergebnisse können nun die interessierenden akustischen Parameter entweder für den allgemeinen Fall [Gln.(2.8) und (2.9)] oder für den verlustlosen Fall [Gln.(2.10) und (2.11)] berechnet werden (siehe Kap. 2.4).

2.3 Kettenmatrixmethode

Bei dieser Methode handelt es sich prinzipiell um die wiederholte Anwendung der Trennungsmethode (Kap. 2.2) an *beiden* Toren eines akustischen Zweitors. Durch diese Erweiterung der Trennungsmethode können zusätzlich auch die *Kettenmatrixparameter* bestimmt werden. Aus diesen können wiederum in Folge alle interessierenden akustischen Parameter verschiedenster akustischer Zweitore bestimmt werden.

Sind die Kettenmatrixparameter verschiedener Absorber bekannt, können diese in verschiedenen Kombinationen berechnet werden. Eine serielle Kombination entspricht einem geschichteten Absorber. Eine parallele Kombination der Kettenmatrixparameter würde einer Kombination mehrerer Absorber entsprechen, die nebeneinander angeordnet sind.

2.3.1 Kettenmatrix

Die mathematische Beschreibung des Verhaltens akustischer Zweitore ist im linearen Fall durch Zweitormatrizen möglich. In Abb. 2-1 ist z.B. eine Serienschaltung aus 5 akustischen Zweitoren, nämlich Messstrecke upstream (\underline{T}_{mu}), Verbindungsrohr upstream (\underline{T}_u), Messobjekt (\underline{T}), Verbindungsrohr downstream (\underline{T}_d) und Messstrecke downstream (\underline{T}_{md}) zu sehen:

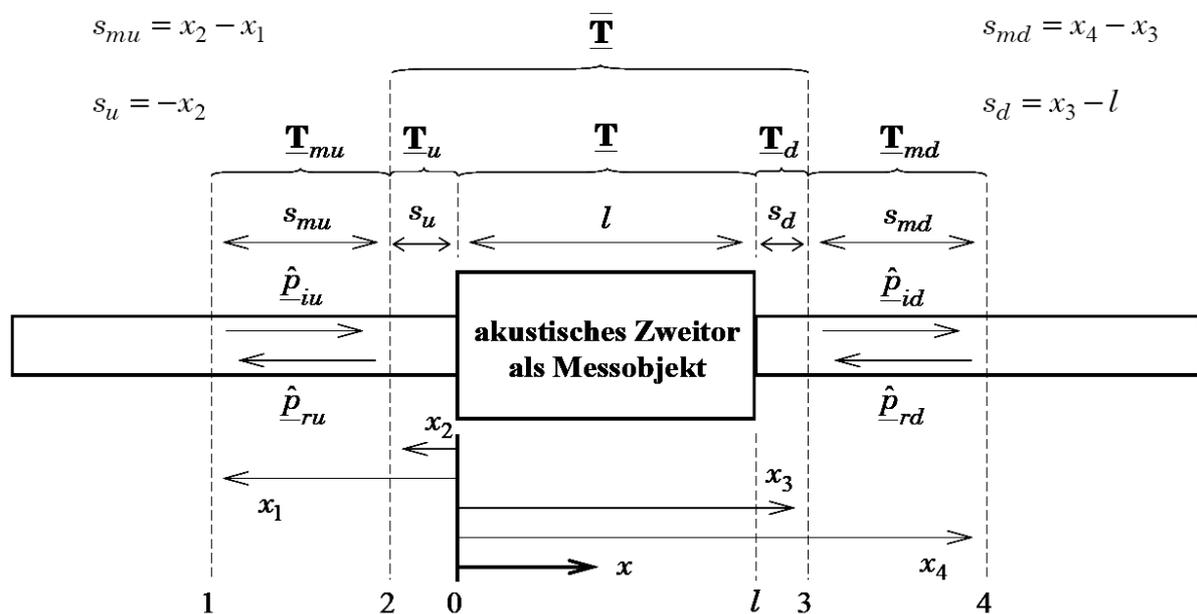


Abb. 2-1: Kettenmatrixmethode

- $\underline{T}_{mu}, \underline{T}_{md}$ Kettenmatrizen der Messstrecken 1-2 (Mikrofone upstream) und 3-4 (Mikrofone downstream) [bekannt, siehe Kap. 2.3.2]
- $\underline{T}_u, \underline{T}_d$ Kettenmatrizen der Verbindungsrohre 2-0 (upstream) und l-3 (downstream) [bekannt, siehe Kap. 2.3.2]

$$\bar{\mathbf{T}} = \underline{\mathbf{T}}_u \cdot \mathbf{T} \cdot \underline{\mathbf{T}}_d \quad \Rightarrow \quad \boxed{\mathbf{T} = \underline{\mathbf{T}}_u^{-1} \cdot \bar{\mathbf{T}} \cdot \underline{\mathbf{T}}_d^{-1}}$$

Wählen wir nun den Schalldruck und die Schallschnelle der Welle als Torgrößen, so lautet z.B. der Zusammenhang zwischen dem Eingangs- und Ausgangstor des Messobjektes (im Frequenzbereich):

$$\boxed{\begin{bmatrix} \underline{p}_0 \\ \underline{v}_0 \end{bmatrix} = \mathbf{T} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_l \\ \underline{v}_l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{T}_{11} & \underline{T}_{12} \\ \underline{T}_{21} & \underline{T}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_l \\ \underline{v}_l \end{bmatrix}} \quad (2.12)$$

$$\begin{bmatrix} \underline{p}_n \\ \underline{v}_n \end{bmatrix} \dots\dots\dots \text{akustische Zustandsvektoren}$$

\mathbf{T} (Druck/Schnelle-) Kettenmatrix (Kettenzählpfeilsystem, Torzahlsymmetrie)

$\underline{\mathbf{T}}$ stellt die Kettenmatrix des Messobjektes, welches sich zwischen der Stelle 0 und l befindet. Nimmt man zum Messobjekt noch die Anschlussrohre davor und dahinter hinzu so lautet die Kettenmatrix $\bar{\mathbf{T}}$:

$$\boxed{\begin{bmatrix} \underline{p}_2 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} = \bar{\mathbf{T}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{v}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{\underline{T}}_{11} & \bar{\underline{T}}_{12} \\ \bar{\underline{T}}_{21} & \bar{\underline{T}}_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{v}_3 \end{bmatrix}} \quad (2.13)$$

Aus der Messung stehen zunächst allerdings nur die Schalldrücke \underline{p}_1 bis \underline{p}_4 zur Verfügung. Da jedoch für die Messstrecken 1-2 und 3-4 die Kettenmatrizen bekannt sind (siehe Kap. 2.3.2), können mit ihrer Hilfe die noch unbekannt Schallschnellen \underline{v}_2 und \underline{v}_3 in Gl.(2.13) berechnet werden. Dazu wandeln wir die Kettenmatrizen in Admittanzmatrizen für Kettenzählpfeilsystem um:

Messstrecke 1-2 (upstream):

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

$$\underline{p}_1 = \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{p}_2 + \underline{T}_{12mu} \cdot \underline{v}_2 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\underline{v}_2 = \frac{1}{\underline{T}_{12mu}} \cdot (\underline{p}_1 - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{p}_2)} \quad (2.14)$$

$$\underline{v}_1 = \underline{T}_{21mu} \cdot \underline{p}_2 + \underline{T}_{22mu} \cdot \underline{v}_2 \quad \Rightarrow$$

$$\begin{aligned} \underline{v}_1 &= \underline{T}_{21mu} \cdot \underline{p}_2 + \frac{\underline{T}_{22mu}}{\underline{T}_{12mu}} \cdot (\underline{p}_1 - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{p}_2) = \frac{\underline{T}_{22mu}}{\underline{T}_{12mu}} \cdot \underline{p}_1 + \left(\underline{T}_{21mu} - \frac{\underline{T}_{11mu} \cdot \underline{T}_{22mu}}{\underline{T}_{12mu}} \right) \cdot \underline{p}_2 = \\ &= \frac{\underline{T}_{22mu}}{\underline{T}_{12mu}} \cdot \underline{p}_1 + \frac{1}{\underline{T}_{12mu}} \cdot (\underline{T}_{12mu} \cdot \underline{T}_{21mu} - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{T}_{22mu}) \cdot \underline{p}_2 = \frac{1}{\underline{T}_{12mu}} \cdot (\underline{T}_{22mu} \cdot \underline{p}_1 - \underline{A}_{mu} \cdot \underline{p}_2) \end{aligned}$$

$\underline{\Delta}_{mu} = \det \underline{\mathbf{T}}_{mu}$ Determinante der Kettenmatrix $\underline{\mathbf{T}}_{mu}$ der Messstrecke upstream

Messstrecke 3-4 (downstream, analog):

$$\begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{v}_3 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{T}}_{md} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_4 \\ \underline{v}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{T}_{11md} & \underline{T}_{12md} \\ \underline{T}_{21md} & \underline{T}_{22md} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_4 \\ \underline{v}_4 \end{bmatrix}$$

$$\boxed{\underline{v}_3 = \frac{1}{\underline{T}_{12md}} \cdot (\underline{T}_{22md} \cdot \underline{p}_3 - \underline{\Delta}_{md} \cdot \underline{p}_4)} \quad \underline{v}_4 = \frac{1}{\underline{T}_{12md}} \cdot (\underline{p}_3 - \underline{T}_{11md} \cdot \underline{p}_4) \quad (2.15)$$

$\underline{\Delta}_{md} = \det \underline{\mathbf{T}}_{md}$ Determinante der Kettenmatrix $\underline{\mathbf{T}}_{md}$ der Messstrecke downstream

Nur der Vollständigkeit halber seien hier die Admittanzmatrizen der beiden Messstrecken angegeben:

$$\begin{bmatrix} \underline{v}_1 \\ \underline{v}_2 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Y}}_{mu} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_1 \\ \underline{p}_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{T}_{12mu}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{T}_{22mu} & -\underline{\Delta}_{mu} \\ 1 & -\underline{T}_{11mu} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_1 \\ \underline{p}_2 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \underline{v}_3 \\ \underline{v}_4 \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{Y}}_{md} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{p}_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{\underline{T}_{12md}} \cdot \begin{bmatrix} \underline{T}_{22md} & -\underline{\Delta}_{md} \\ 1 & -\underline{T}_{11md} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_3 \\ \underline{p}_4 \end{bmatrix}$$

Die Gln.(2.13) bis (2.15) bilden nun jene 4 Gleichungen (allerdings in 6 Unbek.!), die zur Berechnung der 4 unbekannt Kettenmatrixparameter \underline{T}_{11} , \underline{T}_{12} , \underline{T}_{21} und \underline{T}_{22} benötigt werden. Die Bestimmung dieser Parameter wird in Kapitel 2.3.3 durchgeführt. Durch Einsetzen der Schallschnellen \underline{v}_2 [Gl.(2.14)] und \underline{v}_3 [Gl.(2.15)] in Gl.(2.13) wird ersichtlich, dass die beiden Zustandsvektoren lediglich die 4 gemessenen Schalldrücke \underline{p}_1 bis \underline{p}_4 und die bekannten Kettenmatrixparameter der beiden Messstrecken (siehe Kap. 2.3.2) beinhalten.

Es werden also noch die Kettenmatrizen der beiden Messstrecken und Verbindungsrohre benötigt, in Kap. 2.3.3 wird weiters die Kettenmatrix eines homogenen Absorbers verwendet. Diese Komponenten stellen homogene Zweitore dar, deren Kettenmatrix allgemein im folgenden Kapitel hergeleitet wird.

2.3.2 Kettenmatrix eines verlustbehafteten homogenen Zweitores

Homogen bedeutet hier u. a., dass es innerhalb des Zweitores keine Querschnittsprünge ($\bar{v} = \text{konst.}$) gibt. Z.B. kann ein mit Luft ($\underline{Z}_K = \underline{Z}_0$) oder homogenem Absorber ($\underline{Z}_K = \underline{Z}_A$) gefülltes Rohr als ein solches verlustbehaftetes homogenes Zweitor betrachtet werden.

Aus den Gln.(2.1) und (2.2) folgt an der Stelle $x = 0$:

$$\begin{aligned} \underline{p}_0 &= \hat{\underline{p}}_i + \hat{\underline{p}}_r & \hat{\underline{p}}_i &= \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 + \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \\ \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0 &= \hat{\underline{p}}_i - \hat{\underline{p}}_r & \hat{\underline{p}}_r &= \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 - \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \end{aligned}$$

Die beiden Wellenspektren $\hat{\underline{p}}_i$ und $\hat{\underline{p}}_r$ werden wieder in Gl.(2.1) eingesetzt:

$$\begin{aligned} \underline{p}(x) &= \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 + \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \cdot e^{-\Gamma \cdot x} + \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 - \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \cdot e^{\Gamma \cdot x} = \frac{1}{2} \cdot (e^{-\Gamma \cdot x} + e^{\Gamma \cdot x}) \cdot \underline{p}_0 + \underline{Z}_K \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{-\Gamma \cdot x} - e^{\Gamma \cdot x}) \cdot \underline{v}_0 = \\ &= \cosh(\Gamma \cdot x) \cdot \underline{p}_0 - \underline{Z}_K \cdot \sinh(\Gamma \cdot x) \cdot \underline{v}_0 \end{aligned}$$

Und in Gl.(2.2) eingesetzt:

$$\begin{aligned} \underline{v}(x) &= \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 + \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \cdot e^{-\Gamma \cdot x} - \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \frac{1}{2} \cdot (\underline{p}_0 - \underline{Z}_K \cdot \underline{v}_0) \cdot e^{\Gamma \cdot x} = \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \frac{1}{2} \cdot (e^{-\Gamma \cdot x} - e^{\Gamma \cdot x}) \cdot \underline{p}_0 + \frac{1}{2} \cdot (e^{-\Gamma \cdot x} + e^{\Gamma \cdot x}) \cdot \underline{v}_0 = \\ &= -\frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \sinh(\Gamma \cdot x) \cdot \underline{p}_0 + \cosh(\Gamma \cdot x) \cdot \underline{v}_0 \end{aligned}$$

Die letzten beiden Ergebnisse zusammengefasst in Matrixschreibweise:

$$\begin{bmatrix} \underline{p}(x) \\ \underline{v}(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma \cdot x) & -\underline{Z}_K \cdot \sinh(\Gamma \cdot x) \\ -\frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \sinh(\Gamma \cdot x) & \cosh(\Gamma \cdot x) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_0 \\ \underline{v}_0 \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

An der Stelle $x = l$ (Länge des Zweitores, siehe Abb. 2-1) gilt somit:

$$\begin{bmatrix} \underline{p}_l \\ \underline{v}_l \end{bmatrix} = \underline{\mathbf{T}}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_0 \\ \underline{v}_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma \cdot l) & -\underline{Z}_K \cdot \sinh(\Gamma \cdot l) \\ -\frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \sinh(\Gamma \cdot l) & \cosh(\Gamma \cdot l) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \underline{p}_0 \\ \underline{v}_0 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \cosh(\Gamma \cdot l) & \underline{Z}_K \cdot \sinh(\Gamma \cdot l) \\ \frac{1}{\underline{Z}_K} \cdot \sinh(\Gamma \cdot l) & \cosh(\Gamma \cdot l) \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{\mathbf{T}} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot l) & jZ_0 \cdot \sin(k \cdot l) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot l) & \cos(k \cdot l) \end{bmatrix}$$

Nachdem nun auch die Kettenmatrizen für die (homogenen) Messstrecken, die (homogenen) Verbindungsrohre und für den homogenen Absorber bekannt sind, können im folgenden Kapitel, in Anknüpfung an Kap. 2.3.1, die Kettenmatrixparameter eines *beliebigen (inhomogenen)* Zweitores (Messobjekt) bestimmt werden.

2.3.3 Bestimmung der Kettenmatrixparameter eines verlustbehafteten inhomogenen Zweitores

Betrachtet man nun die akustischen Zustandsvektoren als durch Messung bekannt, so liegen für die vier unbekannt Matrixparameter zunächst nur zwei Gleichungen vor [siehe Gl.(2.13)]. Eine Berechnung ist daher nur dann möglich, wenn sich zwei weitere Gleichungen finden lassen. Diese können bei einem *allgemeinen Zweitor* mittels der Daten aus einer *zweiten Messung* gebildet werden, bei der am Messsystem eine definierte Änderung vorgenommen wird. Im Allgemeinen werden dafür die Zwei-Lasten-Methode (Two Load Method), die Messobjektumkehrung (DUT-Reversing) oder die Zwei-Quellen-Methode (Two Source Method) verwendet.

Allgemeines Zweitor

(*Komplexstriche* und *Querstriche* werden während der Herleitung zur Schreibvereinfachung weggelassen.)

Aus Gl.(2.13) folgt für die beiden Messungen (eingestrichene Größen bezeichnen die Messung 1, zweigestrichene Größen bezeichnen die Messung 2):

$$\begin{bmatrix} p'_2 \\ v'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p'_3 \\ v'_3 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} p''_2 \\ v''_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{11} & T_{12} \\ T_{21} & T_{22} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} p''_3 \\ v''_3 \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

Durch Einsetzen der entsprechenden Ausdrücke für v'_2 , v''_2 und v'_3 , v''_3 [Gln.(2.14) und (2.15)] in Gl.(2.19) erhält man für die Kettenmatrixparameter:

$$\begin{aligned} p'_2 &= T_{11} \cdot p'_3 + T_{12} \cdot v'_3 = T_{11} \cdot p'_3 + \frac{T_{12}}{T_{12md}} \cdot (T_{22md} \cdot p'_3 - \Delta_{md} \cdot p'_4) \quad \left| \cdot \frac{1}{p'_3} \right. \\ H'_{32} &= T_{11} + \frac{T_{12}}{T_{12md}} \cdot (T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H'_{34}) \\ H''_{32} &= T_{11} + \frac{T_{12}}{T_{12md}} \cdot (T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H''_{34}) \quad | \cdot (-1) \\ \hline H'_{32} - H''_{32} &= \frac{T_{12}}{T_{12md}} \cdot \Delta_{md} \cdot (H''_{34} - H'_{34}) \\ \hline T_{12} &= \underline{\underline{T_{12md} \cdot \frac{H'_{32} - H''_{32}}{\Delta_{md} \cdot (H''_{34} - H'_{34})}}}} = \underline{\underline{T_{12md} \cdot X_1}} \end{aligned} \quad (2.20)$$

Aus Gl.(2.20) oben folgt:

$$H'_{32} = T_{11} + \underbrace{X_1 \cdot (T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H'_{34})}_{X_2} \quad \underline{\underline{T_{11} = H'_{32} - X_1 \cdot X_2}}$$

Weiters folgt mit den Gln.(2.14) und (2.15) aus Gl.(2.19):

$$v'_2 = T_{21} \cdot p'_3 + T_{22} \cdot v'_3$$

$$\frac{1}{T_{12mu}} \cdot (p'_1 - T_{11mu} \cdot p'_2) = T_{21} \cdot p'_3 + \frac{T_{22}}{T_{12md}} \cdot (T_{22md} \cdot p'_3 - \Delta_{md} \cdot p'_4) \quad \left| \cdot \frac{T_{12md}}{p'_3} \right.$$

$$\frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot (H'_{31} - T_{11mu} \cdot H'_{32}) = T_{12md} \cdot T_{21} + T_{22} \cdot (T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H'_{34})$$

$$\frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot (H''_{31} - T_{11mu} \cdot H''_{32}) = T_{12md} \cdot T_{21} + T_{22} \cdot (T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H''_{34}) \quad | \cdot (-1) \quad (2.21)$$

$$\frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot [H'_{31} - H''_{31} - T_{11mu} \cdot (H'_{32} - H''_{32})] = T_{22} \cdot \Delta_{md} \cdot (H''_{34} - H'_{34})$$

$$T_{22} = \frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot \left[\frac{H'_{31} - H''_{31}}{\Delta_{md} \cdot (H''_{34} - H'_{34})} - T_{11mu} \cdot \frac{H'_{32} - H''_{32}}{\Delta_{md} \cdot (H''_{34} - H'_{34})} \right] = \frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot (X_3 - T_{11mu} \cdot X_1)$$

Aus Gl.(2.21) oben folgt:

$$\frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot \underbrace{(H'_{31} - T_{11mu} \cdot H'_{32})}_{X_4} = T_{12md} \cdot T_{21} + \frac{T_{12md}}{T_{12mu}} \cdot \underbrace{(T_{22md} - \Delta_{md} \cdot H'_{34})}_{X_2} \cdot (X_3 - T_{11mu} \cdot X_1)$$

$$T_{21} = \frac{1}{T_{12mu}} \cdot [X_4 - X_2 \cdot (X_3 - T_{11mu} \cdot X_1)]$$

Die Kettenmatrix eines allgemeinen Zweitores (bestimmt durch zwei Messungen) lautet also:

$$\bar{\underline{T}} = \begin{bmatrix} \underline{H}'_{32} - \underline{X}_1 \cdot \underline{X}_2 & \underline{T}_{12md} \cdot \underline{X}_1 \\ \frac{1}{\underline{T}_{12mu}} \cdot [\underline{X}_4 - \underline{X}_2 \cdot (\underline{X}_3 - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{X}_1)] & \frac{\underline{T}_{12md}}{\underline{T}_{12mu}} \cdot (\underline{X}_3 - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{X}_1) \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

$$\underline{T} = \underline{T}_u^{-1} \cdot \bar{\underline{T}} \cdot \underline{T}_d^{-1} \quad (2.23)$$

$$\underline{X}_1 = \frac{\underline{H}'_{32} - \underline{H}''_{32}}{\Delta_{md} \cdot (\underline{H}''_{34} - \underline{H}'_{34})}$$

$$\underline{X}_2 = \underline{T}_{22md} - \Delta_{md} \cdot \underline{H}'_{34}$$

$$\underline{X}_3 = \frac{\underline{H}'_{31} - \underline{H}''_{31}}{\underline{\Delta}_{md} \cdot (\underline{H}''_{34} - \underline{H}'_{34})}$$

$$\underline{X}_4 = \underline{H}'_{31} - \underline{T}_{11mu} \cdot \underline{H}'_{32}$$

$$\underline{T}_{mu} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_{mu}) & jZ_0 \cdot \sin(k \cdot s_{mu}) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_{mu}) & \cos(k \cdot s_{mu}) \end{bmatrix}$$

$$\underline{T}_{md} = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_{md}) & jZ_0 \cdot \sin(k \cdot s_{md}) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_{md}) & \cos(k \cdot s_{md}) \end{bmatrix}$$

$$\underline{T}_u = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_u) & jZ_0 \cdot \sin(k \cdot s_u) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_u) & \cos(k \cdot s_u) \end{bmatrix}$$

$$\underline{T}_d = \begin{bmatrix} \cos(k \cdot s_d) & jZ_0 \cdot \sin(k \cdot s_d) \\ \frac{j}{Z_0} \cdot \sin(k \cdot s_d) & \cos(k \cdot s_d) \end{bmatrix}$$

Die Kettenmatrixparameter in Gl.(2.22) bzw. Gl.(2.23) beinhalten also die 4 gemessenen Schalldrücke \underline{p}_1 bis \underline{p}_4 zweier Messungen, die Geometriedaten der Messstellen, sowie die Temperatur des Fluids.

2.4 Berechnung akustischer Parameter

Folgende akustische Parameter werden in diesem Kapitel in Abhängigkeit von Gesamtschalldruckspektren (*Trennungsmethode*), Übertragungsfunktionen und Kettenmatrixparametern (*Kettenmatrixmethode*) dargestellt: Reflexionsfaktor und Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall, Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung (Transmission Loss, TL), Wandimpedanz. Alle Parameter werden sowohl für den allgemeinen Fall, als auch für den Spezialfall der Verlustlosigkeit abgeleitet.

2.4.1 Reflexionsfaktor, Reflexionsgrad und Schallabsorptionsgrad für senkrechten Schalleinfall

Trennungsmethode / Übertragungsfunktionsmethode

Aus Gl.(2.1), Gl.(2.8) und Gl.(2.9) folgt:

$$\underline{r}(0) = \frac{\underline{p}_r(0)}{\underline{p}_i(0)} = \frac{\hat{\underline{p}}_r}{\hat{\underline{p}}_i} = \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{-\Gamma \cdot x_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{-\Gamma \cdot x_2}}{\underline{p}_1 \cdot e^{\Gamma \cdot x_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{\Gamma \cdot x_1}} \quad \alpha(0) = 1 - |\underline{r}(0)|^2 \quad (2.24)$$

$$\underline{r}(0) = \frac{\underline{H}_{12} \cdot e^{-\Gamma \cdot x_1} - e^{-\Gamma \cdot x_2}}{e^{\Gamma \cdot x_2} - \underline{H}_{12} \cdot e^{\Gamma \cdot x_1}} = \frac{\underline{H}_{12} - e^{\Gamma \cdot (x_1 - x_2)}}{e^{-\Gamma \cdot (x_1 - x_2)} - \underline{H}_{12}} \cdot e^{-2\Gamma \cdot x_1}$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{r}(0) = \frac{\underline{p}_2 \cdot e^{-jkx_1} - \underline{p}_1 \cdot e^{-jkx_2}}{\underline{p}_1 \cdot e^{jkx_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{jkx_1}} \quad \underline{r}(0) = \frac{\underline{H}_{12} - e^{jk \cdot (x_1 - x_2)}}{e^{-jk \cdot (x_1 - x_2)} - \underline{H}_{12}} \cdot e^{-j2kx_1} \quad (2.25)$$

Abgesehen von einigen Zusatzgrößen sind für die Berechnung von $\underline{r}(0)$ und $\alpha(0)$ die an zwei Positionen gemessenen Schalldrücke \underline{p}_1 und \underline{p}_2 bzw. die Übertragungsfunktion \underline{H}_{12} zwischen den beiden Messpunkten notwendig.

Um die Verhältnisse von absorbiertener und reflektierter Energie darzustellen ist es zweckmäßig den Reflexionsfaktor durch den Reflexionsgrad R zu ersetzen.

$$R = |\underline{r}|^2$$

Kettenmatrixmethode

Aus den Gln.(2.1) und (2.2) folgt für $x = 0$ (unmittelbar vor dem Messobjekt, siehe Abb. 2-1) zusammen mit Gl.(2.24):

$$\underline{p}_0 = \hat{\underline{p}}_{iu} + \hat{\underline{p}}_{ru} = \hat{\underline{p}}_{iu} \cdot [1 + \underline{r}(0)] \quad \underline{v}_0 = \frac{\hat{\underline{p}}_{iu}}{Z_0} \cdot [1 - \underline{r}(0)]$$

Und für $x = l$ (unmittelbar nach dem Messobjekt, siehe Abb. 2-1):

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{p}_r(l)}{\underline{p}_i(l)} = \frac{\hat{\underline{p}}_{rd}}{\hat{\underline{p}}_{id}} \cdot e^{2\Gamma \cdot l} \quad (2.26)$$

$$\underline{p}_l = \hat{\underline{p}}_{id} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 + \underline{r}(l)] \quad \underline{v}_l = \frac{\hat{\underline{p}}_{id}}{Z_0} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 - \underline{r}(l)]$$

$\hat{\underline{p}}_{id}$ und $\hat{\underline{p}}_{rd}$ folgen aus den beiden Gln.(2.8) und (2.9):

$$\hat{\underline{p}}_{id} = \underline{p}_3 \cdot \frac{e^{\Gamma \cdot x_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{\Gamma \cdot x_3}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s_{md})} \quad \hat{\underline{p}}_{rd} = \underline{p}_3 \cdot \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-\Gamma \cdot x_3} - e^{-\Gamma \cdot x_4}}{2 \cdot \sinh(\underline{\Gamma} \cdot s_{md})}$$

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-\Gamma \cdot x_3} - e^{-\Gamma \cdot x_4}}{e^{\Gamma \cdot x_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{\Gamma \cdot x_3}} \cdot e^{2\Gamma \cdot l}$$

Aus Gl.(2.12) folgt:

$$\begin{aligned} \underline{p}_0 &= \underline{T}_{11} \cdot \underline{p}_l + \underline{T}_{12} \cdot \underline{v}_l \\ \underline{v}_0 &= \underline{T}_{21} \cdot \underline{p}_l + \underline{T}_{22} \cdot \underline{v}_l \end{aligned} \quad (2.27)$$

Nun werden $\underline{p}_0, \underline{v}_0$ bzw. $\underline{p}_l, \underline{v}_l$ eingesetzt:

$$\begin{aligned} 1 + \underline{r}(0) &= \underline{T}_{11} \cdot \frac{\hat{\underline{p}}_{id}}{\hat{\underline{p}}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 + \underline{r}(l)] + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} \cdot \frac{\hat{\underline{p}}_{id}}{\hat{\underline{p}}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 - \underline{r}(l)] \\ 1 - \underline{r}(0) &= \underline{T}_{21} \cdot Z_0 \cdot \frac{\hat{\underline{p}}_{id}}{\hat{\underline{p}}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 + \underline{r}(l)] + \underline{T}_{22} \cdot \frac{\hat{\underline{p}}_{id}}{\hat{\underline{p}}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot [1 - \underline{r}(l)] \end{aligned} \quad (2.28)$$

Die Summe dieser beiden Gleichungen ergibt:

$$2 = \frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot \left(\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right) + \underline{r}(l) \cdot \frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right) = \quad (2.29)$$

$$= \frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot \left[\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right) \right]$$

$$\frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} = \frac{2 \cdot e^{\Gamma \cdot l}}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)} \quad (2.30)$$

Aus Gl.(2.28) oben folgt:

$$\underline{r}(0) = \frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} \cdot e^{-\Gamma \cdot l} \cdot \left[\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} \right) \right] - 1$$

Gl.(2.30) eingesetzt ergibt weiter:

$$\underline{r}(0) = \frac{2 \cdot \left[\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} \right) \right]}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)} - 1$$

$$\underline{r}(0) = \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right)}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)} \quad (2.31)$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-jkx_3} - e^{-jkx_4}}{e^{jkx_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{jkx_3}} \cdot e^{j2kl}$$

Spezialfall reflexionsarmer Abschluss des Messrohres downstream

$$\hat{p}_{rd} \ll \hat{p}_{id} \quad \xrightarrow{\text{Gl.(2.28)}} \quad \underline{r}(l) \rightarrow 0 \quad \Rightarrow \quad \underline{r}(0) = \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22}}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22}}$$

Spezialfall schallharter Abschluss des Messobjektes downstream

$$\underline{r}(l) \rightarrow 1 \quad \Rightarrow \quad \boxed{\underline{r}(0) = \frac{\underline{T}_{11} - \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0}{\underline{T}_{11} + \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0}}$$

Zur Erinnerung: Durch Messung der Schalldrücke an 4 Messstellen sind die Kettenmatrixparameter bestimmbar (Kap. 2.3.3). Abgesehen von den letzten beiden Spezialfällen wird weiters noch explizit die Übertragungsfunktion \underline{H}_{34} zwischen den beiden Messpositionen downstream zur Berechnung von Reflexionsfaktor und Schallabsorptionsgrad benötigt.

2.4.2 Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung (TL)

Die Durchgangsdämpfung (Transmission Loss, TL) eines akustischen Zweitores (Messobjekt) ist definiert als die Schallleistungspegeldifferenz zwischen der hinlaufenden (incident) Welle am Eingangstor und der transmittierten Welle am Ausgangstor unter der *Voraussetzung eines reflexionsarmen Abschlusses*.

$$TL = 10 \cdot \log \left(\frac{P_i}{P_t} \right)_{\hat{p}_{rd}=0} = 10 \cdot \log \left(\frac{\hat{p}_{iu} \cdot \hat{p}_{iu}^*}{\hat{p}_{id} \cdot \hat{p}_{id}^*} \right)_{\hat{p}_{rd}=0} = 20 \cdot \log \left| \frac{\hat{p}_{iu}}{\underline{p}_3} \right| \quad (2.32)$$

Trennungsmethode / Übertragungsfunktionsmethode

Die Trennungsmethode arbeitet ja grundsätzlich mit nur 2 Messpositionen (vor dem Messobjekt; upstream). Mit einer weiteren Messposition (3. Mikrofon nach dem Messobjekt; downstream) und einem reflexionsarmen Abschluss (downstream wird die Trennung also rein akustisch durchgeführt) kann das zusätzliche Wellenspektrum \hat{p}_{id} bestimmt werden.

Durch Einsetzen von Gl.(2.8) in Gl.(2.32) ergibt sich:

$$TL = 20 \cdot \log \left| \frac{\underline{p}_1 \cdot e^{\Gamma \cdot x_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{\Gamma \cdot x_1}}{2 \cdot \underline{p}_3 \cdot \sinh(\Gamma \cdot s_{mu})} \right|$$

$$TL = 20 \cdot \log \left| \underline{H}_{31} \cdot \frac{e^{\Gamma \cdot x_2} - \underline{H}_{12} \cdot e^{\Gamma \cdot x_1}}{2 \cdot \sinh(\Gamma \cdot s_{mu})} \right|$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$TL = 20 \cdot \log \left| \frac{\underline{p}_1 \cdot e^{jkx_2} - \underline{p}_2 \cdot e^{jkx_1}}{2 \cdot \underline{p}_3 \cdot \sin(k \cdot s_{mu})} \right|$$

$$TL = 20 \cdot \log \left| \underline{H}_{31} \cdot \frac{e^{jkx_2} - \underline{H}_{12} \cdot e^{jkx_1}}{2 \cdot \sin(k \cdot s_{mu})} \right|$$

Kettenmatrixmethode

Der Quotient aus Wellenspektren in Gl.(2.30) ist physikalisch als *Transmissionsfaktor* $\underline{t}(l)$ interpretierbar (siehe Abb. 2-1):

$$\underline{t}(l) = \frac{\hat{p}_{id}}{\hat{p}_{iu}} = \frac{2 \cdot e^{\Gamma \cdot l}}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + r(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)}$$

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-\Gamma \cdot x_3} - e^{-\Gamma \cdot x_4}}{e^{\Gamma \cdot x_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{\Gamma \cdot x_3}} \cdot e^{2\Gamma \cdot l}$$

Es sei hier nochmals darauf hingewiesen, dass die Kettenmatrixmethode Messungen an 4 Positionen voraussetzt; jeweils 2 vor und 2 nach dem Messobjekt (siehe Abb. 2-1).

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{t}(l) = \frac{2 \cdot e^{jkl}}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{\underline{Z}_0} + \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{\underline{Z}_0} + \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0 - \underline{T}_{22} \right)}$$

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-jkx_3} - e^{-jkx_4}}{e^{jkx_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{jkx_3}} \cdot e^{j2kl}$$

Spezialfall reflexionsarmer Abschluss des Messrohres downstream

$$\hat{p}_{rd} \ll \hat{p}_{id}$$

Gl.(2.28)

$$\Rightarrow \underline{r}(l) \rightarrow 0 \Rightarrow$$

$$\underline{t}(l) = \frac{2 \cdot e^{jkl}}{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{\underline{Z}_0} + \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0 + \underline{T}_{22}}$$

$$TL = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{\underline{t}(l)} \right|_{\hat{p}_{rd}=0} = 20 \cdot \log \left| \frac{1}{2} \cdot \left(\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{\underline{Z}_0} + \underline{T}_{21} \cdot \underline{Z}_0 + \underline{T}_{22} \right) \right|$$

2.4.3 Wandimpedanz

Trennungsmethode / Übertragungsfunktionsmethode

Die Schallfeldimpedanz $\underline{Z}(x)$ an einer beliebigen Stelle x des Schallfeldes ist definiert durch:

$$\underline{Z}(x) = \frac{\underline{p}(x)}{\underline{v}(x)}$$

Aus den Gln.(2.1) und (2.2) folgt für die Wandimpedanz \underline{W} :

$$\underline{W} = \underline{Z}(0) = \frac{\underline{p}(0)}{\underline{v}(0)} = Z_0 \cdot \frac{\hat{p}_i + \hat{p}_r}{\hat{p}_i - \hat{p}_r} \quad (2.33)$$

Für die *normierte Wandimpedanz* \underline{w} gilt daher mit Gl.(2.8) und Gl.(2.9):

$$\underline{w} = \frac{\underline{W}}{Z_0} = \frac{\underline{p}_1 \cdot (e^{\Gamma \cdot x_2} - e^{-\Gamma \cdot x_2}) - \underline{p}_2 \cdot (e^{\Gamma \cdot x_1} - e^{-\Gamma \cdot x_1})}{\underline{p}_1 \cdot (e^{\Gamma \cdot x_2} + e^{-\Gamma \cdot x_2}) - \underline{p}_2 \cdot (e^{\Gamma \cdot x_1} + e^{-\Gamma \cdot x_1})}$$

$$\underline{w} = \frac{\underline{p}_1 \cdot \sinh(\Gamma \cdot x_2) - \underline{p}_2 \cdot \sinh(\Gamma \cdot x_1)}{\underline{p}_1 \cdot \cosh(\Gamma \cdot x_2) - \underline{p}_2 \cdot \cosh(\Gamma \cdot x_1)}$$

$$\underline{w} = \frac{\sinh(\Gamma \cdot x_2) - \underline{H}_{12} \cdot \sinh(\Gamma \cdot x_1)}{\cosh(\Gamma \cdot x_2) - \underline{H}_{12} \cdot \cosh(\Gamma \cdot x_1)}$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{w} = j \frac{\underline{p}_1 \cdot \sin(k \cdot x_2) - \underline{p}_2 \cdot \sin(k \cdot x_1)}{\underline{p}_1 \cdot \cos(k \cdot x_2) - \underline{p}_2 \cdot \cos(k \cdot x_1)}$$

$$\underline{w} = j \frac{\sin(k \cdot x_2) - \underline{H}_{12} \cdot \sin(k \cdot x_1)}{\cos(k \cdot x_2) - \underline{H}_{12} \cdot \cos(k \cdot x_1)}$$

Kettenmatrixmethode

Aus Gl.(2.33) und Gl.(2.24) folgt durch Einsetzen von Gl.(2.31):

$$\underline{w} = \frac{1 + \underline{r}(0)}{1 - \underline{r}(0)} = \frac{1 + \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right)}{1 - \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)}{1 - \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} - \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} \right)}{1 - \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)}}$$

$$\underline{w} = \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{11} - \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0} \right)}{\underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22} + \underline{r}(l) \cdot \left(\underline{T}_{21} \cdot Z_0 - \underline{T}_{22} \right)}$$

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-\Gamma \cdot x_3} - e^{-\Gamma \cdot x_4}}{e^{\Gamma \cdot x_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{\Gamma \cdot x_3}} \cdot e^{2\Gamma \cdot l}$$

Spezialfall „verlustlos“ ($\mu = 0$)

$$\underline{r}(l) = \frac{\underline{H}_{34} \cdot e^{-jkx_3} - e^{-jkx_4}}{e^{jkx_4} - \underline{H}_{34} \cdot e^{jkx_3}} \cdot e^{j2kl}$$

Spezialfall reflexionsarmer Abschluss des Messrohres downstream

$$\hat{p}_{rd} \ll \hat{p}_{id} \stackrel{\text{Gl.(2.28)}}{\Rightarrow} \underline{r}(l) \rightarrow 0 \Rightarrow \underline{w} = \frac{\underline{T}_{11} + \frac{\underline{T}_{12}}{Z_0}}{\underline{T}_{21} \cdot Z_0 + \underline{T}_{22}}$$

Spezialfall schallharter Abschluss des Messobjektes downstream

$$\underline{r}(l) \rightarrow 1 \Rightarrow \underline{w} = \frac{\underline{T}_{11}}{\underline{T}_{21} \cdot Z_0}$$

Die Interpretation der Ergebnisse der 3 Methoden verläuft analog zu Kap. 2.4.1. Auch hier sind die messtechnisch zu bestimmenden Größen bei der Trennungsmethode Gesamtschalldruckspektren, bei der Übertragungsfunktionsmethode *eine* Übertragungsfunktion und bei der Kettenmatrixmethode die Kettenmatrixelemente in Verbindung mit *einer* explizit vorkommenden Übertragungsfunktion.

3 Adaptierung der Theorie

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der praktischen Umsetzung der theoretischen Betrachtungen. Es werden Betrachtungen zur Wahl der Messmethode und des Messbereichs angestellt, sowie besonderes Augenmerk auf die Kalibrierung des Messsystems gelegt.

3.1 Wahl der Methode

Für den Funktionsumfang der Software von Rudolf Brunnader¹, der beibehalten werden sollte, wurde weiterhin die Übertragungsfunktionsmethode / Trennungsmethode gewählt. Nach diesem Prinzip werden alle Messungen, die aus der 2-mic-Methode gemessen werden, berechnet.

Für die Transmissionsparameter, die etwas über den Zustand hinter der Probe aussagen, wird jedoch die Kettenmatrixmethode gewählt. Sie bietet einige Vorteile gegenüber der Übertragungsfunktionsmethode / Trennungsmethode. Die Kettenmatrix beschreibt die Probe vollständig und der Term für $r(l)$ gibt Information über den Zustand hinter ihr. Man kann rechnerisch verschiedene Abschlüsse, wie schallhart oder reflexionsarm, simulieren.

3.2 Messbereich

In der Norm ISO 10534-2 zur Übertragungsfunktionsmethode wird auf den Messbereich eingegangen². Da sich die Messbereichsgrenzen aus Rohrdurchmesser und Mikrofonabstand ergeben, sind diese auch für die 4-mic-Methode als gültig anzusehen.

Damit ebene Wellenausbreitung gewährleistet ist, und keine Quermoden das Messergebnis verfälschen schreibt diese Norm für den Durchmesser d des Rohres vor:

$$d < \frac{0,58 \cdot c_0}{f_{\max}}$$

¹ Rudolf Brunnader: Diplomarbeit TU-Graz 2002: *Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter*

² ISO 10534-2:1998(E), Kap. 4.2

Für das eingesetzte System ergibt sich mit $d = 0,1\text{ m}$ (Durchmesser des Rohres) eine obere Grenzfrequenz f_{\max} von:

$$f_{\max}(d) < \frac{0,58 \cdot 343,3}{0,1} = 1991,14 \text{ Hz} \quad (3.1)$$

Eine zweite Bedingung für die obere Grenzfrequenz f_{\max} ist aber auch durch den Mikrofonabstand s gegeben, und berechnet sich mit einem Mikrofonabstand von $s = 0,1\text{ m}$ zu:

$$f_{\max}(s) < 0,4 \cdot \frac{c_0}{s} = 0,4 \cdot \frac{343,3}{0,1} = 1373,3 \text{ Hz} \quad (3.2)$$

Die untere Grenzfrequenz f_{\min} ist ebenfalls durch den Mikrofonabstand begründet. Dieser sollte größer sein als 5% der größten interessierenden Wellenlänge.

$$f_{\min} > 0,05 \cdot \frac{c_0}{s} = 0,05 \cdot \frac{343,3}{0,1} = 171,65 \text{ Hz}$$

Damit ergibt sich ein Messbereich von:

$$171,65 \text{ Hz} < f < 1373,3 \text{ Hz}$$

Messbereichserweiterung

Durch eine Vergrößerung des Mikrofonabstandes lässt sich der gültige Frequenzbereich nach unten verschieben. Hierfür stehen 2 weitere Mikrofonpositionen zur Verfügung, die den Mikrofonabstand auf $0,2\text{ m}$ bringen. Hierfür ergibt sich folgender Messbereich:

$$85,75 \text{ Hz} < f < 686 \text{ Hz}$$

Durch eine Kombination zweier Messungen lässt sich nun ein Messbereich von

$$85,75 \text{ Hz} < f < 1373,3 \text{ Hz}$$

erreichen.

3.3 Kalibrieren

Die Herleitungen in Kap. 2 gelten nur unter Annahme der idealen Wandlung der betrachteten physikalischen Zustandsgrößen im Rohr in gespeicherte und verwertbare Daten. Eine Annäherung an dieses Ideal wäre nur mit sehr hohem technischen Aufwand möglich. Als hinreichende Alternative werden nun die Signalwege mit messbaren und damit korrigierbaren Fehlern betrachtet. Es wird gezeigt, dass nicht die absoluten Fehler der einzelnen Signalwege bestimmt werden müssen, sondern nur die relativen Abweichungen der Signalwege zueinander. Diese relativen Abweichungen werden durch das Kalibrierverfahren bestimmt und als Kalibrierfunktion (KaFu) gespeichert. Unter Voraussetzung unveränderter Signalwege bleibt diese Kalibrierfunktion für einen längeren Zeitraum gültig. Somit können ganze Messserien mit der einmal ermittelten Kalibrierfunktion korrigiert werden.

3.3.1 Übersicht der Signalwege

Im folgenden Kapitel wird ein einfaches Modell der Signalwege vorgestellt. Darauf aufbauend wird ein praktikables Verfahren zum Kalibrieren entwickelt und mit dem in der ISO-Norm¹ als „*correction for microphone mismatch*“ und „*calibration procedure*“ beschriebenen verglichen.

Wird das in Abb. 3-1 dargestellte Messrohr von einer Seite aus gleichmäßig beschallt, so stellt sich darin nach etwa 100ms ein eingeschwungener aber ortsabhängiger Zustand des Schallwechseldruckes $\underline{p}(x, f)$ (Spektraldarstellung) ein. Diese Wandlung des Erregungssignales $\underline{u}(f)$ in einen ortsabhängigen Schalldruck $\underline{p}(x, f)$ beschreibt die örtliche Rohrübertragungsfunktion $H_R(x, f)$ im Frequenzbereich.

Die Schalldrücke $\underline{p}(x_i, f)$ an den jeweiligen Mikrofonpositionen x_i im Messrohr sind sowohl für die 2- als auch für die 4-Mikrofonmethode die messbaren Basisgrößen. Nun erfahren diese Druckgrößen bis zur Umsetzung in ein weiterverarbeitbares digitales Signal verschiedenste Veränderungen. Jedes Glied in der Signalkette, bestehend aus Mikrofon, Vorverstärker, Mischpult und A/D-Umsetzer, hat im Allgemeinen keinen linearen Frequenz- und Phasengang. Sämtliche Veränderungen der Basisgröße werden durch die Kanal-Übertragungsfunktionen H_A, H_B, H_C, H_D berücksichtigt. Es ist nun Ziel der Fehlerkorrektur den Einfluss der unterschiedlichen Kanal-Übertragungsfunktionen auf das Messergebnis zu eliminieren. Dazu ist es notwendig die an einer bestimmten Kalibrierposition x_k aufgezeichneten Signale $u_A(x_k, f) \dots u_D(x_k, f)$ untereinander in Bezug zu setzen. Das Kalibrierverfahren erfordert also ein Verändern der in Abb. 3-1 dargestellten (originalen) Mikrofonreihenfolge „ABCD“. Deshalb sind die aufgezeichneten Signale $u_A(x, f) \dots u_D(x, f)$, sowie im weiteren Ansatz sämtliche ortsabhängigen Größen, zunächst für beliebige Positionen x formuliert.

¹ ISO 10534-2:1998(E), Kap. 7.5

Da das Erregungssignal $\underline{u}(t)$ schlussendlich nicht in das Messergebnis eingeht, werden der Einfachheit halber die Lautsprecher als ideal angenommen. Als weitere Vereinfachung wird vorerst nicht zwischen erster und zweiter Messung (links-, rechtsbeschallt) unterschieden.

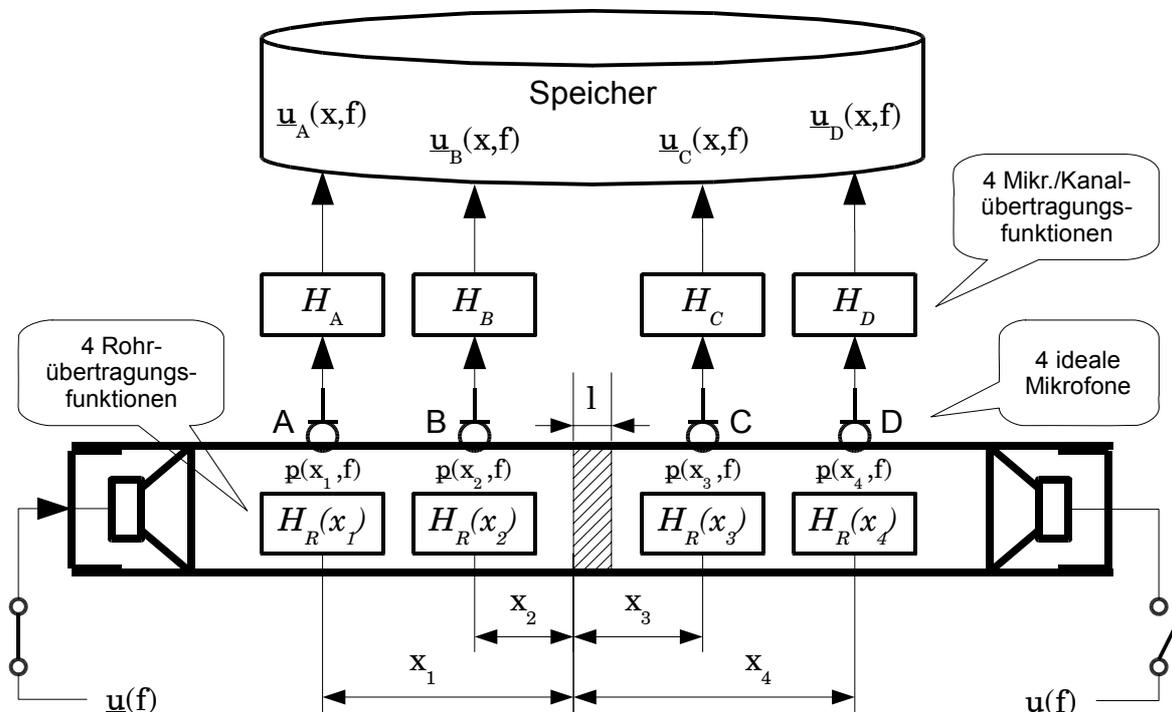


Abb. 3-1: 4-mic-Methode; Übersicht der Signalwege

Für eine beliebige Mikrofonreihenfolge (für allg. x) kann geschrieben werden:

- $\underline{u}_A(x, f) \dots \underline{u}_D(x, f)$ Frequenzspektrum der aufgez. (dig.) Signale Kanäle A...D
- $\underline{p}(x, f)$ Frequenzspektrum des Schalldruckes im Rohr
- $\underline{u}(f)$ Frequenzspektrum des (el.) Signals am aktiven Lautsprecher

Die vom Ort unabhängigen Übertragungsfunktionen der Kanäle A...D können für beliebige Positionen x angeschrieben werden zu:

$$H_A = \frac{\underline{u}_A(x, f)}{\underline{p}(x, f)} \quad H_B = \frac{\underline{u}_B(x, f)}{\underline{p}(x, f)} \quad H_C = \frac{\underline{u}_C(x, f)}{\underline{p}(x, f)} \quad H_D = \frac{\underline{u}_D(x, f)}{\underline{p}(x, f)} \quad (3.3)$$

Die örtliche Übertragungsfunktion des Messrohres an einer beliebigen Position x ist definiert:

$$H_R(x) = \frac{\underline{p}(x, f)}{\underline{u}(f)} \quad (3.4)$$

Nach Umformen von Gln. (3.3) in:

$$\begin{aligned}\underline{u}_A(x, f) &= \underline{p}(x, f) \cdot H_A & \underline{u}_B(x, f) &= \underline{p}(x, f) \cdot H_B \\ \underline{u}_C(x, f) &= \underline{p}(x, f) \cdot H_C & \underline{u}_D(x, f) &= \underline{p}(x, f) \cdot H_D\end{aligned}\quad (3.5)$$

sowie Umformen von Gl. (3.4) in:

$$\underline{p}(x, f) = \underline{u}(f) \cdot H_R(x) \quad (3.6)$$

erhält man nach dem Einsetzen von Gl. (3.6) in Gln. (3.5) die (dig.) gespeicherten Frequenzspektren der Signale von Kanal A...D, aufgenommen in einer beliebigen Position x :

$$\begin{aligned}\underline{u}_A(x, f) &= \underline{u}(f) \cdot H_R(x) \cdot H_A & \underline{u}_B(x, f) &= \underline{u}(f) \cdot H_R(x) \cdot H_B \\ \underline{u}_C(x, f) &= \underline{u}(f) \cdot H_R(x) \cdot H_C & \underline{u}_D(x, f) &= \underline{u}(f) \cdot H_R(x) \cdot H_D\end{aligned}\quad (3.7)$$

Hinweis: Es wird aus Gründen der Übersichtlichkeit in diesem Kapitel nicht zwischen einer Messung mit kurzem und einer mit weitem Mikrofonabstand unterschieden. Die Ortskoordinaten $x_1 \dots x_4$ entsprechen denen der allgemeinen Herleitung in Kapitel 2 und werden als „Positionen“ bezeichnet. Messtechnisch werden die Kanäle 1...4 in originaler Anordnung bei Messungen mit kurzem Mikrofonabstand den *Mikrofonöffnungen* 2, 3, 4, 5, hingegen bei Messungen mit weitem Mikrofonabstand den *Mikrofonöffnungen* 1, 3, 4, 6 zugeordnet.

3.3.2 Kalibrierung – 2-Mikrofonmethode

Abb. 3-2 zeigt das Prinzip der Kalibrierung. Aus den unterschiedlichen Übertragungsfunktionen H_A u. H_B zweier Mikrofone „A“ und „B“ (oder allg. auch „Kanäle“) wird die

Kalibrierfunktion $H_k = H_B/H_A$ errechnet und schließlich die
korrigierte Übertragungsfunktion $H_{Bk} = H_B/H_k$ des Mikrofons „B“ bestimmt.

Nach der Korrektur haben beide Mikrofone dieselbe (aber immer noch nichtlineare) Übertragungsfunktion:

$$H_A = H_{Bk}$$

Durch die Kalibrierfunktion wird also das Mikrofon „B“ auf die Übertragungsfunktion des Mikrofons „A“ umgerechnet. Damit haben beide Mikrofone (Kanäle) quasi identisches Übertragungsverhalten.

Ein Problem bereitet die angedeutete 0/0 Division auf deren Ursache im Abschnitt 3.3.4 eingegangen wird. Bei dieser Frequenz wird H_k unstetig, in der Folge weicht H_{Bk} von H_A bei dieser Frequenz ab.

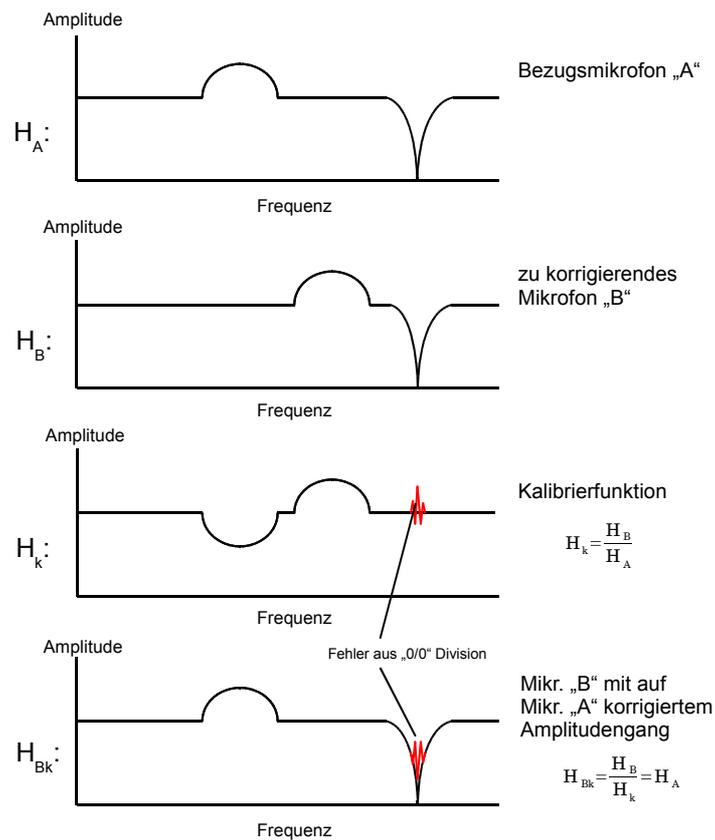


Abb. 3-2 Korrektur des Kanalfrequenzganges – prinzipiell

Bei der 2-Mikrofon-Übertragungsfunktionsmethode werden alle akustischen Materialparameter über die (korrigierte) Übertragungsfunktion H_{12} bestimmt. Gemessen wird vorerst die unkorrigierte Übertragungsfunktion H_{12o} in originaler Anordnung. Setzt man nun für die zu bestimmende H_{12} die Frequenzspektren der aufgenommenen Messsignale $\underline{u}_B(x_2, f)$ u. $\underline{u}_A(x_1, f)$ als Quotient an (Gl. (3.8)), dann sind nach o. a. Kalibrierprinzip die i. Allg. ungleichen Übertragungsfunktionen der Kanäle A, B mittels der Kalibrierfunktion H_k zu korrigieren, es gilt:

$$\begin{aligned}
 H_{12} &= \frac{p(x_2, f)}{p(x_1, f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2)}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1)} = \\
 &= \frac{\underline{u}_B(x_2, f)}{\underline{u}_A(x_1, f)} \cdot \frac{1}{H_k} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2)}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1)} \cdot \underbrace{\left(\frac{H_B}{H_A} \cdot \frac{1}{H_k} \right)}_{=1} = \\
 &= H_{12o} \cdot \frac{1}{H_k}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

H_{12} ist nur dann von H_A und H_B unabhängig wenn gilt:

$$\left(\frac{H_B}{H_A \cdot H_k} \right) = 1 \rightarrow H_k = H_B / H_A \dots\dots\dots \text{Kalibrierfunktion} \quad (3.9)$$

Nach Bestimmung der Kalibrierfunktion H_k ist in Gl.(3.8) H_{12} nur noch von den Übertragungsfunktionen des Messrohres $H_R(x_i)$ abhängig. Für die Kalibrierfunktion die Übertragungsfunktionen H_A und H_B einzeln zu bestimmen wäre messtechnisch zu aufwändig. Es genügt der Quotient H_B/H_A , da die Mikrofonsignale bei der Übertragungsfunktionsmethode immer als Quotient in die Berechnung eingehen. Die praktische Bestimmung dieses Quotienten führt zu zwei möglichen Kalibrierverfahren, die in den folgenden Kapiteln beschrieben werden.

3.3.2.1 2-mic-Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU-Kal.)

Messtechnisch lässt sich der Quotient H_B/H_A durch gleichzeitiges Aufnehmen der Mikrofonsignale \underline{u}_A , \underline{u}_B an einem beliebigen gleichen Umfang des Messrohres bestimmen (siehe Abb. 3-3 / GU-Kal.). Am Messrohr sind daher zwei Kalibrier-Mikrofonöffnungen an derselben Ortskoordinate x_k vorzusehen. Aus Gl.(3.7) folgt:

$$H_k = \frac{\underline{u}_B(x_k, f)}{\underline{u}_A(x_k, f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x_k) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x_k) \cdot H_A} = \frac{H_B}{H_A} \quad (3.10)$$

Wie gefordert ist die Kalibrierfunktion weder vom Erregungssignal noch von der Rohrübertragungsfunktion abhängig. Praktisch lässt sich diese Kalibriermethode durch eine zusätzliche Mikrofonöffnung an der Stelle $x_k = x_1$ oder $x_k = x_2$, bzw. mittels eines austauschbaren Kalibrierringes mit zwei radialen Öffnungen an derselben Stelle x_k realisieren. Auch ein schallharter Rohrabschluss mit einer Kalibrierplatte an der Stelle $x_k = 0$ mit zwei axialen Öffnungen wäre vorstellbar.

Aufgrund der Zeitinvarianz des Messsystems können die Mikrofonsignale aber auch nacheinander (quasi gleich) an den bestehenden Mikrofonöffnungen an den Stellen $x_k = x_1$ oder $x_k = x_2$ aufgenommen werden (daher Kalibrierung am quasi gleichen Umfang - siehe Abb. 3-3 / QGU-Kal.).

Jedenfalls ergibt Gl.(3.10) in Gl.(3.8) eingesetzt die geforderte korrigierte Übertragungsfunktion:

$$H_{12} = \frac{\underline{p}(x_2, f)}{\underline{p}(x_1, f)} = \frac{H_R(x_2) \cdot \underline{H}_B}{H_R(x_1) \cdot \underline{H}_A} \cdot \frac{\underline{H}_A}{\underline{H}_B} = \frac{H_R(x_2)}{H_R(x_1)}$$

H_{12} ist nur mehr von der Übertragungsfunktion des Messrohres abhängig.

3.3.2.2 2-mic-Kalibrierung nach ISO 10534-2 (ISO-Kal.)

Gemäß Gl.(3.10) könnte die Bestimmung der Kalibrierfunktion an jeder beliebigen Stelle x_k erfolgen. Keine der bestehenden Mikrofonöffnungen darf offen bleiben, deshalb erfolgt das ISO-Kalibrieren aus rein praktischen Gründen durch Vertauschen der Mikrofone in den Positionen x_1 u. x_2 . Man kann nun für $x_{k1} = x_1$ und für $x_{k2} = x_2$ unter Voraussetzung der Zeitinvarianz zunächst zwei theoretisch gleiche QGU-Kalibrierfunktionen berechnen (siehe Abb. 3-3 / ISO-Kal.):

H_{k1} QGU-Kalibrierfunktion in Position $x_k = x_1$ ermittelt

H_{k2} QGU-Kalibrierfunktion in Position $x_k = x_2$ ermittelt

$$H_{k1} = \frac{H_B}{H_A} = \frac{\underline{u}_B(x_1, f)}{\underline{u}_A(x_1, f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_A} \quad (3.11)$$

$$H_{k2} = \frac{H_B}{H_A} = \frac{\underline{u}_B(x_2, f)}{\underline{u}_A(x_2, f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_A} \quad (3.12)$$

Diese beiden theoretisch gleichen QGU-Kalibrierfunktionen Gl.(3.11) und Gl.(3.12) werden nun geometrisch gemittelt:

$$H_k = \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\underline{u}_L(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_B}{\underline{u}_L(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_A} \right)}_{H_{k1}} \cdot \underbrace{\left(\frac{\underline{u}_L(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_B}{\underline{u}_L(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_A} \right)}_{H_{k2}}}$$

Wieder Zeitinvarianz vorausgesetzt, führt assoziatives Vertauschen der Rohr-Übertragungsfunktionen $H_R(x_1)$ und $H_R(x_2)$ im Zähler zu der auch in der o. a. ISO-Norm veröffentlichten ISO-Kalibrierfunktion:

$$H_k = \sqrt{\underbrace{\left(\frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_A} \right)}_{H_{12o}} \cdot \underbrace{\left(\frac{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_1) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot H_R(x_2) \cdot H_A} \right)}_{H_{12v}}}$$

$$\boxed{H_k = \sqrt{H_{k1} \cdot H_{k2}} = \sqrt{H_{12o} \cdot H_{12v}} = \frac{H_B}{H_A}} \quad {}^1 \quad \text{q. e. d.} \quad (3.13)$$

H_{12o} Ü.fkt. der originalen Anordnung in Position x_1 u. x_2 zum Zeitpunkt t_1

H_{12v} Ü.fkt. der vertauschten Anordnung in Position x_1 u. x_2 zum Zeitpunkt t_2

¹ vgl. ISO 10534-2:1998(E), Kap. 7.5, Gl.11: $H_c = (H_{12}^I \cdot H_{21}^II)^{1/2}$ Im Unterschied zur ISO werden in diesem Kapitel absichtlich keine ein/zweigestrichene Größen verwendet da diese im Kapitel 2.3.3 ff. die erste/zweite Messung ohne Vertauschen von Mikrofonen bezeichnen.

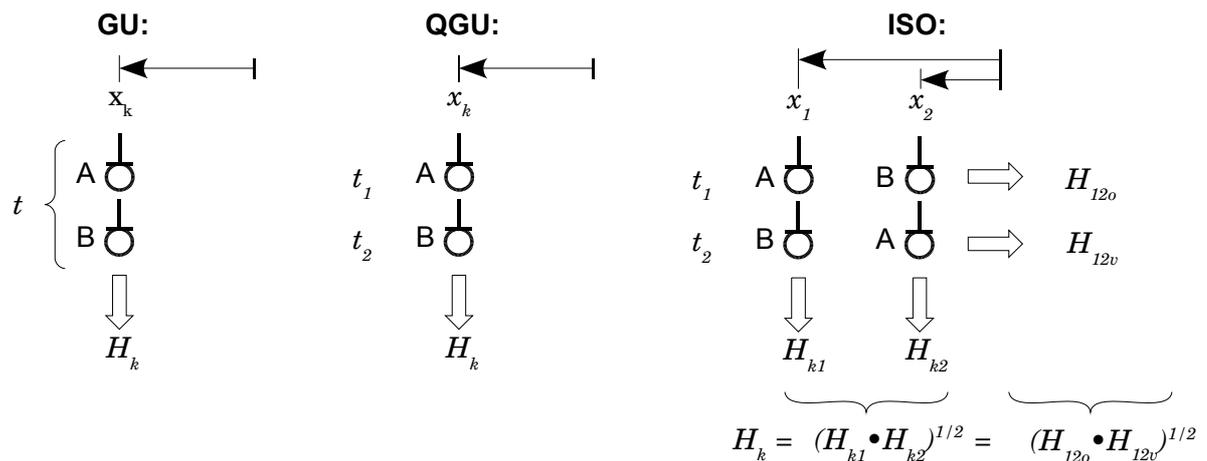


Abb. 3-3: Vergleich der Kalibriermethoden

Konklusion: Die ISO-Kalibrierfunktion entspricht gemäß Abb. 3-3:

- dem geometrischen Mittel der Übertragungsfunktionen an den Positionen x_1 und x_2 der originalen Anordnung zum Zeitpunkt t_1 und der vertauschten Anordnung zum Zeitpunkt t_2 .
- unter Voraussetzung der Zeitinvarianz dem geometrischen Mittel zweier QGU-Kalibrierfunktionen, ermittelt an den Positionen x_1 und x_2 . Dieser Umstand dient in Kapitel 3.3.4 als Grundlage für weitere Schlussfolgerungen.
- dem zu bestimmenden Quotienten H_B/H_A .

3.3.3 Kalibrierung – 4-Mikrofonmethode

Bei der 2-Mikrofonmethode ist die (korrigierte) Übertragungsfunktion H_{12} die einzige Ausgangsgröße zur weiteren Berechnung der Materialparameter. Nun sind aber sowohl bei der Übertragungsfunktions-4-mic-Methode als auch bei der Kettenmatrix-4-mic-Methode sechs (korrigierte) Übertragungsfunktionen, H'_{31} , H'_{32} , H'_{34} , H''_{31} , H''_{32} und H''_{34} , die Ausgangsgrößen (eingestrichene Größen beziehen sich auf die erste Messung (linksbeschallt), zweigestrichene auf die zweite Messung (rechtsbeschallt)).

H_{12} wird rein aus beschallungszugewandten Signalen gewonnen (Mikrofonöffnungen liegen zwischen aktivem Lautsprecher und Probe). Aus den Indizes ist nun zu erkennen, dass H'_{31} , H'_{32} , H'_{31} und H''_{32} aus beschallungszu- und beschallungsabgewandten Signalen (Signale werden zwischen Probe und passivem Lautsprecher abgenommen) ermittelt werden. Die Übertragungsfunktionen werden also „über die Probe hinweg“ gebildet. Für die Korrektur dieser Übertragungsfunktionen wird sich diese Erkenntnis als sehr wichtig erweisen.

Auch bei der 4-mic-Kalibrierung geht man von den entsprechenden Quotienten der aufgenommenen Messsignale aus und korrigiert den Einfluss unterschiedlicher Kanal-Über-

tragungsfunktionen auf das Messergebnis mittels der jeweiligen Kalibrierfunktionen H_{k31} , H_{k32} und H_{k34} . Analog zur 2-Mikrofonmethode gilt auch hier der Ansatz:

$$H'_{31} = \frac{p'(x_1, f)}{p'(x_3, f)} = \frac{H'_R(x_1)}{H'_R(x_3)} = \frac{u'_A(x_1, f)}{u'_C(x_3, f)} \cdot \frac{1}{H_{k31}} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_1)}{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_3)} \cdot \underbrace{\left(\frac{H_A}{H_C \cdot H_{k31}} \right)}_{=1} \quad (3.14)$$

$$H'_{32} = \frac{p'(x_2, f)}{p'(x_3, f)} = \frac{H'_R(x_2)}{H'_R(x_3)} = \frac{u'_B(x_2, f)}{u'_C(x_3, f)} \cdot \frac{1}{H_{k32}} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_2)}{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_3)} \cdot \underbrace{\left(\frac{H_B}{H_C \cdot H_{k32}} \right)}_{=1} \quad (3.15)$$

$$H'_{34} = \frac{p'(x_4, f)}{p'(x_3, f)} = \frac{H'_R(x_4)}{H'_R(x_3)} = \frac{u'_D(x_4, f)}{u'_C(x_3, f)} \cdot \frac{1}{H_{k34}} = \frac{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_4)}{\underline{u}(f) \cdot H'_R(x_3)} \cdot \underbrace{\left(\frac{H_D}{H_C \cdot H_{k34}} \right)}_{=1} \quad (3.16)$$

Die Kanal-Übertragungsfunktionen $H_A \dots H_D$ und damit auch die Kalibrierfunktionen sind von der Beschallungsrichtung unabhängig. Deshalb gilt obiger Ansatz auch für zwei-gestrichene Größen (rechtsbeschallt) mit den nun zu bestimmenden Kalibrierfunktionen:

$$H_{k31} = H_A/H_C, \quad H_{k32} = H_B/H_C, \quad H_{k34} = H_D/H_C \quad (3.17)$$

Es wäre auch hier messtechnisch zu aufwändig die Kanal-Übertragungsfunktionen H_A , H_B , H_C und H_D einzeln zu bestimmen, es genügen hier ebenso die Quotienten H_A/H_C , H_B/H_C und H_D/H_C , da die entsprechenden Mikrofonsignale sowohl bei der Übertragungsfunktionsmethode als auch bei der Kettenmatrixmethode immer als Quotienten auftreten.

Um die Kalibrierfunktionen bestimmen zu können, ist nun in Anlehnung an die 2-mic-Kalibriermethoden (Abschnitt 3.3.2) eine 4-mic-ISO- und eine 4-mic-QGU-Kalibriermethode zu entwickeln.

Die Abfolge der Vertauschungen soll sowohl für das ISO- als auch das QGU-Kalibrieren gelten und ist in der Messmatrix Tab. 3-1 zusammengefasst. Aus rein praktischen Gründen wird zunächst gefordert:

- (1) Beschallung aus abwechselnder Richtung links/rechts
- (2) Das Tauschen der Mikrofone soll immer paarweise¹ erfolgen
- (3) Direkte ISO-Quotientenbestimmung aus den Übertragungsfunktionen der originalen und der vertauschten Messung
- (4) Indirekte ISO-Quotientenbestimmung soll bereits nach zwei Vertauschungen möglich sein

¹ z.B. ABCD-CDAB (A↔C, B↔D) und nicht z.B. ABCD-BCDA.

- (5) Für die QGU-Quotientenbestimmung soll jedes Mikrofon einmal in jeder Messposition sein

Es ergeben sich insgesamt acht Beschallungen ($n \dots$ Beschallungsnummer). Nach den ersten beiden Beschallungen in originaler Position (Mikrofonreihenfolge „ABCD“) lassen sich vorerst die ein- und zweigestrichenen (noch unkorrigierten) Übertragungsfunktionen H'_{31o} , H'_{32o} , H'_{34o} (aus Beschallung $n=1$ - links) und H''_{31o} , H''_{32o} , H''_{34o} (aus Beschallung $n=2$ - rechts) bestimmen. Die darauf folgenden Vertauschungen dienen zur Korrektur derselben.

Stelle→		x_1	x_2	x_3	x_4			
	n	L	Mic/Kanäle				R	ISO-Quotienten
orig.	1	◀	A	B	C	D		
	2		A	B	C	D	▶	
vertauscht	3	◀	C	D	A	B		
	4		C	D	A	B	▶	
	5	◀	D	C	B	A		
	6		D	C	B	A	▶	
	7	◀	B	A	D	C		
	8		B	A	D	C	▶	
							direkt: H_A/H_C , $[H_B/H_D]$	
							direkt: H_B/H_C , $[H_A/H_D]$, indirekt: $H_D/H_C = H_B/H_C/[H_B/H_D] = H_A/H_C/[H_A/H_D]$	
							direkt: H_D/H_C , (H_A/H_B wird nicht verwendet)	

Tab. 3-1: Messmatrix 4-mic-Methode

Will man nun die nach Beschallung $n=1$ ermittelte Übertragungsfunktion H'_{31o} in Anlehnung an die ISO-Norm (Gl. (3.13)) korrigieren so sind nur die Kanäle 3/1 bei linker Beschallung zu tauschen, denn die Kalibrierfunktion H_{k31} wird bestimmt aus:

$$H_{k31} = \sqrt{H'_{31o} \cdot H'_{31v}} = \frac{H_B}{H_A}$$

Ein theoretisch gleiches Ergebnis für H_{k31} erhält man mittels der zweigestrichenen Größen aus rechter Beschallung. Vorausblickend auf die QGU Kalibrierung (Forderung 5 auf Seite 36) werden aber auch die Kanäle 2/4 getauscht und es ergibt sich die neue Mikrofonreihenfolge „CDAB“ für $n=3$ (und $n=4$ rechtsbeschallt).

H'_{32o} linksbeschallt (H''_{32o} rechtsbeschallt) erfordert zur ISO-Korrektur nur ein Vertauschen der Kanäle 3/2. Kanäle 1/4 werden wieder wegen Forderung 5 getauscht. Die originale Folge „ABCD“ wird zu „DCBA“ für $n=5$ (und $n=6$ rechtsbeschallt).

Dasselbe Prozedere erfordert für H'_{34o} (H''_{34o}) ein Vertauschen der Kanäle 3/4 sowie wegen Forderung 5 ein Vertauschen der Kanäle 1/2 und führt zur Folge „BADC“ für $n=7$ (und $n=8$). Die Messmatrix ist somit erstellt.

Die vorausblickend auf die QGU-Kalibrierung durchgeführten Vertauschungen ermöglichen nun auch ein Kalibrieren an einer vorgegebenen Kalibrierposition x_k . So eröffnen sich nun nach Gl. (3.10) für die vier vorhandenen Kalibrierpositionen, jeweils links- und rechtsbeschallt, acht Möglichkeiten die Übertragungsfunktion H'_{31o} am quasigleichen Umfang zu korrigieren (Gl. (3.18)):

$$H_{k31} = \frac{\underline{u}'_A(x_k, f)}{\underline{u}'_C(x_k, f)} = \frac{\underline{u}''_A(x_k, f)}{\underline{u}''_C(x_k, f)} = \frac{H_A}{H_C} \quad k = 1 \dots 4 \quad (3.18)$$

In Anlehnung an Gl. (3.8) kann für die 4-mic-Methode die geforderte korrigierte Übertragungsfunktion H'_{31} bestimmt werden:

$$H'_{31} = \frac{\underline{u}'_A(x_1, f)}{\underline{u}'_C(x_3, f)} \cdot \frac{1}{H_{k31}} = H'_{31o} \cdot \frac{1}{H_{k31}}$$

Wählt man nun z. B. als Kalibrierposition die Stelle $x_k = x_2$ linksbeschallt, so erhält man in Gl. (3.18) eingesetzt und aus Tab. 3-1: Messmatrix 4-mic-Methode:

$$H_{k31} = \frac{\underline{u}'_A(x_2, f)}{\underline{u}'_C(x_2, f)} = \frac{H_A}{H_C} = \frac{\text{Mic / Kanal2@7.Beschallung}}{\text{Mic / Kanal2@5.Beschallung}}$$

Die gewinnbaren ISO-Quotienten sind in der rechten Spalte der Messmatrix Tab. 3-1 angegeben und werden im folgenden Kapitel 3.3.3.1 weiter erklärt. Die farbigen Markierungen betreffen den bestimmbareren QGU-Quotienten im vorhergehenden Beispiel und das Beispiel in Abschnitt 3.3.3.2.

3.3.3.1 4-mic-Kalibrierung in Anlehnung an ISO 10534-2

Wie bereits Tab. 3-1 zeigt sind bereits nach zwei Tauschungen (nach Beschallungen Nr. 5/6) die geforderten Quotienten H_A/H_C und H_B/H_C in Bezug zur originalen Anordnung direkt und H_D/H_C indirekt bestimmbar (verkürzte Kalibriermessung, hier werden auch die in eckigen Klammern angeführten Quotienten verwendet).

Nach drei Tauschungen (nach Beschallungen Nr. 7/8) sind alle geforderten Quotienten in direktem Bezug zur originalen Anordnung bestimmbar (vollständige Kalibriermessung). Die Kalibrierfunktionen $H_{k..}$ werden in Anlehnung an Gl. (3.13) aus dem geometrischen Mittel der Übertragungsfunktionen der originalen (H_{31o}) und vertauschten (H_{31v}) Anordnung nun auch unter Einbezug der ersten (linken) ($H'_.$) sowie zweiten (rechten) ($H''.$) Beschallung bestimmt. Auch hier ist wie in Gl.(3.13) gezeigt eine Darstellung als QGU-Kalibrierfunktionen möglich:

$$\boxed{H_{k31} = \sqrt[4]{H'_{31o} \cdot H'_{31v} \cdot H''_{31o} \cdot H''_{31v}} = \sqrt[4]{H'_{k3} \cdot H'_{k1} \cdot H''_{k3} \cdot H''_{k1}} = \frac{H_A}{H_C}} \quad (3.19)$$

Konklusion: hier entspricht die ISO-Kalibrierfunktion H_{k31}

- dem geometrischen Mittel der (unkorrigierten) Übertragungsfunktionen („über die Probe hinweg“) an den Positionen x_1 und x_3 jeweils links- / rechtsbeschallt, sowie in originaler / vertauschter Anordnung.
- unter Voraussetzung der Zeitinvarianz dem geometrischen Mittel von vier QGU-Kalibrierfunktionen, ermittelt an den Positionen x_1 und x_3 , jeweils von links und von rechts beschallt. Dieser Umstand dient in Kapitel 3.3.5 als Grundlage für weitere Schlussfolgerungen.
- dem zu bestimmenden Quotienten H_A/H_C .

Ebenso in Anlehnung an Gl. (3.13) gilt:

$$\begin{aligned} H_{k32} &= \sqrt[4]{H'_{32o} \cdot H'_{32v} \cdot H''_{32o} \cdot H''_{32v}} \\ &= \sqrt[4]{H'_{k3} \cdot H'_{k2} \cdot H''_{k3} \cdot H''_{k2}} = \frac{H_B}{H_C} \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} H_{k34} &= \sqrt[4]{H'_{34o} \cdot H'_{34v} \cdot H''_{34o} \cdot H''_{34v}} \\ &= \sqrt[4]{H'_{k3} \cdot H'_{k4} \cdot H''_{k3} \cdot H''_{k4}} = \frac{H_D}{H_C} \end{aligned} \quad (3.21)$$

3.3.3.2 4-mic-Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU)

Ähnlich der 2-Mikrofonmethode lassen sich die Quotienten sowohl gleichzeitig (Kalibrierring etc.) als auch nacheinander (sequenziell) bestimmen. Während einer vollständigen sequenziellen Kalibriermessung (8 Beschallungen) nehmen alle Mikrofone jeweils einmal jede Mikrofonposition mit linker und rechter Beschallung ein. Waren bei der 2-mic-Kalibrierung mit zwei Bezugspositionen die zwei Kalibrierfunktionen (Gl.(3.11) u. Gl.(3.12)) noch übersichtlich darstellbar, so ergeben sich nun aus:

4 mögliche Mikrofonpositionen \times 2 Beschallungsrichtungen = 8 Kalibrier-Bezugspositionen;
 $(x_1 \dots x_4)$ (L, R) (BP = 1...8)

8 Kalibrier-Bezugspositionen \times 3 Übertragungsfunkt. = 24 Kalibrierfunktionen;
 $(k = 1...8)$ H_{31}, H_{32}, H_{34} $H_{k31(1..8)}, H_{k32(1..8)}, H_{k34(1..8)}$

Aus Gründen der Übersichtlichkeit und einer schlanken Programmierung ist eine Indizierung unumgänglich. In der folgenden Zusammenfassung wird die im Programm verwendete Indizierung erläutert:

- Bei den Ortskoordinaten x_i bezeichnen die Indizes die Kalibrierpositionen 1 bis 4 siehe (Abb. 3-1).

- Bei den Signalspektren \underline{u}_x bezeichnen die Indizes die Mikrofonkanäle A...D
- Bei den Übertragungsfunktionen H_{xy} und bei den Kalibrierfunktionen H_{kxy} bezeichnen die Indizes in Anlehnung an die ISO-Norm die Mikrofonkanäle, und zwar Index 1=A, 2=B, 3=C, 4=D.

Aus der Messmatrix Tab. 3-1 lässt sich die Kalibriermatrix Tab. 3-2 erstellen, sie zeigt den Zusammenhang zwischen Kalibrier-Bezugsposition BP und Beschallungsnummern n für die Kalibrierfunktionen H_{k31} , H_{k32} und H_{k34} . Die Erstellung der Kalibriermatrix wird am folgenden Beispiel erläutert:

Beispiel: Die aufgenommene (unkorrigierte) Übertragungsfunktion H'_{310} in originaler Anordnung soll mit der zugehörigen QGU-Kalibrierfunktion H_{k31} , die an der Stelle x_2 linksbeschallt aufgenommen wurde, korrigiert werden.

Aus der Messmatrix Tab. 3-1 kann man Folgendes entnehmen und in die Kalibriermatrix Tab. 3-2 eintragen:

- x_2 in Gl. (3.18) eingesetzt: $H_{k31} = \underline{u}'_A(x_2, f) / \underline{u}'_C(x_2, f)$, zu suchen sind nun die Zähler-Beschallungsnummer n_A und die Nenner-Beschallungsnummer n_C .
- Mic/Kanal „A“ befindet sich bei Beschallung $n_A = 7$ an der Stelle x_2
- Mic/Kanal „C“ befindet sich bei Beschallung $n_C = 5$ an der Stelle x_2
- „Stelle x_2 linksbeschallt“ wird die Kalibrier-Bezugsposition $BP = 3$ zugeordnet

Auf diese Weise kann die Kalibriermatrix Tab. 3-2 vollständig bestimmt werden. Aufgrund der Übersichtlichkeit und aus programmtechnischen Gründen wird die Spalte n_C dreifach angegeben:

BP	x	L	H_{k31}		H_{k32}		H_{k34}		R
			n_A	n_C	n_B	n_C	n_D	n_C	
1	x_1	◀	1	3	7	3	5	3	
2	x_1		2	4	8	4	6	4	▶
3	x_2	◀	7	5	1	5	3	5	
4	x_2		8	6	2	6	4	6	▶
5	x_3	◀	3	1	5	1	7	1	
6	x_3		4	2	6	2	8	2	▶
7	x_4	◀	5	7	3	7	1	7	
8	x_4		6	8	4	8	2	8	▶

Tab. 3-2: Kalibriermatrix 4-mic-QGU-Methode

Unter Verwendung der so gewonnenen Indizes n_i können die QGU-Kalibrierfunktionen $H_{k..}$ in Abhängigkeit der Bezugsposition BP dargestellt werden:

$$H_{k31}(BP) = \frac{\underline{u}_A(x, f)}{\underline{u}_C(x, f)} = \frac{\underline{u}_{A, n_A}(f)}{\underline{u}_{C, n_C}(f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_A}{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_C} = \frac{H_A}{H_C} \quad (3.22)$$

$$H_{k32}(BP) = \frac{\underline{u}_B(x, f)}{\underline{u}_C(x, f)} = \frac{\underline{u}_{B, n_B}(f)}{\underline{u}_{C, n_C}(f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_B}{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_C} = \frac{H_B}{H_C} \quad (3.23)$$

$$H_{k34}(BP) = \frac{\underline{u}_D(x, f)}{\underline{u}_C(x, f)} = \frac{\underline{u}_{D, n_D}(f)}{\underline{u}_{C, n_C}(f)} = \frac{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_D}{\underline{u}(f) \cdot \underline{H}_R(x) \cdot H_C} = \frac{H_D}{H_C} \quad (3.24)$$

Beispiel: Sucht man wieder die Kalibrierfunktion H_{k31} für die Kalibrier-Bezugsposition $BP = 3$ (Stelle x_2 linksbeschallt), so ergibt sich nach Gl.(3.22) und Tab. 3-2

$$H_{k31}(3) = \frac{\underline{u}'_A(x_2, f)}{\underline{u}'_C(x_2, f)} = \frac{\underline{u}_{A, 7. \text{Beschallung}}(f)}{\underline{u}_{C, 5. \text{Beschallung}}(f)} = \frac{\underline{u}_{A, 7}(f)}{\underline{u}_{C, 5}(f)}$$

3.3.4 Vergleich von Kalibrierproben für 2-mic-Messungen

In Kapitel 3.3.2 wurden das 2-mic-Kalibrierverfahren nach ISO 10534-2:1998(E) sowie das 2-mic-Kalibrierverfahren am quasi gleichen Umfang (QGU) vorgestellt. Im Folgenden sollen beide Verfahren verglichen und die jeweiligen Vor- und Nachteile erörtert werden. Weiters werden die notwendigen akustischen Eigenschaften von Kalibrierproben festgelegt, sowie die Positionen zum Kalibrieren optimiert. Zunächst wird auf die Druckverhältnisse im Messrohr näher eingegangen:

Wird das Rohr beschallt, so stellt sich je nach Probe nach etwa 40 Reflexionen ein gleich bleibender Zustand des Wechseldruckes $\underline{p}(x, f)$ mit mehr oder weniger ausgeprägten, jedoch ortsfesten Maxima und Minima ein. Für die weiteren Abbildungen wurden die Druckverhältnisse im Rohr mit folgenden angenommenen Parametern simuliert (Koordinatenangabe nach Abb. 3-1):

Kalibrierprobe	linearer Reflexionsgrad	$R_P = 0,3$	an $x = 0$	(Abb. 3-4)
leeres Rohr	schallharter Abschluss	$R_P = 1,0$	an $x = 0$	(Abb. 3-5)
Lautsprecher	linearer Reflexionsgrad	$R_L = 0,8$	an $x = 400\text{mm}$	
Schallgeschwindigkeit	@ 21,37°C	$c_0 = 344\text{m/s}$		
Rohrlänge		$L = 400\text{mm}$		
Anzahl der berücksichtigten Reflexionen		40		

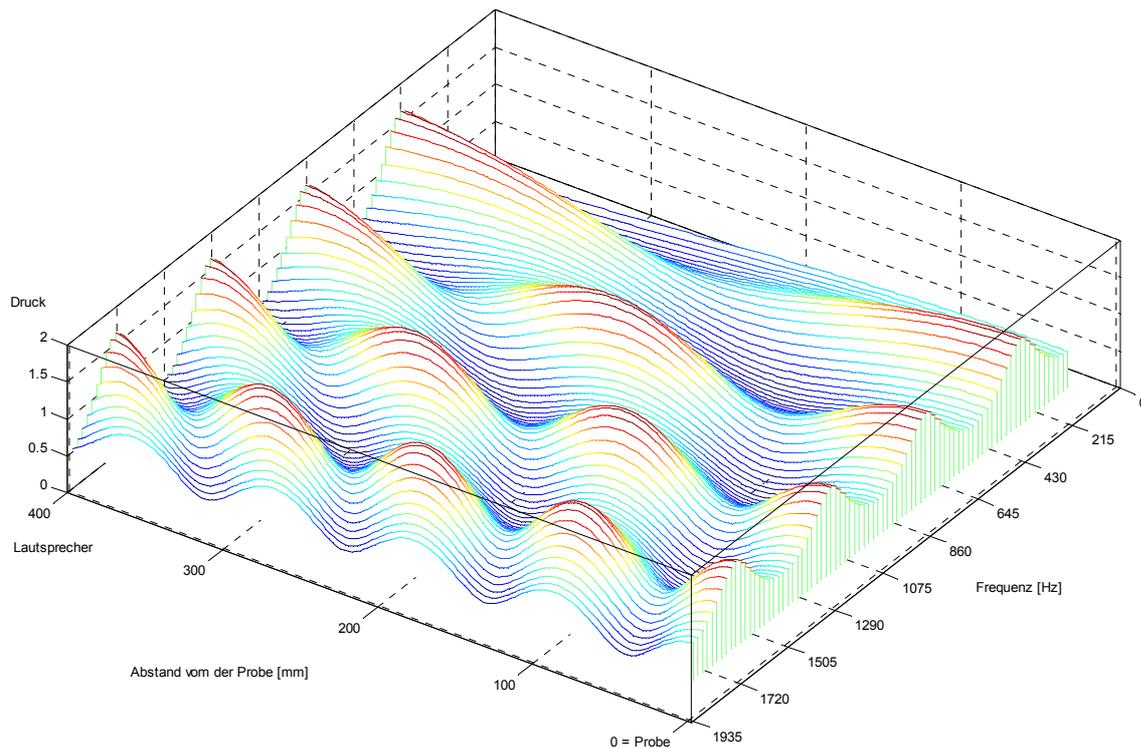


Abb. 3-4: Druckverhältnisse im Rohr $p/p_{err} = f(x, f)$ - Kalibrierprobe

Abb. 3-4: Bei gut absorbierenden Stoffen, hier als Beispiel eine Kalibrierprobe mit einem Reflexionsgrad von $R_P = 0,3$, hält sich die Druckdifferenz zwischen Maxima und Minima in Grenzen. Die Maxima erreichen die 1,7-fache Erregungsamplitude ($p_{err} = 1$), die Minima unterschreiten nie den Wert 0.6.

Zu beobachten sind in Druck-/Abstand-Ebenen liegende Stehwellen und in Druck-/Frequenz-Ebenen auftretende Resonanzerscheinungen. Beide Erscheinungen sind eng miteinander verknüpft und sollen nun getrennt voneinander betrachtet werden:

Stehwellen:

Sie entstehen durch Überlagerung der hinlaufenden mit der an der Probe reflektierten rücklaufenden Welle. Die Lage der Stehwellen ist daher von Reflexionen an der anregenden Lautsprechermembrane unabhängig, ebenso von der Rohrlänge L .

Die Druckmaxima treten auf an den Stellen $x = s_{\max}$ von der Probe entfernt:

$$s_{\max}(n, \lambda) = \frac{(n-1) \cdot \lambda}{2} \quad \lambda = \frac{c_0}{f} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.25)$$

Demnach liegen für alle Frequenzen immer Druckmaxima an der Probenoberfläche ($s_{\max}(0, \lambda) = 0$).

Die Druckminima entstehen an den Stellen $x = s_{\min}$ von der Probe entfernt:

$$s_{\min}(n, \lambda) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot \lambda}{4} \quad \lambda = \frac{c_0}{f} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.26)$$

Die Stehwellen sind in Abb. 3-4 in den Druck-/Abstand-Ebenen abhängig von der Frequenz der anregenden Schwingung erkennbar.

Rohrresonanzen:

Sowohl die Reflexion an der Probe als auch die Reflexion an der anregenden Lautsprechermembrane verursachen konstruktive sowie destruktive Interferenzen der hin- und rücklaufenden Welle.

Konstruktive Interferenzen treten auf bei den Resonanzfrequenzen:

$$f_{\text{res}}(n, L) = \frac{n \cdot c_0}{2 \cdot L} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.27)$$

Destruktive Interferenzen entstehen bei den Antiresonanzfrequenzen:

$$f_{\text{ares}}(n, L) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot c_0}{4 \cdot L} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.28)$$

Konstruktive Interferenzen verstärken, destruktive Interferenzen schwächen die Stehwellen ab. Diese Resonanzerscheinungen sind in Abb. 3-4 und Abb. 3-7 in den Druck-/Frequenz-Ebenen für verschiedene Abstände von der Probe erkennbar.

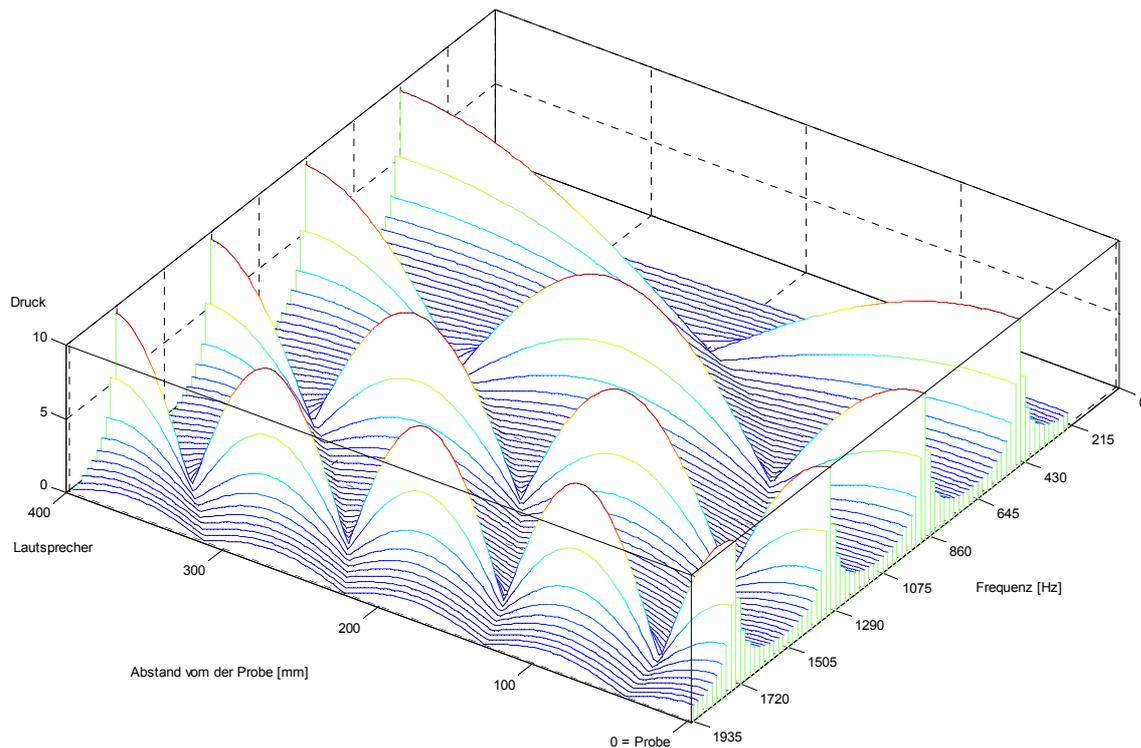


Abb. 3-5: Druckverhältnisse im Rohr $p/p_{err} = f(x, f)$ - Leeres Rohr

Abb. 3-5: Wird das Rohr hingegen schallhart abgeschlossen ($R_P = 1,0$), dann erreichen die Druckmaxima die zehnfache Erregungsamplitude, die Minima nun annähernd null. Diese aufgrund der Stehwellen erwarteten Druck-Nullstellen treten

- unabhängig von der Rohrlänge L - somit
- unabhängig von den Rohr-Resonanzfrequenzen f_{res} - nur
- abhängig von der Erregungsfrequenz f - bzw.
- abhängig von der Erregungswellenlänge λ

nach Gl.(3.26) an den Stellen s_0 von der Probe entfernt über den ganzen Frequenzbereich auf:

$$s_0(n, \lambda) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot \lambda_0}{4} \quad \lambda = \frac{c_0}{f_0} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.29)$$

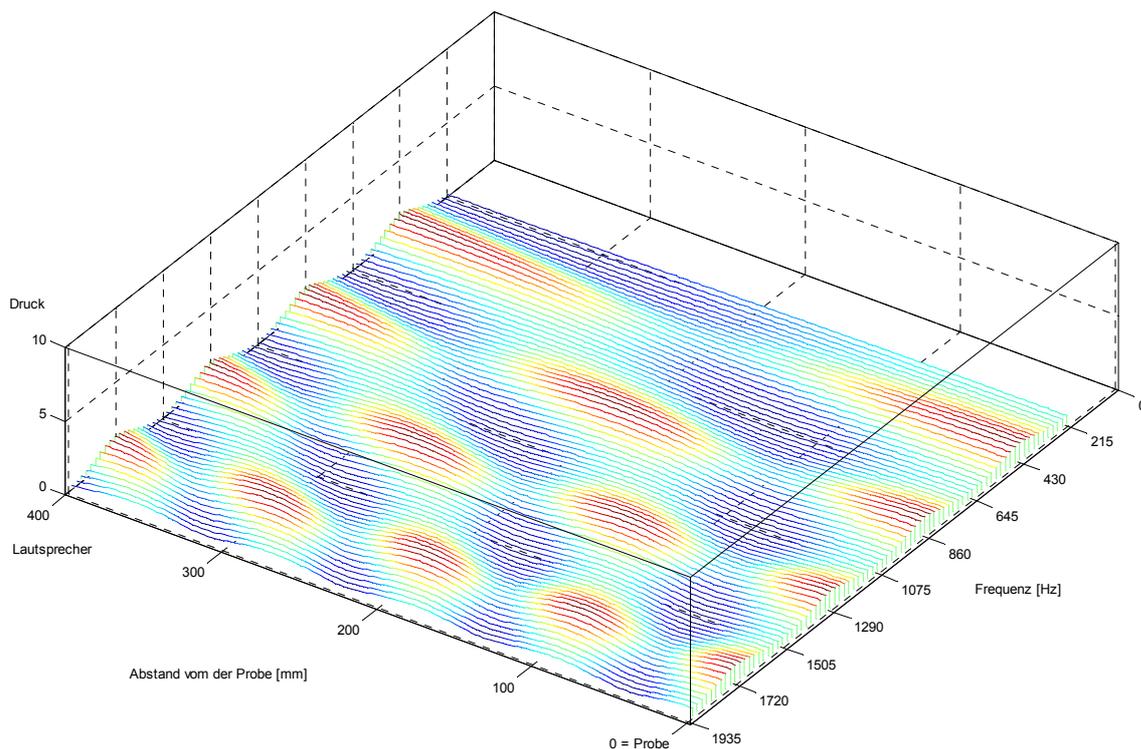


Abb. 3-6: Druckverhältnisse im Rohr $p/p_{err} = f(x, f)$ - Kalibrierprobe; skaliert wie Abb. 3-5

Abb. 3-6 zeigt zum Vergleich mit Abb. 3-5 wieder die Kalibrierprobe mit dem Reflexionsgrad $R_P = 0,3$ aus Abb. 3-4 jedoch mit gleicher Skalierung wie Abb. 3-5:

Einfluss der Stehwellen-Nullstellen auf die Kalibrierfunktion

Die Kalibrierfunktion wird immer aus (einem oder mehreren) Quotienten zweier Leistungsspektren bestimmt, die aus den nacheinander gemessenen Schalldrücken \underline{p} an bestimmten Kalibrier-Positionen x_k berechnet werden. Bei Stehwellen-Nullstellen, die bei ungeeigneten Kalibrierproben auftreten, wird dieser Quotient zu $0/0$ und damit unbestimmt. Die Kalibrierfunktion weist dann an diesen Stellen Unstetigkeiten auf, die sich auch im Messergebnis widerspiegeln (siehe auch Abb. 3-2 und Abb. 3-16)

Die folgenden Diagramme in Abb. 3-7 stellen Schnitte in Druck-/Frequenzebenen aus Abb. 3-4 und Abb. 3-6 dar. Gut erkennbar sind die Nullstellen der Stehwellen im simulierten leeren Rohr (—), die bei 100mm Abstand von der schallharten Wand einfach, bei 200mm zweifach und bei 300mm dreifach auftreten. Auch an der Lautsprechermembran (Abstand 400mm) ist der Schall-Wechseldruck bei vier Frequenzen gleich null. Die Simulation mit der Kalibrierprobe (blau·····) zeigt hingegen keine Nullstellen. Die Rohr-Resonanzfrequenzen (konstruktive Interferenz) liegen nach Gl.(3.27) bei

$$f_{res}(n, L) = \frac{n \cdot c_0}{2 \cdot L} = \frac{n \cdot 344}{2 \cdot 0,4} = 430\text{Hz}, 860\text{Hz}, 1290\text{Hz}, 1720\text{Hz} \dots \quad n \in \mathbb{N}^+$$

und destruktive Interferenzen nach (3.28) bei

$$f_{ares}(n, L) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot c_0}{4 \cdot L} = 215\text{Hz}, 645\text{Hz}, 1075\text{Hz}, 1505\text{Hz} \dots \quad n \in \mathbb{N}^+$$

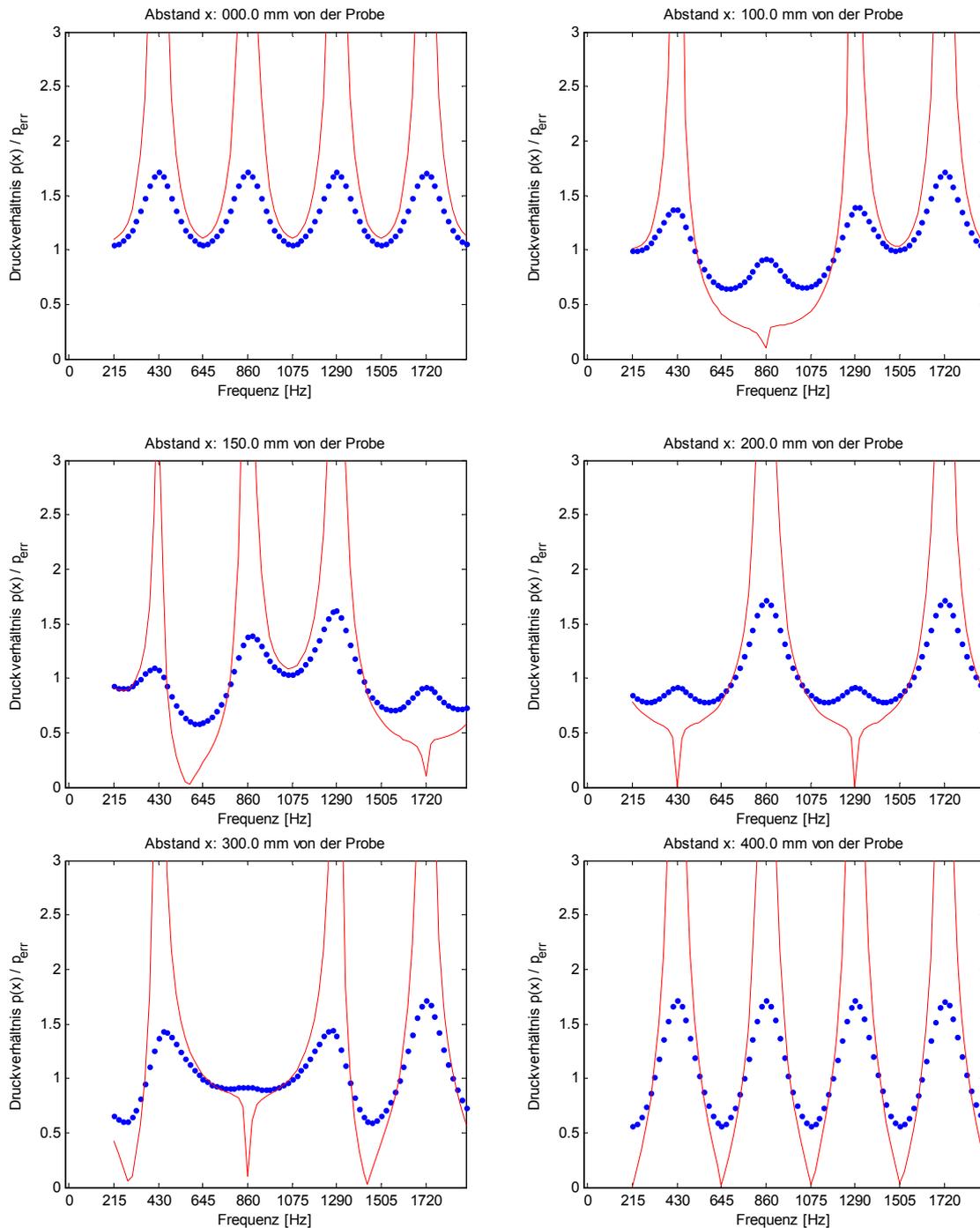


Abb. 3-7 Kalibrierprobe (blau.....), Leeres Rohr (—) $p/p_{err} = f(x, f)$

Aus Abb. 3-7 können die Auswahlkriterien für eine Kalibrierprobe und für die Wahl der Kalibrierposition abgeleitet werden:

- Je besser eine Kalibrierprobe absorbiert, desto weniger können sich die erwarteten Nullstellen ausprägen. Zum Kalibrieren sollte demnach ein für alle Frequenzen gut absorbierender Werkstoff verwendet werden. Dies ist nur schwer realisierbar denn:
- Die meisten Dämmstoffe sind schlechte Tiefenabsorber, die im tiefen Frequenzbereich erwarteten Stehwellen-Nullstellen werden folglich markant auftreten. Mit zunehmendem Abstand x wandern immer mehr Nullstellen in Richtung tiefe Frequenzen. Nur bei kleinem Kalibrierabstand x_k (hier $<100\text{mm}$) liegen die erwarteten Nullstellen im hohen Frequenzbereich, deshalb: $\rightarrow x_k \ll$
- Mit zunehmendem Abstand x nimmt generell die Anzahl der erwarteten Stehwellen-Nullstellen zu. Nur bei kleinem Kalibrierabstand x_k sind wenige Stehwellen-Nullstellen zu erwarten, deshalb auch aus diesem Grund $\rightarrow x_k \ll$
- Die Rohrresonanzen wirken den erwarteten Druck-Minima entgegen (konstruktive Interferenz) – Der Druckverlauf der Kalibrierprobe zeigt trotz zu erwartender Nullstelle kein Druck-Minimum (zu erkennen in Abb. 3-7 $x = 100\text{ mm} / f_{res} = 860\text{ Hz}$ und bei $x = 200\text{ mm} / f_{res} = 430\text{ u. }1290\text{ Hz}$. Im Gegensatz tritt bei $x = 150\text{ mm} /$ bei den Antiresonanzfrequenzen $f_{ares} = 645\text{ u. }1075\text{ Hz}$ keine Anhebung auf (destruktive Interferenz)). An der Kalibrierposition x_k sollten demnach die Frequenzen der erwarteten Stehwellen-Nullstellen mit den Rohr-Resonanzfrequenzen zusammenfallen.

Der letzten Forderung nach erhält man nach dem Umformen von Gl.(3.29) und Gleichsetzen mit Gl.(3.27) für die Indizes $n_i, n_j = 1..2$ für die optimalen Kalibrierpositionen $x_k(n_i, n_j)$ in einem Messrohr der Länge $L = 0,4\text{m}$:

$$f_0 = \frac{(2 \cdot n_i - 1) \cdot c_0}{4 \cdot x_k} = f_{res}(n, L) = \frac{n_j \cdot c_0}{2 \cdot L} \quad n_i, n_k \in \mathbb{N}^+$$

$$x_k(n_i, n_j) = \frac{L \cdot (2 \cdot n_i - 1)}{2 \cdot n_j} = \frac{0,4 \cdot (2 \cdot n_i - 1)}{2 \cdot n_j} = 0,1\text{m}, 0,2\text{m}, 0,3\text{m}, (0,6\text{m}) \quad (3.30)$$

Tab. 3-3: Treten an der Absorberoberfläche Reflexionen auf, dann lassen sich nach Gl.(3.29) die Frequenzen f_0 der erwarteten Stehwellen-Nullstellen in Abhängigkeit der in (3.30) optimalen Kalibrier-Position x_k ermitteln (nicht relevante Frequenzen f_0 kursiv dargestellt):

$$f_0 = \frac{c_0 \cdot (2 \cdot n - 1)}{4 \cdot x_k} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.31)$$

f_0 [Hz]		n				
		1	2	3	4	
x_k [m]	x_2	0,1	860	<i>2580</i>	<i>4300</i>	<i>6020</i>
	x_1	0,2	430	1290	<i>2150</i>	<i>3010</i>
		0,3	287	860	1433	<i>2007</i>
		0,4	<i>215</i>	<i>645</i>	<i>1075</i>	<i>1505</i>

Tab. 3-3 erwartete Stehwellen-Nullstellen bei Frequenzen $f_0 = f(x_k, n)$ in [Hz]

3.3.4.1 Kalibrierung nach ISO 10534-2

Bei der Messung nach ISO 10534-2 erfolgt das Kalibrieren durch geometrische Mittelung der Übertragungsfunktionen zweier Kalibrierpositionen (s. Gl.(3.13)). Nun treten nach Tab. 3-3 neben der erwarteten Stehwellen-Nullstelle bei $x_k = \frac{1}{4}L = 100\text{mm}$ auch an den Kalibrierpositionen $x_k = \frac{1}{2}L = 200\text{mm}$ und $x_k = \frac{3}{4}L = 300\text{mm}$ zwei bzw. drei weitere Nullstellen auf. Nach Auswahl einer weniger geeigneten Kalibrierprobe könnte deren Kalibrierfunktion bei jeweils drei Frequenzen Unstetigkeiten aufweisen und bei diesen Frequenzen die Messergebnisse verfälschen:

Kurzer Mikrofonabstand: – 100/200mm	430Hz	860Hz	1290Hz
Weiter Mikrofonabstand: – 100/300mm	287 Hz	860Hz	1433Hz

Bei der Messung mit kurzem Mikrofonabstand ($x_k = 100/200\text{mm}$) wirken die Resonanzfrequenzen des Messrohres den zu erwartenden Stehwellen-Nullstellen entgegen (Abb. 3-7) (konstruktive Interferenz). Eventuell dennoch auftretende Unstetigkeiten der Kalibrierfunktion H_{k2} nach Gl.(3.12) bei 860Hz überdecken die der H_{k1} nach Gl.(3.11) bei 430Hz und 1290Hz nicht. Folglich wirkt die geometrische Mittelung glättend auf die resultierende Kalibrierfunktion H_k nach Gl.(3.13) .

Bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand ($x_k = 100/300\text{mm}$) wirken die Rohr-Resonanzen der zu erwartenden Stehwellen-Nullstelle bei 287Hz nicht entgegen – ein Nachteil, denn gerade diese Messung sollte den tiefen Frequenzbereich mit gültigen Ergebnissen abdecken. Der eventuell dennoch auftretenden Unstetigkeit der Kalibrierfunktion H_{k1} nach Gl.(3.11) bei 287Hz steht jedoch eine stetige H_{k2} nach Gl.(3.12) gegenüber. Folglich wirkt auch hier die geometrische Mittelung glättend auf die resultierende Kalibrierfunktion H_k nach Gl.(3.13). Derselbe Effekt tritt auch bei 1433Hz auf, diese Frequenz liegt aber ebenso wie die gemeinsamen Unstetigkeiten von H_{k1} und H_{k2} bei 860Hz außerhalb des gültigen Messbereiches.

3.3.4.2 Kalibrierung am quasi gleichen Umfang (QGU)

Bei einem Abstand von 400mm zwischen Probe und Lautsprechermembrane ist nach Abb. 3-7 ein Kalibrierabstand von $x_k = L/4 = 100\text{mm}$ ¹ eine günstige Auslegung. Es ist nur eine Stehwellen-Nullstelle bei 860Hz zu erwarten. Bei dieser Frequenz zeigen Dämmstoffe meist gute Absorptionseigenschaften. Sollten dennoch zu starke Reflexionen einer weniger geeigneten Kalibrierprobe auftreten, so kann der Einfluss der Rohr-Resonanzfrequenz (ebenfalls 860Hz) diese ausgleichen. Für die Messung mit weitem Mikrofonabstand ist diese auftretende einzige Stehwellen-Nullstelle bei 860Hz irrelevant, da sie außerhalb des gültigen Messbereiches liegt.

¹ ISO 10534-2:1998(E), Kap. 4.3

Zum Kalibrieren mit weniger geeigneten Proben ist für Messungen mit weitem Mikrofonabstand gegenüber der Kalibriermethode nach ISO 10534-2 die Methode am quasi gleichen Umfang (QGU) zu bevorzugen.

3.3.4.3 Beispiele zur Kalibrierung

Um die akustischen Eigenschaften der Kalibrierproben zu beschreiben wurden bisher sehr vage Begriffe wie „geeignet“ oder „weniger geeignet“ verwendet. Nun soll das Verhalten konkreter Materialien als Kalibrierprobe gezeigt werden und das Übereinstimmen der Messergebnisse mit der im Kapitel beschriebenen Simulation überprüft werden.

Die nachfolgenden Diagramme zeigen nach ISO 10534-2 (ISO) und nach dem Verfahren am quasi gleichen Umfang (QGU) ermittelte Kalibrierfunktionen verschiedener Absorber. Bei akustisch harten Stoffen (z.B. „Styropor“ und „Leeres Rohr“) treten die relevanten Reflexionen an der Oberfläche ($x = 0$) (nach Abb. 3-1) auf, bei akustisch weichen Stoffen (z.B. „Heralan“, „Weißer Schaumstoff“) hingegen hinter der Probe an der schallharten Wand an der Stelle ($x = d$) (d ... Probendicke). Gleichung (3.29) für die Bestimmung der Stellen s_0 und Gl.(3.31) zur Bestimmung der Frequenzen f_0 der erwarteten Stehwellen-Nullstellen müssen daher für akustisch weiche Stoffe erweitert werden zu:

$$(s_0 + d) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot \lambda}{4} \quad \lambda = \frac{c_0}{f} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.32)$$

$$f_0 = \frac{c_0 \cdot (2 \cdot n - 1)}{4 \cdot (x_k + d)} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.33)$$

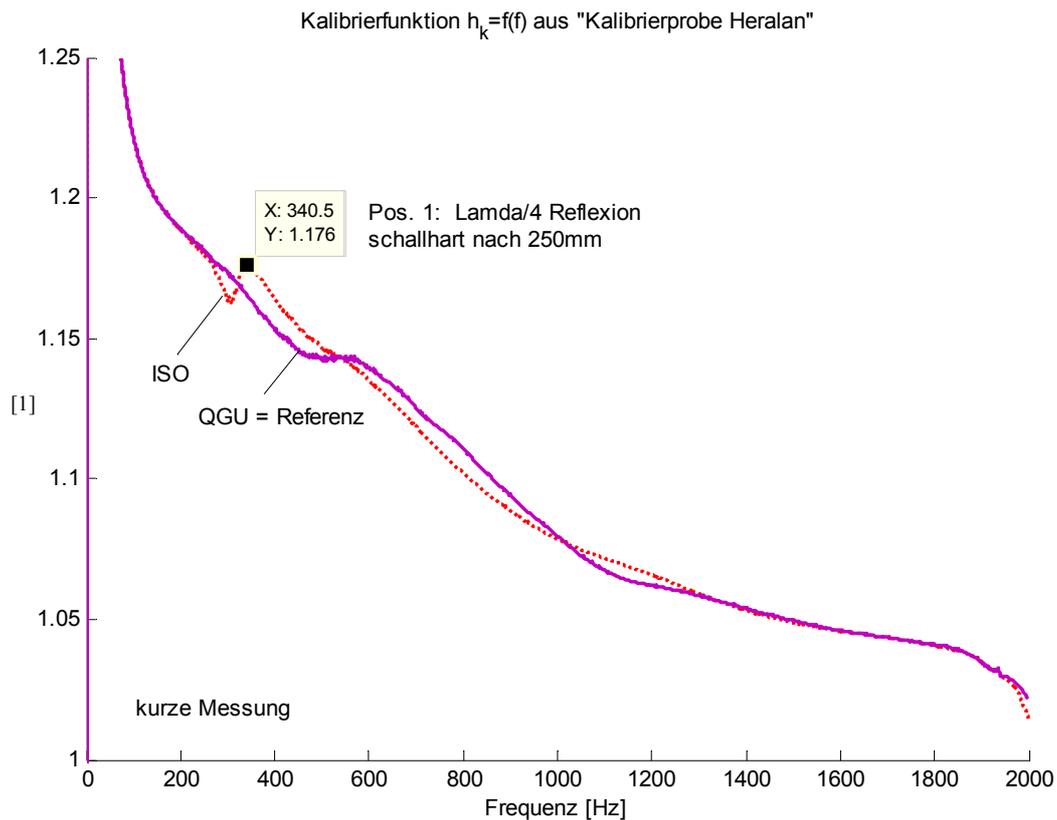


Abb. 3-8: Kalibrierfunktion „Kalibrierprobe Heralan 50mm“ Messung mit kurzem Mikrofonabstand

Abb. 3-8: Bei der mittels „Heralan 50mm“ bestimmten ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) tritt bei der Messung mit kurzem Mikrofonabstand eine Unstetigkeit bei 340Hz auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 200\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.32) im Abstand $(s_0 + d) = \lambda/4 = 250\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion hinter der Probe an der schallharten Wand. Unstetigkeiten bei Frequenzen höherer Ordnung ($n > 1$) treten nicht auf.

Die QGU-Kalibrierfunktion (violett—) zeigt keine erwartete Unstetigkeit bei 573Hz (aus $(s_0 + d) = \lambda/4 = 150\text{mm}$), die Probe absorbiert bei dieser Frequenz ausreichend und dient daher bei den weiteren Diagrammen als Referenz.

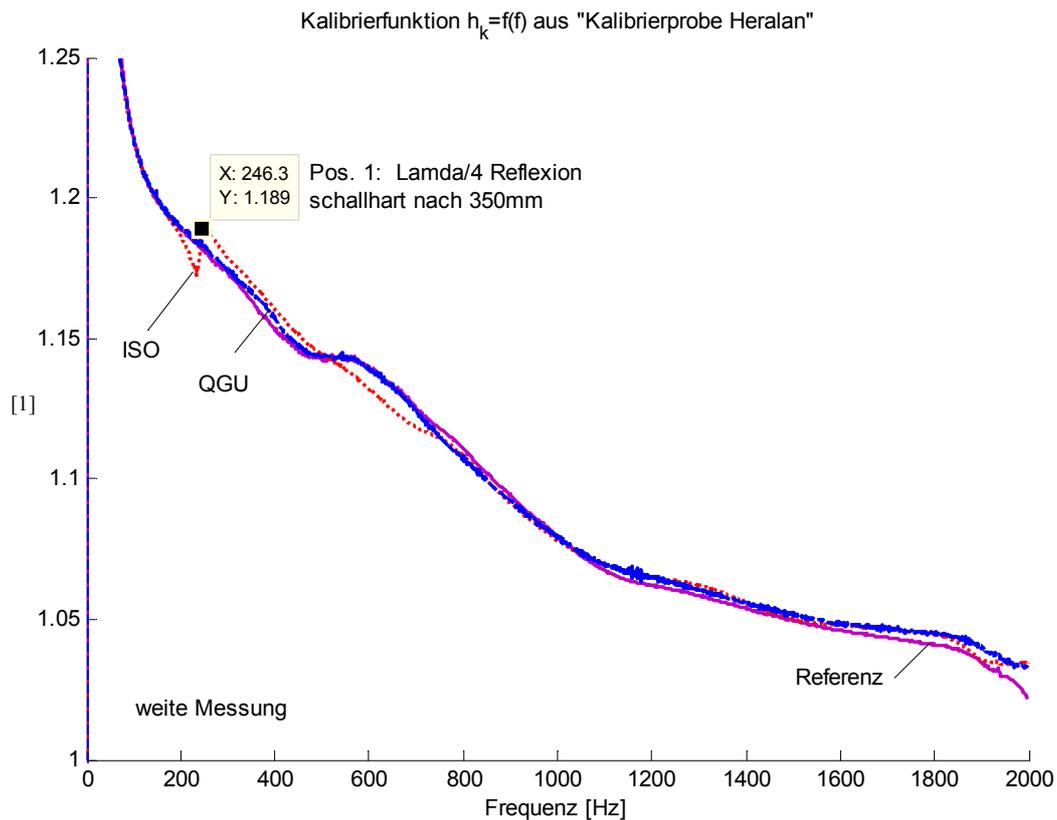


Abb. 3-9: Kalibrierfunktion „Kalibrierprobe Heralan 50mm“ Messung mit weitem Mikrofonabstand

Abb. 3-9: Bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand tritt eine Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 246Hz auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 300\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.32) im Abstand $(s_0 + d) = \lambda/4 = 350\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion auch hinter der Probe an der schallharten Wand. Unstetigkeiten bei Frequenzen höherer Ordnung ($n > 1$) treten nicht auf.

Die QGU-Kalibrierfunktion (blau----) zeigt auch bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand keine erwartete Unstetigkeit bei 573Hz (aus $(s_0 + d) = \lambda/4 = 150\text{mm}$).

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand).

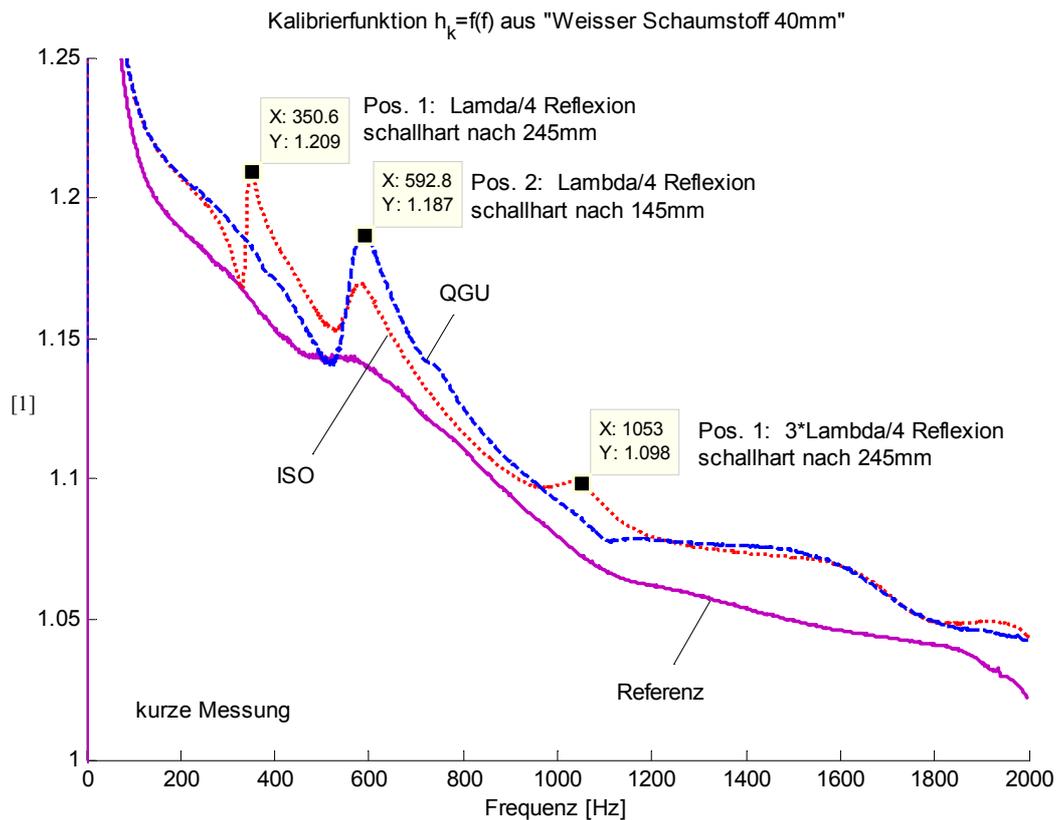


Abb. 3-10: Kalibrierfunktion „Weißer Schaumstoff 40mm“ Messung mit kurzem Mikrofonabstand

Abb. 3-10: Bei weißem Schaumstoff treten bei der Messung mit kurzem Mikrofonabstand bei 350Hz und bei 1053Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 200\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.32) für $\lambda/4$ bzw. $3\lambda/4$ im Abstand $(s_0 + d) = 245\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion hinter der Probe an der schallharten Wand. Die dritte (mittlere) Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 593 Hz entspricht dem geometrischen Mittel aus der in diesem Frequenzbereich stetigen QGU-Kalibrierfunktion in Position 1 ($x_1 = 200\text{mm}$), nach Gl.(3.11) und der un stetigen QGU-Kalibrierfunktion (blau----) Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$), nach Gl.(3.12) ermittelt. Folglich glättet die geometrische Mittelung die un stetige QGU-Kalibrierfunktion (blau----) im Frequenzbereich um 593Hz.

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) bei 593 Hz ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl. (3.32) einen Abstand $(s_0 + d) = \lambda/4 = 145\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion hinter der Probe an der schallharten Wand.

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand). Ein unterschiedliches Messdatum mit einer Neukalibrierung ist Grund für den Versatz zur Referenz.

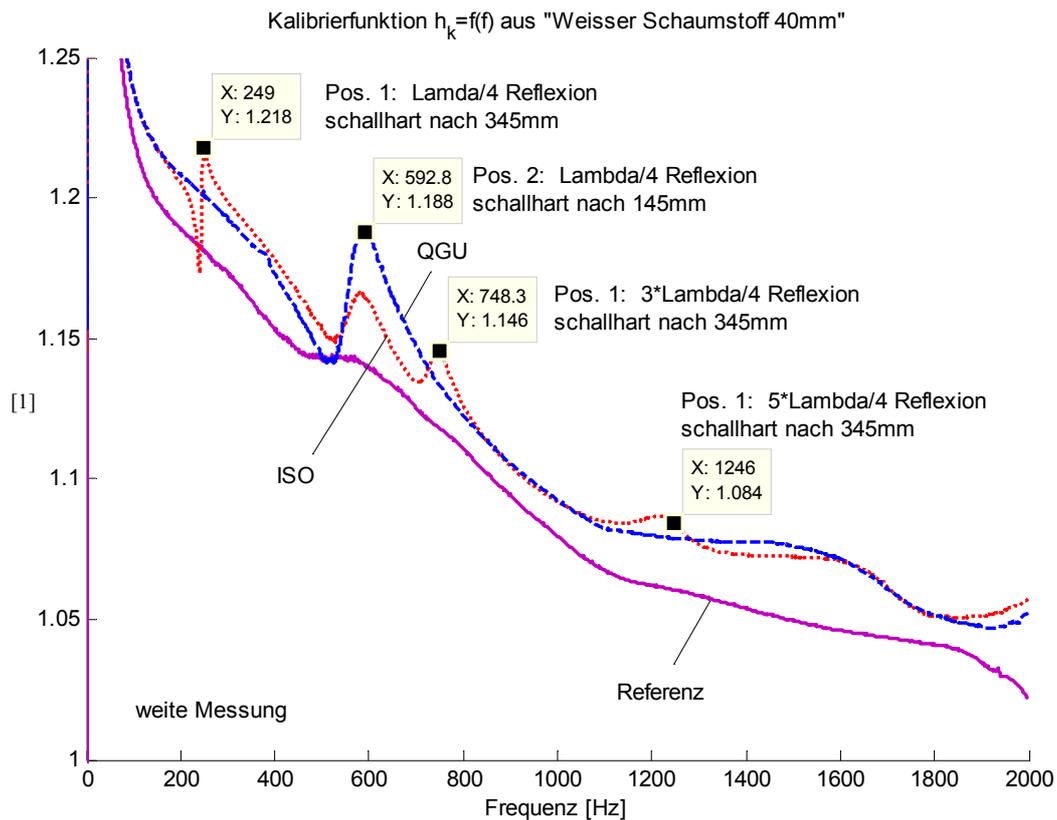


Abb. 3-11: Kalibrierfunktion „Weißer Schaumstoff 40mm“ Messung mit weitem Mikrofonabstand

Abb. 3-11: Bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand treten bei 350Hz, bei 748Hz und bei 1053Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 300\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.32) für $\lambda/4$, $3\lambda/4$ und $5\lambda/4$ im Abstand $(s_0 + d) = 345\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion hinter der Probe an der schallharten Wand. Die vierte Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 593 Hz verursacht wieder die geometrische Mittelung aus der in diesem Frequenzbereich stetigen QGU-Kalibrierfunktion in Position 1 (nun $x_1 = 300\text{mm}$), nach Gl.(3.11) und der unstetigen QGU-Kalibrierfunktion (blau----) Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$), nach Gl.(3.12) ermittelt. Auch hier wirkt die geometrische Mittelung glättend auf die unstetige QGU-Kalibrierfunktion (blau----) im Frequenzbereich um 593Hz.

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) liegt unverändert bei 593 Hz und ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl. (3.32) einen Abstand $(s_0 + d) = \lambda/4 = 145\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion hinter der Probe an der schallharten Wand.

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand). Auch hier: das unterschiedliche Messdatum mit einer Neukalibrierung ist Grund für den Versatz zur Referenz.

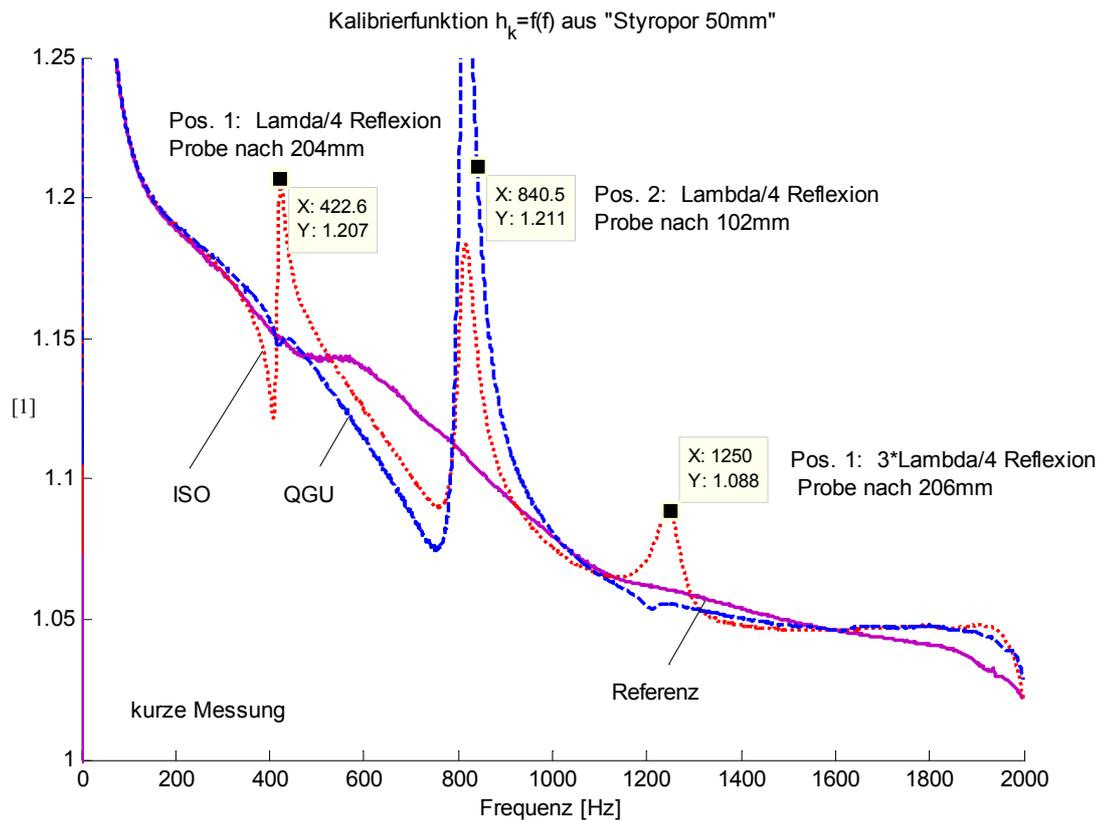


Abb. 3-12: Kalibrierfunktion „Styropor 50mm“ Messung mit kurzem Mikrofonabstand

Abb. 3-12: Bei Styropor treten bei der Messung mit kurzem Mikrofonabstand bei 422Hz und bei 1250Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 200\text{mm}$) erfolgt nun nach Gl.(3.29) für $\lambda/4$ bzw. $3\lambda/4$ im Abstand $s_0 = 205\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion nun an der Probenoberfläche. Die dritte (mittlere) Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 810Hz entspricht wieder der Glättung (durch die geometrische Mittelung) der QGU-Kalibrierfunktion (blau----).

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) bei 830Hz ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl.(3.29) einen Abstand $s_0 = \lambda/4 = 102\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion an der Probenoberfläche.

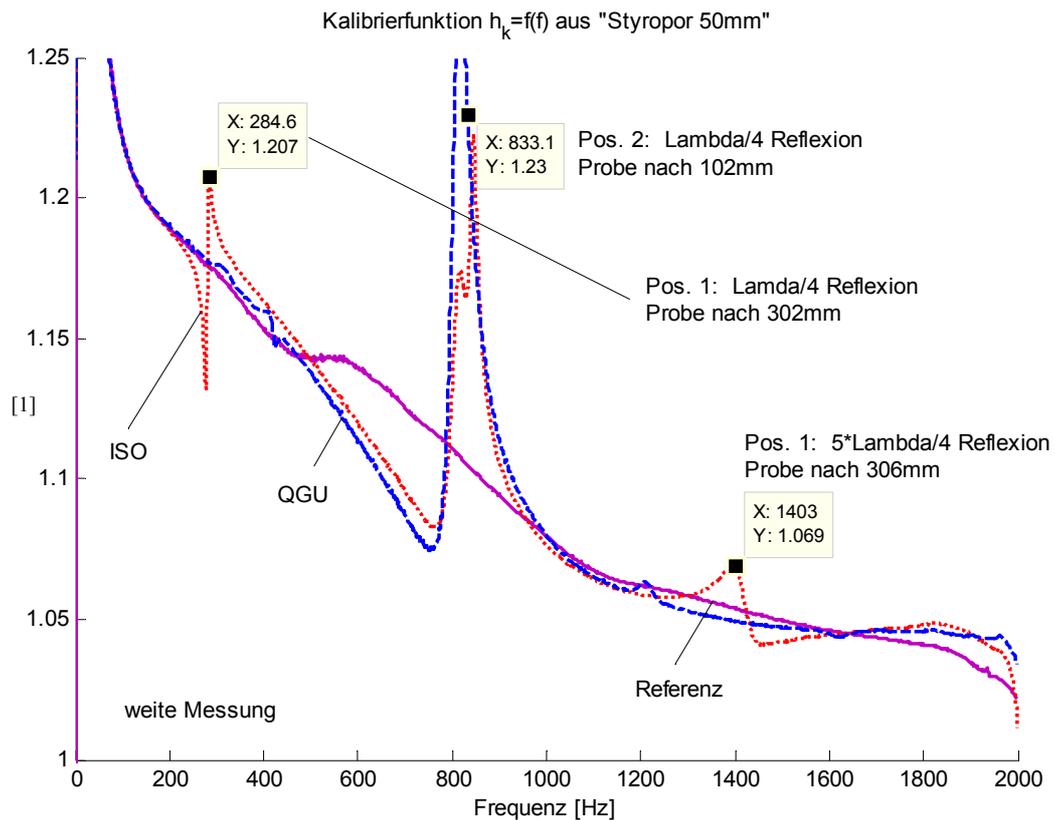


Abb. 3-13: Kalibrierfunktion „Styropor 50mm“ Messung mit weitem Mikrofonabstand

Abb. 3-13: Bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand treten bei 285Hz und bei 1403Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 300\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.29) für $\lambda/4$ und $3\lambda/4$ im Abstand $s_0=304\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion an der Probenoberfläche. Die dritte Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 810Hz entspricht wieder der Glättung (durch die geometrische Mittelung) der QGU-Kalibrierfunktion (blau----).

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) liegt unverändert bei 830 Hz und ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl. (3.29) einen Abstand $s_0 = \lambda/4 = 102\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion an der Probenoberfläche.

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand).

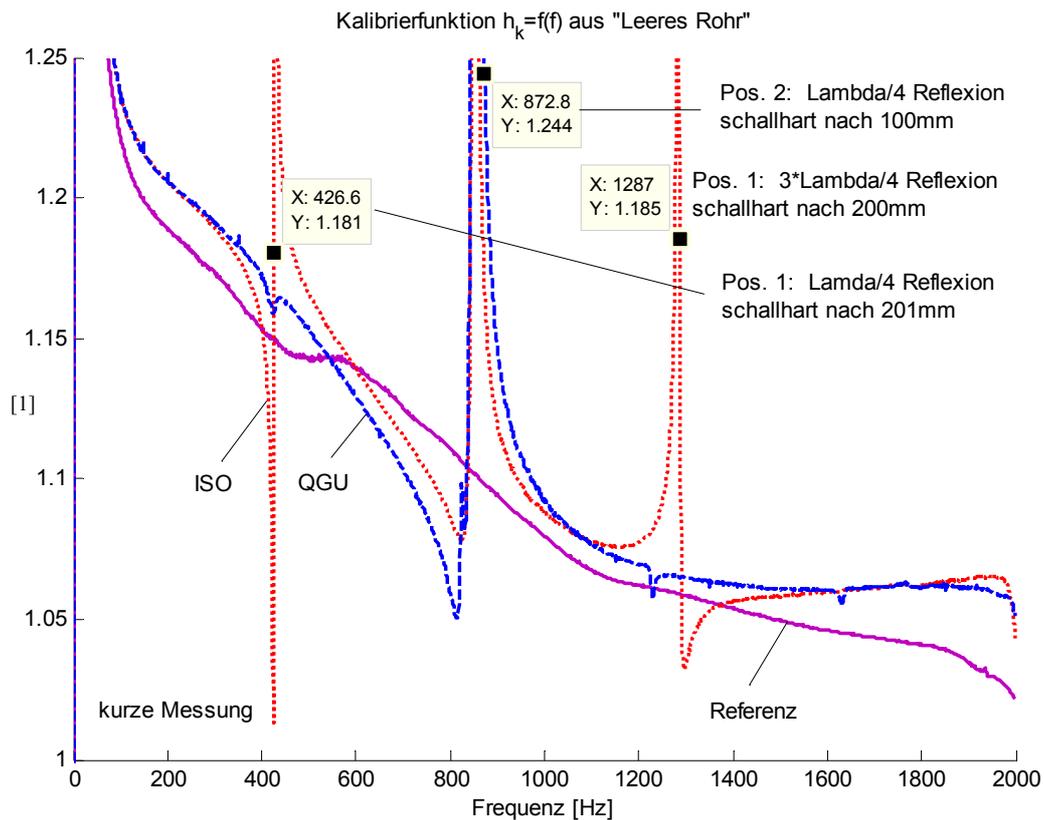


Abb. 3-14: Kalibrierfunktion „Leeres Rohr“ Messung mit kurzem Mikrofonabstand

Abb. 3-14: Bei der Messung mit kurzem Mikrofonabstand im leeren Rohr treten bei 426Hz und bei 1287Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 200\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.29) für $\lambda/4$ bzw. $3\lambda/4$ im Abstand $s_0 = 200\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion an der schallharten Wand an der Position $x = 0$. Die dritte (mittlere) Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 870Hz entspricht wieder der Glättung (durch die geom. Mittelung) der QGU-Kalibrierfunktion (blau----).

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) bei 860Hz ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl. (3.29) einen Abstand $s_0 = \lambda/4 = 100\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion an der schallharten Wand an der Position $x = 0$.

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand).

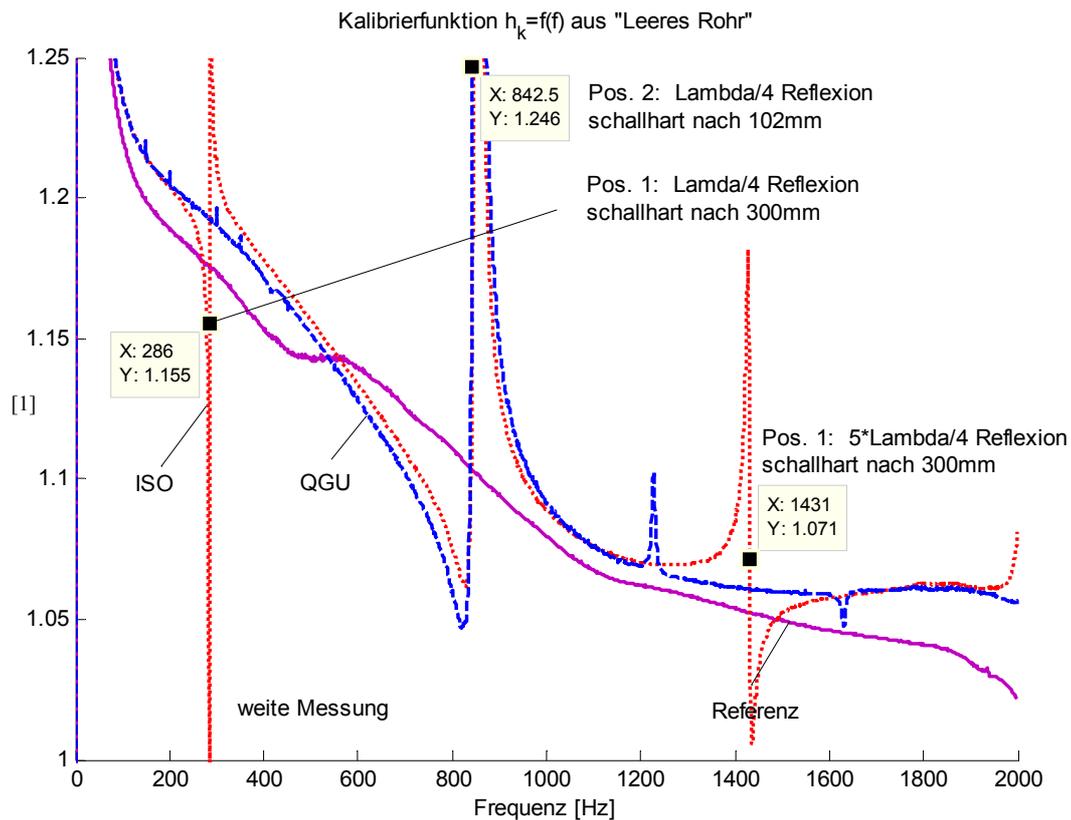


Abb. 3-15: Kalibrierfunktion „Leeres Rohr“ Messung mit weitem Mikrofonabstand

Abb. 3-15: Bei der Messung mit weitem Mikrofonabstand treten bei 286Hz und bei 1431Hz Unstetigkeiten der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) auf. Ausgehend vom Mikrofon in Position 1 ($x_1 = 300\text{mm}$) erfolgt nach Gl. (3.29) für $\lambda/4$ und $3\lambda/4$ im Abstand $x_0 = 300\text{mm}$ die verantwortliche Reflexion an der schallharten Wand an der Position $x = 0$. Die dritte Unstetigkeit der ISO-Kalibrierfunktion (rot·····) bei 845Hz entspricht wieder der Glättung (durch die geometrische Mittelung) der QGU-Kalibrierfunktion (blau----).

Die Unstetigkeit der QGU-Kalibrierfunktion (blau----) liegt unverändert bei 860 Hz und ergibt ausgehend vom Mikrofon in Position 2 ($x_2 = 100\text{mm}$) nach Gl. (3.29) einen Abstand $s_0 = \lambda/4 = 102\text{mm}$ für die verantwortliche Reflexion an der der schallharten Wand an der Position $x = 0$.

(Referenz (violett—): „Heralan 50mm“ QGU Messung mit kurzem Mikrofonabstand).

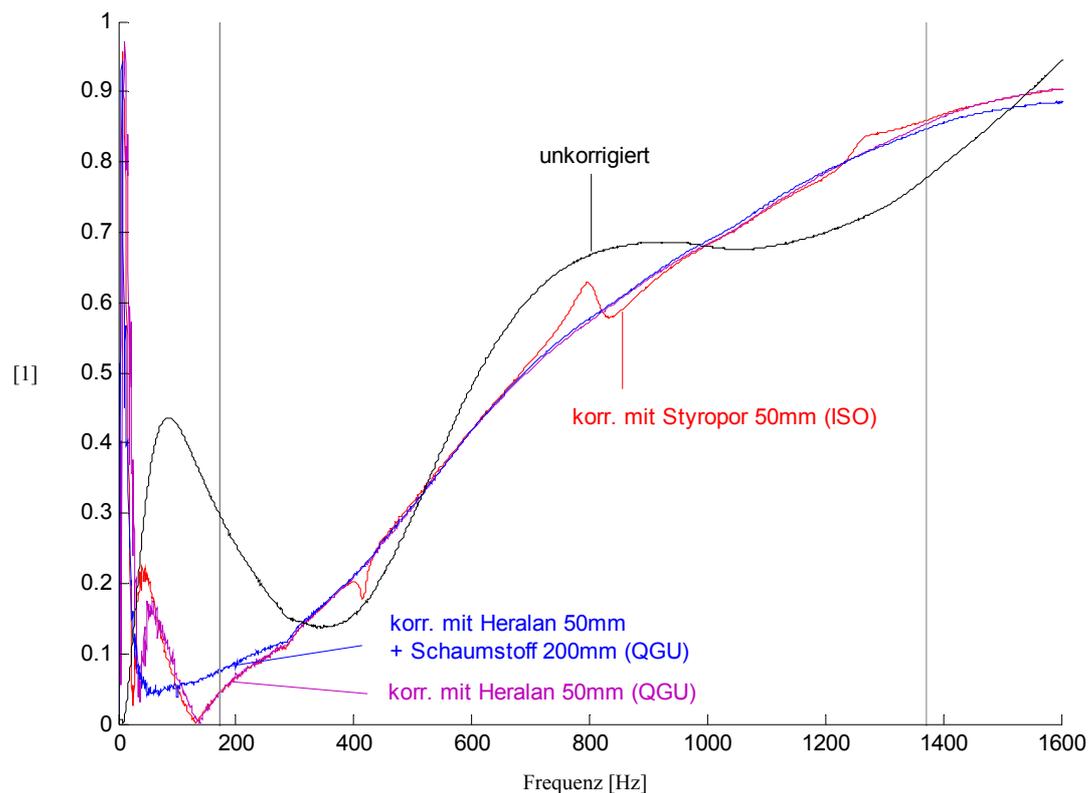


Abb. 3-16: Weißer Schaumstoff 40mm – Absorptionsgrad unterschiedlich korrigiert

Abb. 3-16: Wird nun die zunächst unkorrigierte Übertragungsfunktion einer Probe mit verschiedenen, aus unterschiedlichen Absorbieren bestimmten Kalibrierfunktionen korrigiert, so erkennt man beim Betrachten der daraus berechneten akustischen Kenngrößen ein Annähern an den wahren Wert mit zunehmenden Absorptionseigenschaften der verwendeten Kalibrierprobe.

Der Absorptionsgrad von „Weißer Schaumstoff 40mm“ mit der ISO-Kalibrierfunktion „Styropor 50mm“ korrigiert zeigt noch typische Abweichungen an den unstetigen Stellen der ISO-Kalibrierfunktion. Mit der Standard-QGU-Kalibrierprobe „Heralan 50mm“ erreicht man bereits eine sehr gute Annäherung im gültigen Frequenzbereich (markiert bei 172Hz...1373Hz) an das Ergebnis, das eine 250mm lange Kalibrierprobe liefert.

Die Messergebnisse in Abb. 3-8 bis Abb. 3-15 bestätigen die im Kapitel 3.3.4 aufgrund der Simulation aufgestellten theoretischen Betrachtungen.

Wurde nun mittels eines geeignet akustisch weichen Absorbers (z.B. Heralan 50mm oder Melaminharzschaum 100mm) die Kalibrierfunktion bestimmt, so kann diese für mehrere Stunden als zeitinvariant angenommen werden. Beobachtungen über einen längeren Zeitraum zeigten nur unwesentliche Veränderungen und bestätigten diese Annahme. Trotzdem kann es, wie die Beispiele „Weißer Schaumstoff“ Abb. 3-10 und Abb. 3-11 zeigen, nach dem unbeabsichtigten Verändern der Signalkette (siehe Kap.3.3) zu einem Versatz kommen.

3.3.5 Vergleich von Kalibrierproben für 4-mic-Messungen

Die Erkenntnisse aus Kap. 3.3.4 „Vergleich von Kalibrierproben für 2-mic-Messungen“ können nun auf 4-mic-Messungen übertragen werden um die geforderten akustischen Eigenschaften einer Kalibrierprobe für 4-mic-Messungen zu präzisieren. Beim Kalibrieren stören auch hier die Reflexionen.

Reflexionen treten an der linken und rechten Lautsprechermembran sowie an der linken und rechten Probenoberfläche auf und verursachen hier die in Kap. 3.3.4 beschriebenen Stehwellen und Resonanzen.

Die geometrischen Verhältnisse im linken Rohrteil („*upstream*“) bleiben unverändert. Die Mikrofone A&B sind optimal positioniert, erwartete Stehwellen-Nullstellen der Stehwellen fallen wieder mit den Rohrresonanzen zusammen (siehe Gl.(3.30)).

Im rechten Rohrteil („*downstream*“) sind die Verhältnisse weniger ideal da die Abstände von den Mikrofonen C&D zur Probenoberfläche von der Probendicke l abhängig sind (siehe Abb. 3-1). Die Abstände x_3, x_4 der Mikrofone C&D vom Bezugspunkt sind vom Rohraufbau vorgegeben, die Abstände von den Mikrofonen zur Probe errechnen sich aus $s_C = x_3 - l$ bzw. $s_D = x_4 - l$. Die aufgrund der Stehwellen erwarteten Stehwellen-Nullstellen treten wieder nach Gl. (3.29) an den Stellen s_0 von der Reflexionsfläche entfernt auf:

$$s_0(n, \lambda) = \frac{(2 \cdot n - 1) \cdot \lambda_0}{4} \quad \lambda_0 = \frac{c_0}{f_0} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.34)$$

Auch zum Berechnen der Resonanzen kann die Gleichung (3.27) für die 4-mic-Methode übernommen werden:

$$f_{res}(n, L) = \frac{n \cdot c_0}{2 \cdot L} \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.35)$$

Es ist aber zu unterscheiden welche Rohrlänge L man als resonierend ansieht. Bei akustisch harten Proben (Styropor, Heraklith etc.) werden im linken Rohrteil („*upstream*“) dieselben Resonanzen wie bei der 2-mic-Methode auftreten. Bei Beschallung von rechts wirkt der Rohrabschnitt von rechter Probenoberfläche bis zur rechten Lautsprechermembran als Resonator. Für akustisch weiche Proben (Heralan, dünner Schaumstoff etc.) ist jedoch das gesamte Messrohr als Resonator anzusehen. Die Probe beeinflusst dann die Ausbildung der einzelnen Resonanzmoden. Ein Optimieren der Mikrofonpositionen durch Zusammenlegen der Stehwellen-Nullstellen mit den Rohrresonanzen in Anlehnung an Gl. (3.30) ist daher nicht möglich.

Nimmt man an den Mikrofonpositionen Stehwellen-Nullstellen an so lassen sich nach (3.34) die zugehörigen Frequenzen $f_0(s_0, m)$, bei denen Unstetigkeiten in der Kalibrierfunktion zu erwarten sind, abhängig von den Moden m bestimmen:

$$f_0(s_0, m) = \frac{m \cdot c_0}{4 \cdot s_0} \quad m = (2 \cdot n - 1) \quad n \in \mathbb{N}^+ \quad (3.36)$$

Tab. 4 gibt einen Überblick der vorkommenden Abstände s_0 zwischen den Mikrofonen und den reflektierenden Flächen:

LL...Lautsprecher links, LR...Lautsprecher rechts,
 PL...Probe linke Oberfläche, PR...Probe rechte Oberfläche

und den nach Gl. (3.36) berechneten Frequenzen f_0 für die zu erwartenden Unstetigkeiten. Diese Frequenzen werden in den weiteren Diagrammen Abb. 3-18 bis Abb. 3-26 am oberen Rand farblich markiert. Auftretende Unstetigkeiten bei diesen Frequenzen werden anhand Abb. 3-23 und Abb. 3-24 klassifiziert und in Tab. 4 vermerkt:

++...starkes, +...mäßiges, ~...geringes, -...kein Auftreten

Mikrofon-Position ¹	Farbe	f_0 [Hz]	m [* $\lambda/4$]	S_0 [mm]	Ref. an	Vergl. Unstetigkeiten	
						ISO Abb. 3-24	QGU Abb. 3-23
2	s	269	1	320	LL	~	-
1	s	391	1	220	LL	-	-
2	s	806	3	320	LL	++	~
1	s	1173	3	220	LL	++	-
2	s	1344	5	320	LL	++	-
1	s	1955	5	220	LL	++	-
3	r	232	1	370	LR	~	-
4	r	319	1	270	LR	-	-
3	r	697	3	370	LR	++	-
4	r	956	3	270	LR	++	-
3	r	1162	5	370	LR	++	-
4	r	1593	5	270	LR	++	-
1	g	430	1	200	PL	~	+
2	g	860	1	100	PL	-	-
1	g	1290	3	200	PL	~	-
4	b	337	1	255	PR	+	~
3	b	555	1	155	PR	++	~
4	b	996	3	259	PR	++	+
4	b	1660	5	259	PR	~	+
3	b	1665	3	155	PR	-	-

Tab. 4 Übersicht – Reflexionen im Messrohr / 4-mic-Methode

Nach Tab. 3-2 unterscheidet man Kalibrierfunktionen ermittelt in:

- beschallungszugewandten Bezugspositionen $BP = 1, 3, 6, 8$ - die Mikrofone liegen zwischen aktivem Lautsprecher und der Probe, Reflexionen an der Probenoberfläche verursachen die Unstetigkeiten in der Kalibrierfunktion.

¹ Messung mit kurzem Mikrofonabstand: die Positionen 1, 2, 3, 4 entsprechen den Mikrofonöffnungen 2, 3, 4, 5

- beschallungsabgewandten Bezugspositionen $BP = 2, 4, 5, 7$ - die Mikrofone liegen zwischen Probe und passivem Lautsprecher, Reflexionen am passiven Lautsprecher verursachen die Unstetigkeiten in der Kalibrierfunktion.

In den folgenden Messdiagrammen Abb. 3-18 bis Abb. 3-26 ist zu erkennen:

- das gute Übereinstimmen der gemessenen mit den in Tab. 4 erwarteten Unstetigkeiten (in den Messdiagrammen Abb. 3-18 bis Abb. 3-26 am oberen Rand farbig markiert)
- beschallungsabgewandte Bezugspositionen liefern stark unstetige Kalibrierfunktionen, da der passive Lautsprecher gut reflektiert ($RF=0.7...0.9$). Die akustischen Eigenschaften der eingesetzte Kalibrierprobe hat nahezu keinen Einfluss auf die Unstetigkeiten, da deren Ursache in den Reflexionen am passiven Lautsprecher liegt.
- beschallungszugewandte Bezugspositionen verursachen hingegen weniger Unstetigkeiten, da die Kalibrierprobe wesentlich weniger als der passive Lautsprecher reflektiert, hier bewirken gut absorbierenden Kalibrierproben die Abnahme der Unstetigkeiten. Gut reflektierende Kalibrierproben (Styropor) verursachen jedoch erwartungsgemäß markante Unstetigkeiten.

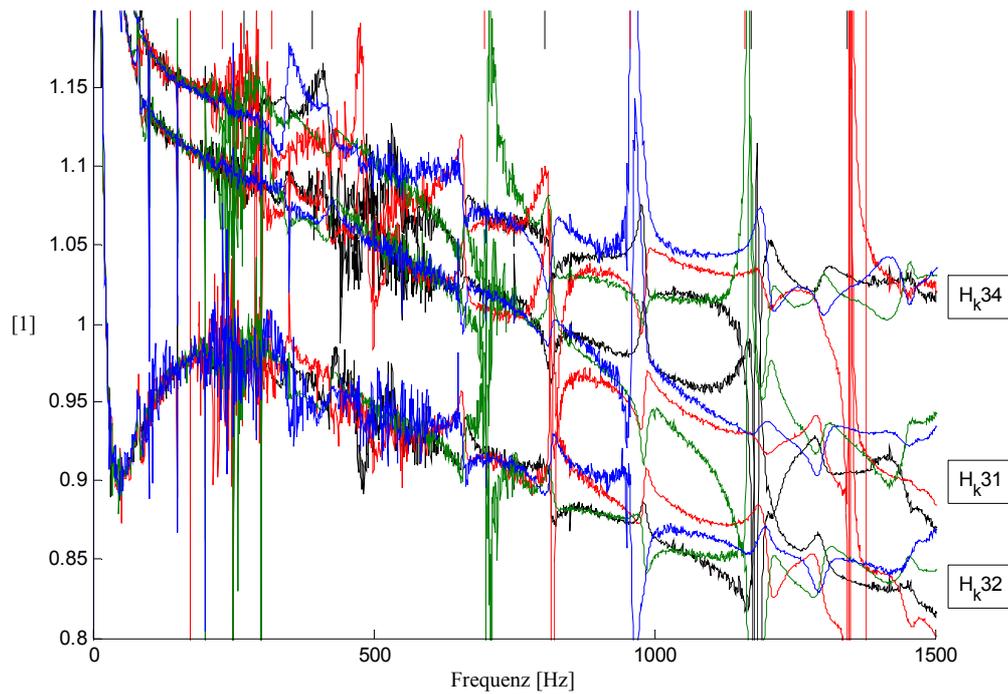


Abb. 3-17: Styropor - QGU - Kalibrierfunktionen beschallungsabgewandt, BP=2(s), 4(r), 5(g), 7(b)

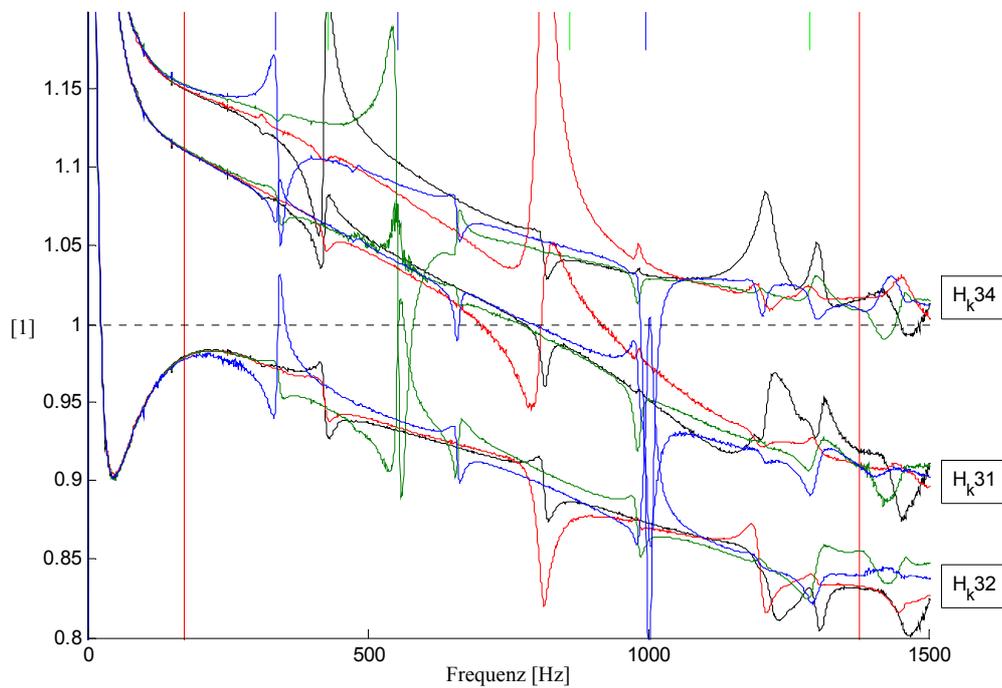


Abb. 3-18: Styropor - QGU - Kalibrierfunktionen beschallungszugewandt, BP=1(s), 3(r), 6(g), 8(b)

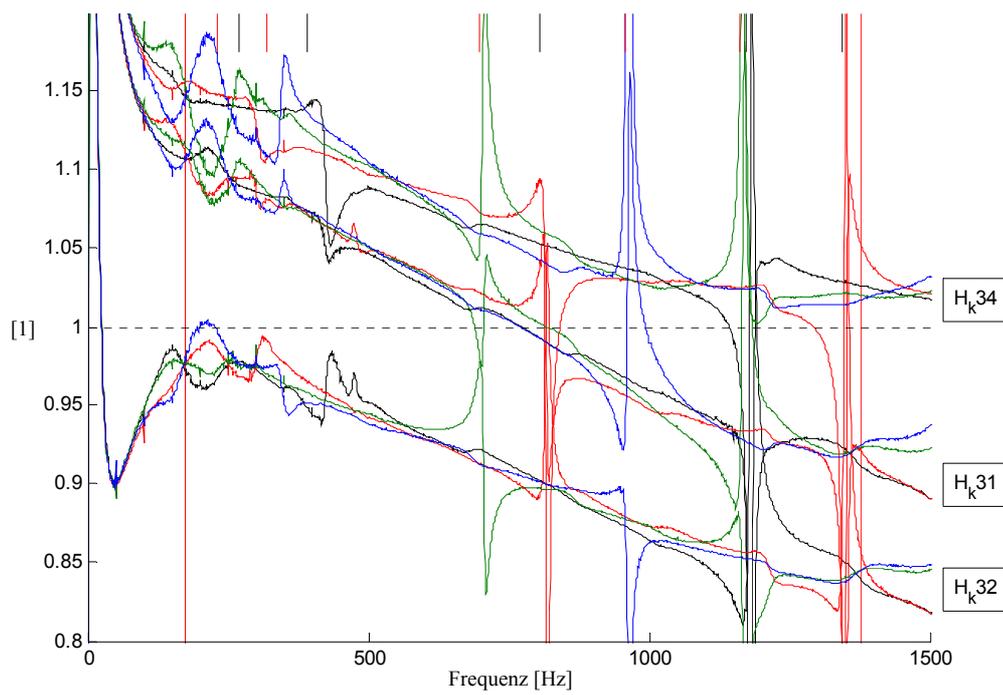


Abb. 3-19: weißer Schaumstoff - QGU – Kalibrierfkt. beschallungsabgewandt, BP=2(s), 4(r), 5(g), 7(b)

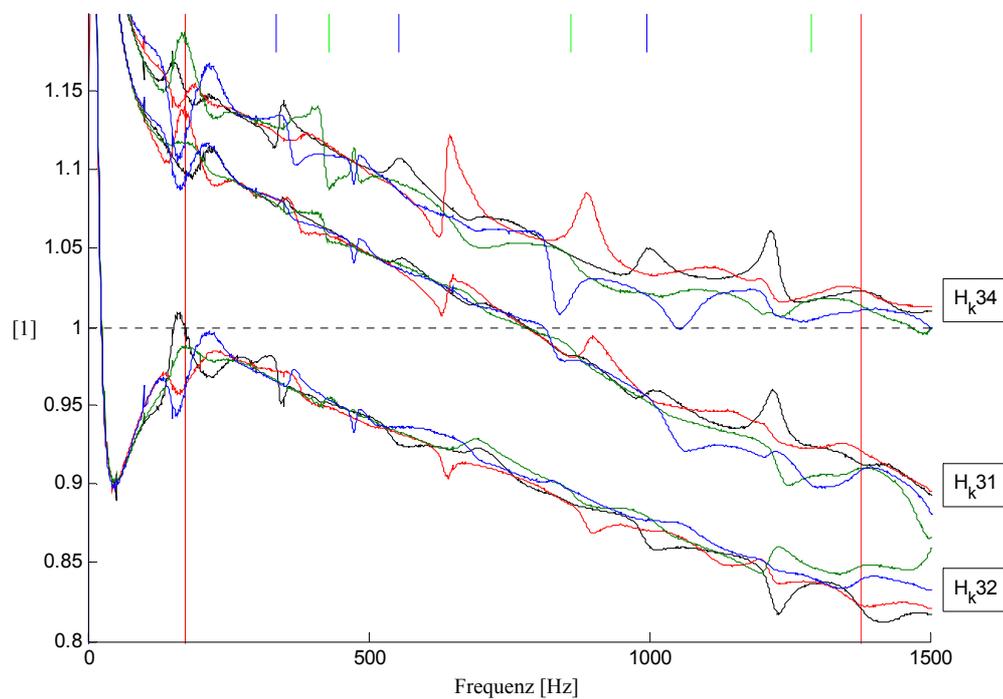


Abb. 3-20: weißer Schaumstoff - QGU – Kalibrierfkt. beschallungszugewandt, BP=1(s), 3(r), 6(g), 8(b)

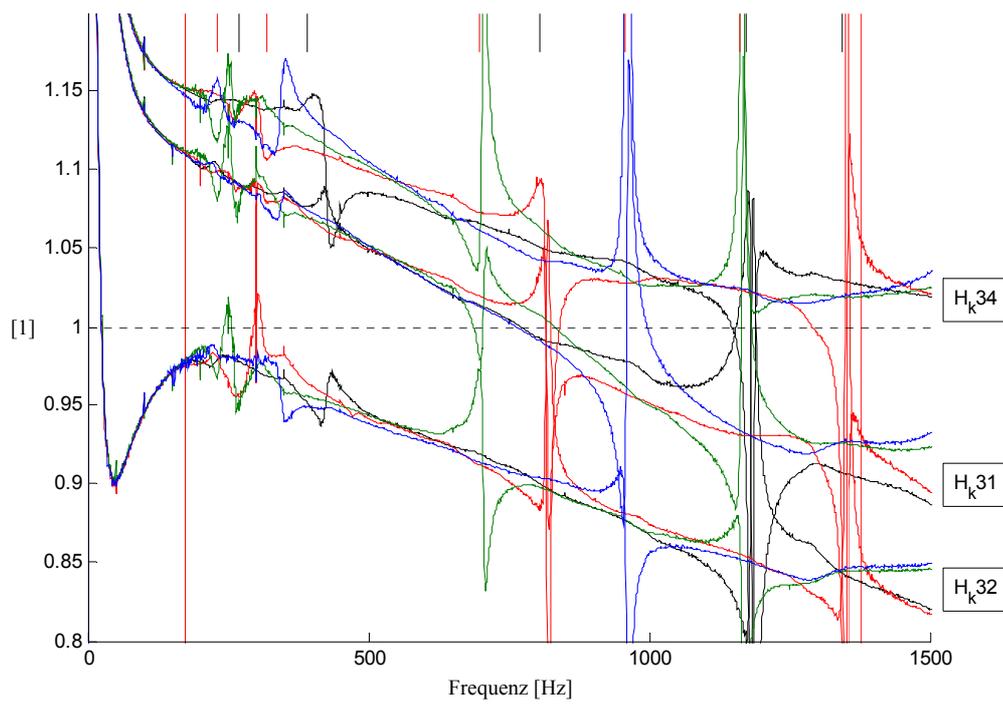


Abb. 3-21: Heralan - QGU - Kalibrierfunktionen beschallungsabgewandt, BP=2(s), 4(r), 5(g), 7(b)

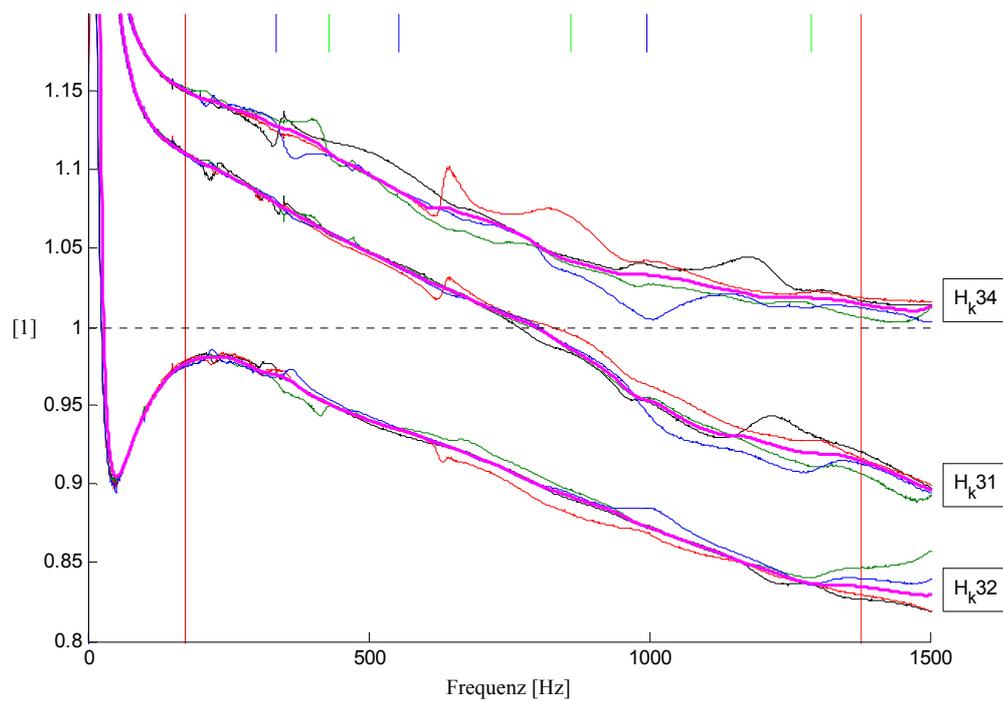


Abb. 3-22: Heralan - QGU - Kal.fkt. beschallungszug. mit Medianwert (violett), BP=1(s), 3(r), 6(g), 8(b)

Zu Abb. 3-21: Eine akustisch weiche Kalibrierprobe (wie hier Heralan) liefert in den vier beschallungsabgewandten Bezugspositionen keine wesentlich geringeren Unstetigkeiten als z.B. das akustisch harte Styropor in Abb. 3-17. Die Unstetigkeiten werden nur vom (unveränderten) Reflexionsverhalten des jeweils passiven Lautsprecher verursacht und zeigen daher weder eine Abhängigkeit von der Probe noch vom Pegel im Rohr.

Zu Abb. 3-22: Eine akustisch weiche Kalibrierprobe (wie hier Heralan) liefert in den vier beschallungszugewandten Bezugspositionen die Kalibrierfunktionen mit den geringsten Unstetigkeiten. Eine klare Bevorzugung einer Kalibrier-Bezugsposition wie bei der 2-mic-Methode kann jedoch nicht erfolgen. Auftretende Unstetigkeiten („Ausreißer“) werden durch das Bilden des Medianwertes eliminiert (in den nun folgenden Abbildungen als Referenz violett dargestellt).

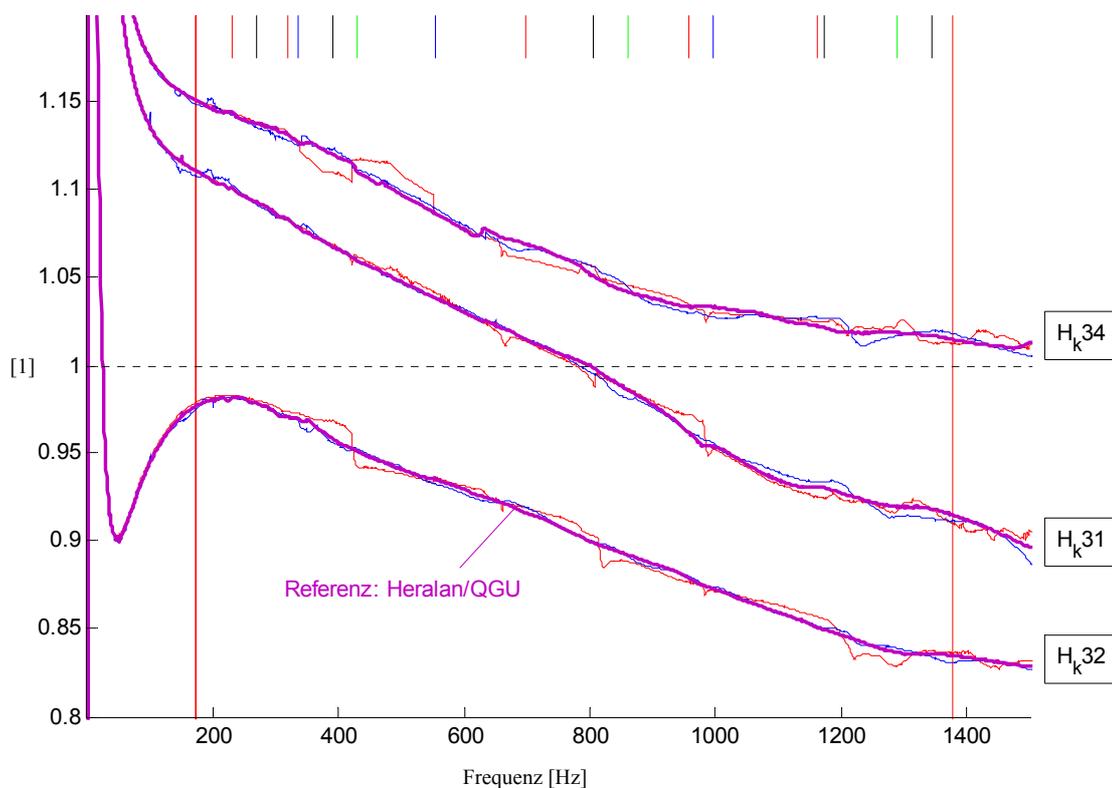


Abb. 3-23: 3 Proben; Medianwert der QGU - Kalibrierfunktionen beschallungszugewandt

In Abb. 3-23 sind die auf diese Weise gemittelten Kalibrierfunktionen dreier Materialien dargestellt. „Styropor –rot“ und „weißer Schaumstoff –blau“ zeigen noch deutliche Unstetigkeiten, „Heralan –violett“ als Referenz erscheint genügend glatt. Die Übereinstimmungen mit der am oberen Diagrammrand eingetragenen erwarteten Unstetigkeiten sind in Tab. 4 vermerkt.

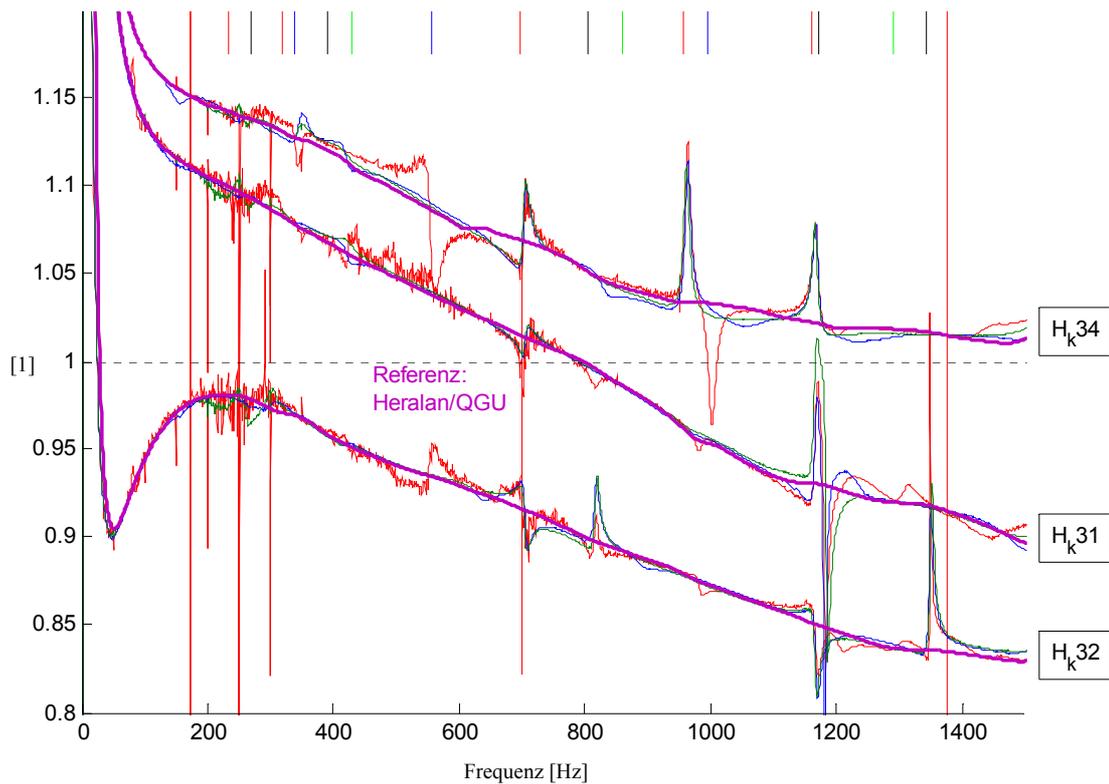


Abb. 3-24: 3 Proben; Geom. Mittelwert der QGU–KaFuen aller Positionen = ISO-KaFuen

Abb. 3-24 zeigt zum Vergleich die in Anlehnung an die ISO-Norm ermittelten Kalibrierfunktionen derselben drei Stoffe. Der Definition nach Gl.(3.19) bis (3.21) werden die Kalibrierfunktionen aus Übertragungsfunktionen „über die Probe hinweg“ berechnet. Daher gehen auch die stark un stetigen Kalibrierfunktionen aller beschallungsabgewandten Bezugspositionen in das Ergebnis ein. Auch hier wurden die Übereinstimmungen mit der am oberen Diagrammrand eingetragenen erwarteten Unstetigkeiten in Tab. 4 vermerkt.

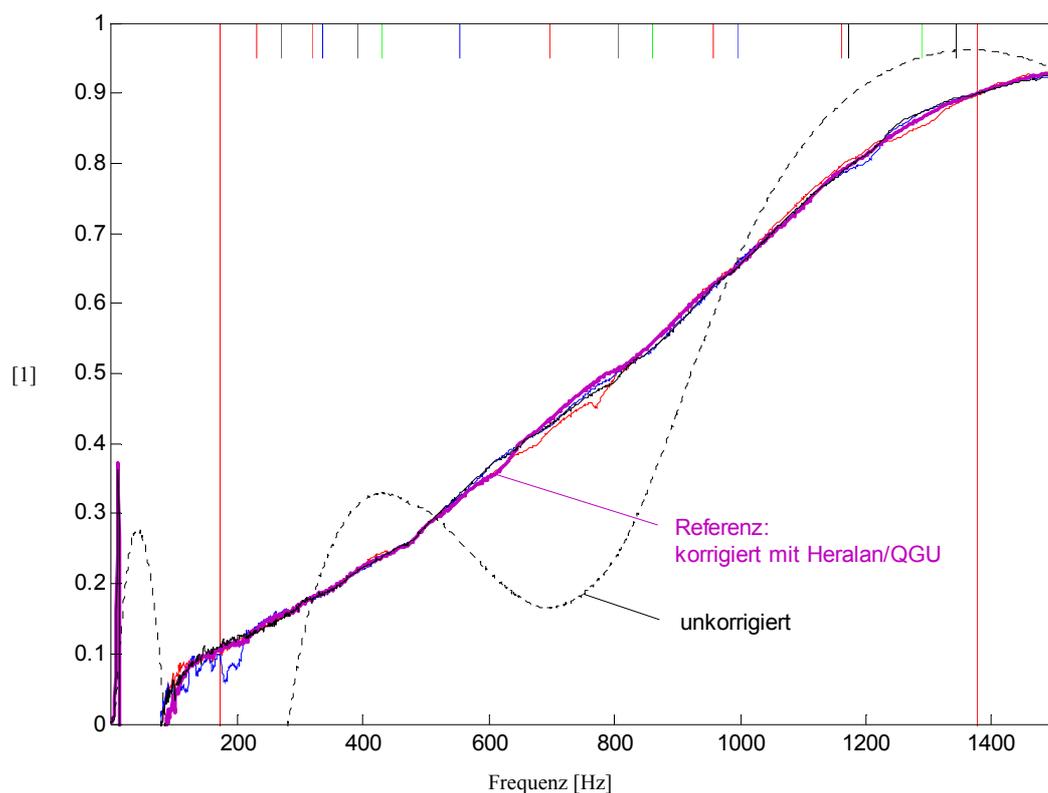


Abb. 3-25: Absorptionsgrad „Bunter Schaumstoff“ – mit 3 verschiedenen QGU-KaFuen – korrigiert

Abb. 3-25 Schließlich wurde der Absorber „Bunter Schaumstoff“ mittels der in Abb. 3-23 dargestellten QGU-Kalibrierfunktionen korrigiert. Angezeigt wird der Absorptionsgrad des unkorrigierten Absorbers (schwarz), sowie der Absorptionsgrad korrigiert mit den QGU-Kalibrierfunktionen „Eigenkorrektur –schwarz“, „Styropor –rot“, „weißer Schaumstoff –blau“, „Heralan –violett“. Die Ergebnisse zeigen kaum Unterschiede.

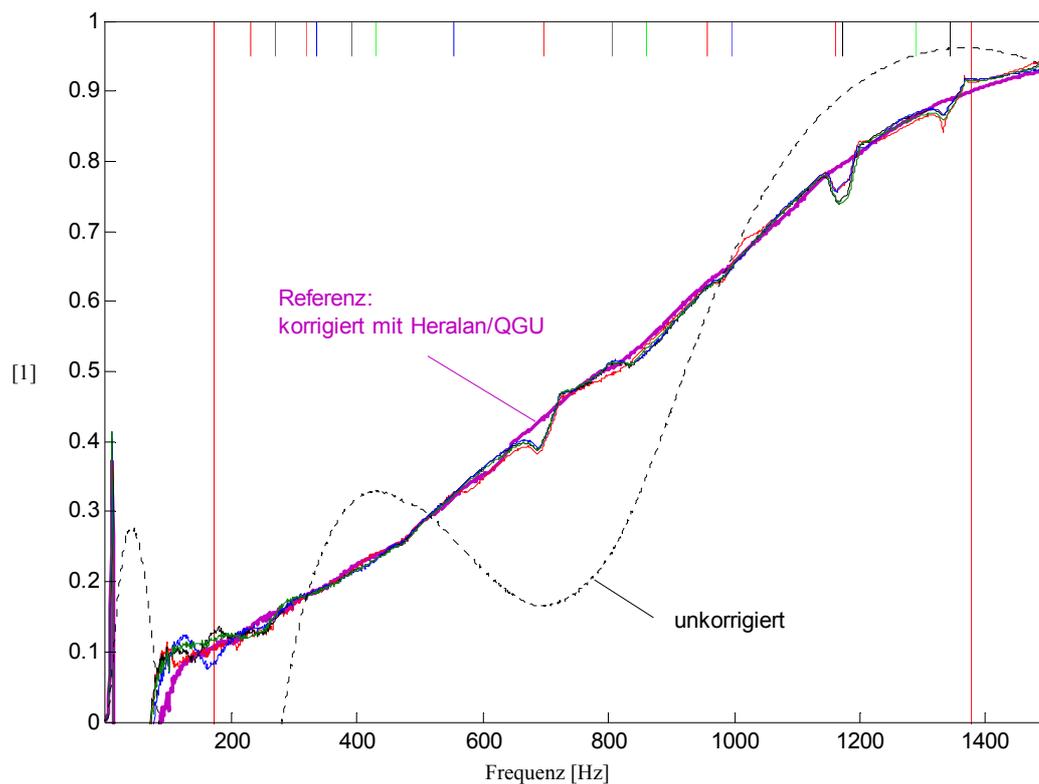


Abb. 3-26: Absorptionsgrad „Bunter Schaumstoff“ - mit 3 verschiedenen ISO-KaFuen – korrigiert

Abb. 3-26 Zum Vergleich wieder der Absorber „Bunter Schaumstoff“ mittels der in Abb. 3-24 dargestellten ISO-Kalibrierfunktionen korrigiert. Angezeigt wird wieder der Absorptionsgrad des unkorrigierten Absorbers (schwarz), sowie der Absorptionsgrad korrigiert mit den ISO-Kalibrierfunktionen „Eigenkorrektur –schwarz“, „Styropor –rot“, „weißer Schaumstoff –blau“, „Heralan –grün“, zusätzlich als Referenz korrigiert mit der QGU-Kalibrierfunktion „Heralan –violett“. Zu erkennen sind Unstetigkeiten im Bereich von 697Hz (nach Tab. 4 von Reflexionen am rechten Lautsprecher (LR) herrührend), bei 1162Hz (LR) und 1173Hz (LL), sowie bei 1344Hz (LR).

Konklusion:

Sowohl die betrachteten Kalibrierfunktionen (siehe Tab. 4, Spalte „Vergl. Unstetigkeiten“) als auch die berechneten Materialparameter (Abb. 3-25 u. Abb. 3-26) erscheinen QGU-korrigiert glatter als bei Korrektur in Anlehnung an die ISO-Norm. Bei 4-mic-Messungen ist daher die Kalibriermethode am quasi gleichen Umfang (QGU) zu bevorzugen.

3.3.6 Auswahl einer geeigneten Kalibrierprobe

Im vorigen Kapitel 3.3.6 zeigten Stoffe mit gutem Absorptionsvermögen keine störenden Unstetigkeiten in den QGU-Kalibrierfunktionen. Stehen mehrere Proben zur Auswahl so ist zum Kalibrieren mittels 2-mic- oder 4-mic-Messungen jene mit den besten Tiefen-Absorptionseigenschaften (bis etwa 800Hz) zu bestimmen. Auch auf die mechanische Festigkeit ist zu achten. Heralan wäre zum Kalibrieren gut, die Probe zerfällt aber nach mehrmaligem Einsetzen und verursacht Juckreiz. Bedeutend langlebiger erweist sich 100mm

dicker Melaminharzschaum (siehe Foto Abb. 7-1/Nr.1 und Absorptionsgradmessung Kap.7.1.3.).

3.4 Mittelung

Die Gleichungen Gl.(3.8), Gl.(3.14)...Gl.(3.16) liefern nur unter idealen Bedingungen exakte Ergebnisse. In der Praxis sind die aufgezeichneten Signale durch Störsignale beeinträchtigt, so dass vielfach drei Varianten (Gleichungen (3.37)...(3.39)) für die Berechnung der Übertragungsfunktionen eingesetzt werden, bei denen durch Mittelung über B Leistungsspektren nicht korrelierte Signalanteile unterdrückt werden.

Durch Erweiterung der Gl.(3.8) mit dem Quotienten der konjugiert komplexen Spektren $\underline{p}_i^*(x_1, f) / \underline{p}_i^*(x_1, f)$ und arithmetische Mittelung über

$$\begin{array}{ll} B & \text{Kreuzleistungsspektren} \quad S_{12,i} \text{ u. } S_{21,i} \quad \text{sowie} \\ B & \text{Autoleistungsspektren} \quad S_{11,i} \text{ u. } S_{22,i} \end{array}$$

erhält man:

$$H_{12,1} = \frac{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_2, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_1, f)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_1, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_1, f)} = \frac{\sum_{i=1}^B S_{12,i}}{\sum_{i=1}^m S_{11,i}} = \frac{\overline{S}_{12}}{\overline{S}_{11}} \quad (3.37)$$

Diese Beziehung wird verwendet, wenn die Größe $\underline{p}(x_1, f)$ störungsfreier als $\underline{p}(x_2, f)$ ermittelt werden kann.

Durch Erweiterung der Gl.(3.8) mit dem Quotienten der konjugiert komplexen Spektren $\underline{p}_i^*(x_2, f) / \underline{p}_i^*(x_2, f)$ und arithmetische Mittelung über B Leistungsspektren erhält man:

$$H_{12,2} = \frac{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_2, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_2, f)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_1, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_2, f)} = \frac{\sum_{i=1}^B S_{22,i}}{\sum_{i=1}^B S_{21,i}} = \frac{\overline{S}_{22}}{\overline{S}_{21}} = \frac{\overline{S}_{22}}{\overline{S}_{12}^*} \quad (3.38)$$

Diese Beziehung wird angewendet, wenn die Größe $\underline{p}(x_2, f)$ störungsfreier als $\underline{p}(x_1, f)$ ermittelt werden kann.

Kann weder die Größe $\underline{p}(x_1, f)$ noch die Größe $\underline{p}(x_2, f)$ störungsfrei ermittelt werden so ist der geometrische Mittelwert aus $H_{12,1}$ und $H_{12,2}$ zu bilden:

$$\boxed{H_{12} = \sqrt{H_{12,1} \cdot H_{12,2}}} \quad (3.39)$$

Sind jedoch die Drucksignale $\underline{p}_i(x_1, f)$ und $\underline{p}_i(x_2, f)$ vollständig kohärent, so gilt

$$H_{12} = H_{12,1} = H_{12,2}$$

Beim aufgebauten Messsystem kann keine der Messgrößen $\underline{p}(x, f)$ als „störungsfreier“ betrachtet werden, andererseits sind sie im hohen Maße kohärent, folglich liefern Gl.(3.37) bis (3.39) annähernd gleiche Ergebnisse. Analog zu Gl.(3.37) ergibt sich aus Gl.(3.14) bis Gl.(3.16) für die 4-Mikrofon-Übertragungsfunktionen H_{31} , H_{32} , H_{34} :

$$\boxed{H_{31} = \frac{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_1, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_3, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)} = \frac{\sum_{i=1}^B S_{31,i}}{\sum_{i=1}^m S_{33,i}} = \frac{\overline{S}_{31}}{\overline{S}_{33}}} \quad (3.40)$$

$$\boxed{H_{32} = \frac{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_2, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_3, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)} = \frac{\sum_{i=1}^B S_{32,i}}{\sum_{i=1}^m S_{33,i}} = \frac{\overline{S}_{32}}{\overline{S}_{33}}} \quad (3.41)$$

$$\boxed{H_{34} = \frac{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_4, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)}{\frac{1}{B} \sum_{i=1}^B \underline{p}_i(x_3, f) \cdot \underline{p}_i^*(x_3, f)} = \frac{\sum_{i=1}^B S_{34,i}}{\sum_{i=1}^m S_{33,i}} = \frac{\overline{S}_{34}}{\overline{S}_{33}}} \quad (3.42)$$

4 Aufbau des Messsystems

Dieses Kapitel beschäftigt sich mit der Hardware des Messsystems. Es sei darauf hingewiesen, dass die Hardware eine Weiterentwicklung jener von Rudolf Brunnader ist. Hier werden lediglich die Ergänzungen dieser beschrieben.

4.1 Messrohr und Probenhalter

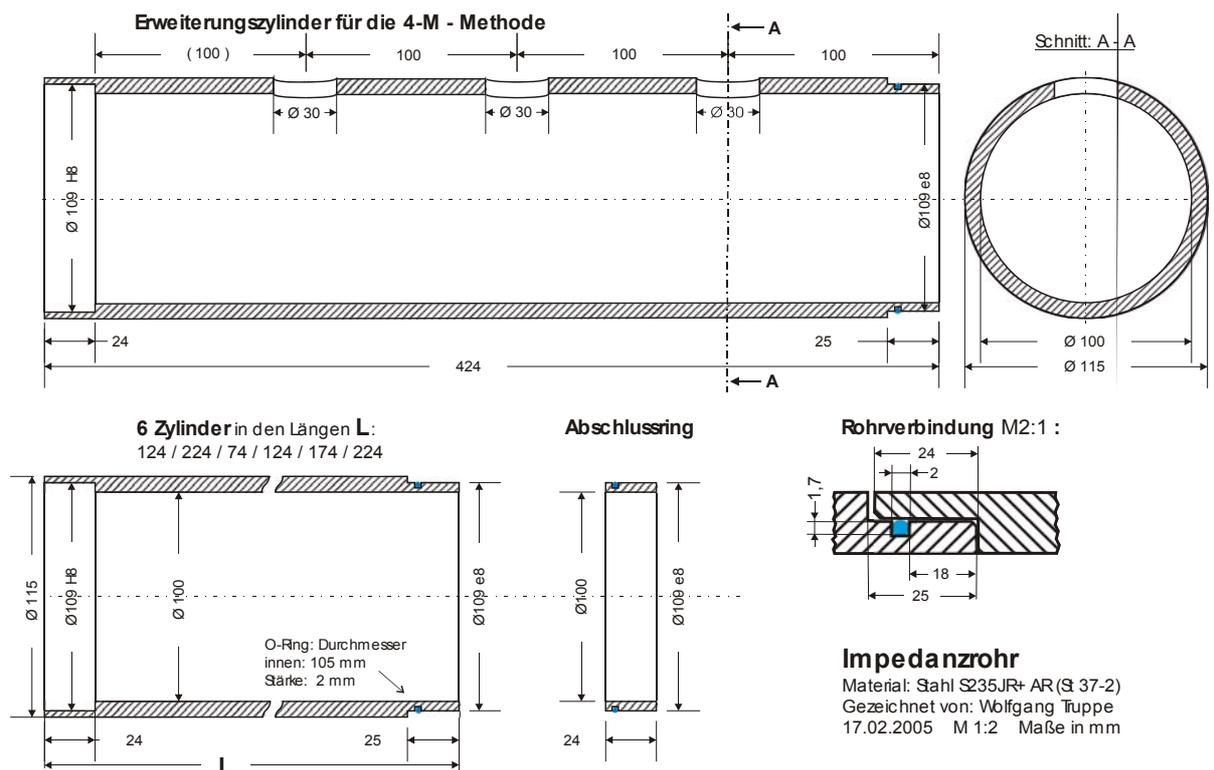


Abb. 4-1 Konstruktionszeichnung der Erweiterung des Impedanzrohres

In Abb. 4-1 ist die Konstruktionszeichnung der Erweiterung des Messrohres und des Probenhalters zu erkennen. Als Probenhalter kommt der Zylinder mit 124mm Länge zum Einsatz. Möchte man einen anderen Zylinder verwenden, sind die entsprechenden Längen in der „CatsGlobaleKonstanten“- Datei zu ändern (vgl. Kap. 6.5). Zur Verfügung stehen 5 Zylinder der Längen (in mm) 124/124/174/224/224. Der Zylinder mit 74mm Länge ist als

Anschlussflansch zwischen Rohr und zweitem Lautsprecher verarbeitet worden. Hierbei ist zu beachten, dass die Länge der Anschlussmuffe 24 mm beträgt. Als effektive Rohrverlängerung stehen also Zylinder der Längen 100/100/150/200/200 mm zur Verfügung.

Es können beispielsweise dickere Proben ($>100\text{mm}$) mit diesen Zylinder vermessen werden. Auch das Luftvolumen hinter der Probe kann vergrößert werden.



Abb. 4-2: Rohrstücke verschiedener Längen

4.2 Lautsprecher

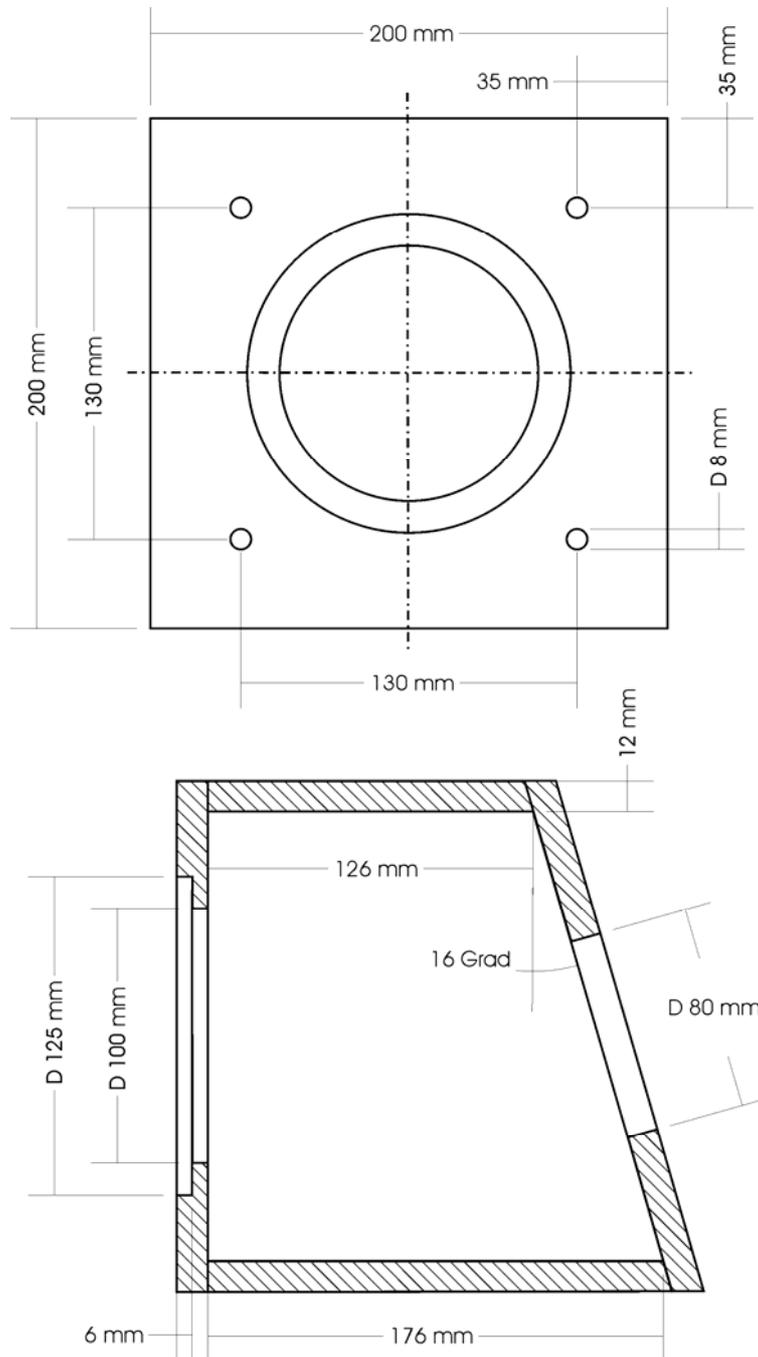


Abb. 4-3: Konstruktionszeichnung Lautsprechergehäuse

Der zweite Lautsprecher wurde nach den Konstruktionszeichnungen (Abb. 4-3) von Rudolf Brunnader angefertigt, um sicher zugehen, dass die Rauschsignale der beiden Lautsprecher sich so ähnlich wie möglich sind.

In Abb. 4-4 ist die Weiterentwicklung der Mikrofonhalterungen zu sehen. Während das Mikrofon in der alten Halterung (links) nur einen O-Ring als Auflagefläche hat, und daher um diesen Drehpunkt beweglich ist, sind in der neuen Halterung zwei O-Ringe der Dimension $\text{Ø}21,3 \times 3,6 \text{ mm}$ zur besseren Führung und zur 2-Punkt-Fixierung vorgesehen.

Die neuen Halterungen konnten durch Modifikation der bestehenden Halterungen hergestellt werden. Hierzu war lediglich ein Schnitt durch den oberen Spannring nötig. Da die AKG-C480B-Mikrofone unterschiedlich dick gefertigt sind ($\text{Ø}21,1 \text{ mm} \dots \text{Ø}21,23 \text{ mm}$) musste der Innendurchmesser der Halterung auf $\text{Ø}21,3 \text{ mm}$ angepasst werden. Auch der Kerndurchmesser der Nut für den äußeren O-Ring musste auf $\text{Ø}27,4 \text{ mm}$ korrigiert werden um die neuen O-Ringe der Dimension $\text{Ø}27 \times 1,5 \text{ mm}$ aufnehmen zu können. Anstatt des bisher verwendeten Filzes um die Mikrofonöffnung wurde ein glattes PVC-Band mehrlagig eingeklebt.

4.4 Hardware und Aufbau des gesamten Messsystems

Prinzipiell ist keine spezielle zusätzliche Hardware notwendig. Die Audiokarte sollte in der Lage sein 4 Kanäle aufzuzeichnen und ASIO-fähig sein. Die vorgestellten Messungen wurden mit einem RME Fireface 400 erstellt.

Weiter wird ein Leistungsverstärker gebraucht, um die 2 Lautsprecher zu versorgen. Hier kam ein Parasound HCA 800 II zum Einsatz.

Als Mikrofone sollen vier AKG-C480B (lineare Einstellung, 0dB) mit vier CK62-ULS Kugelnkapseln verwendet werden. Es wird empfohlen nur diese Mikrofontype zu verwenden, da die Halterungen dafür abgestimmt sind.

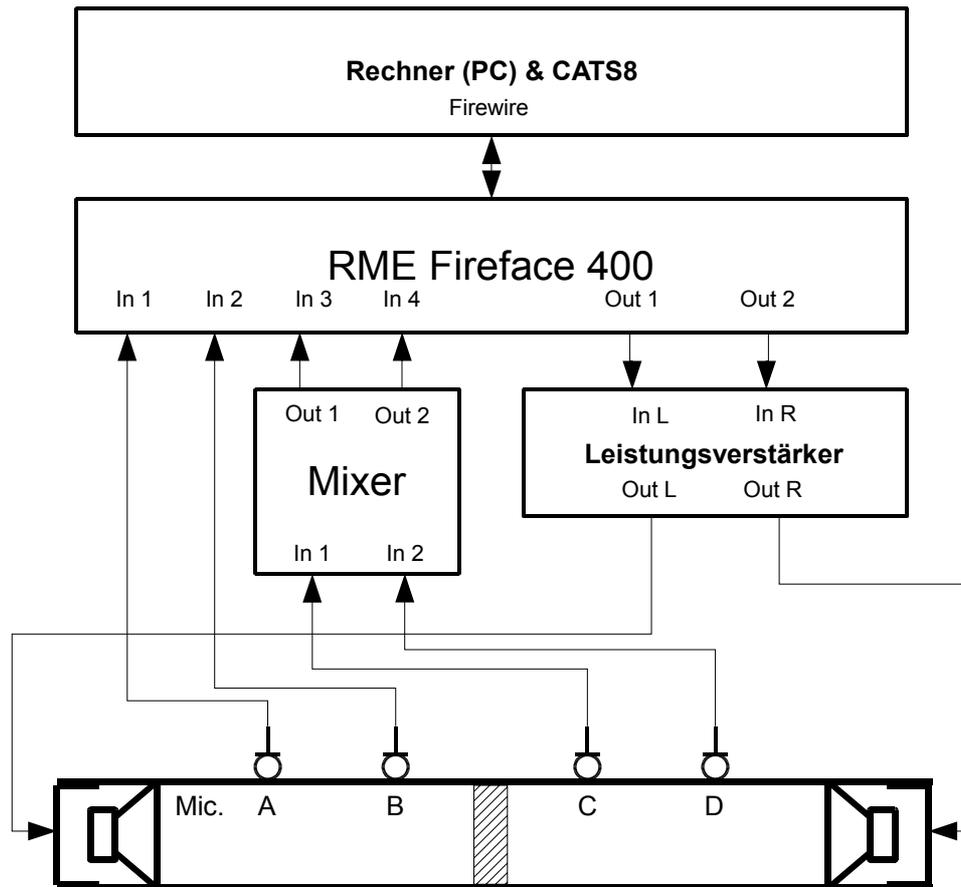


Abb. 4-5: schematischer Aufbau des Messsystems (4-mic)

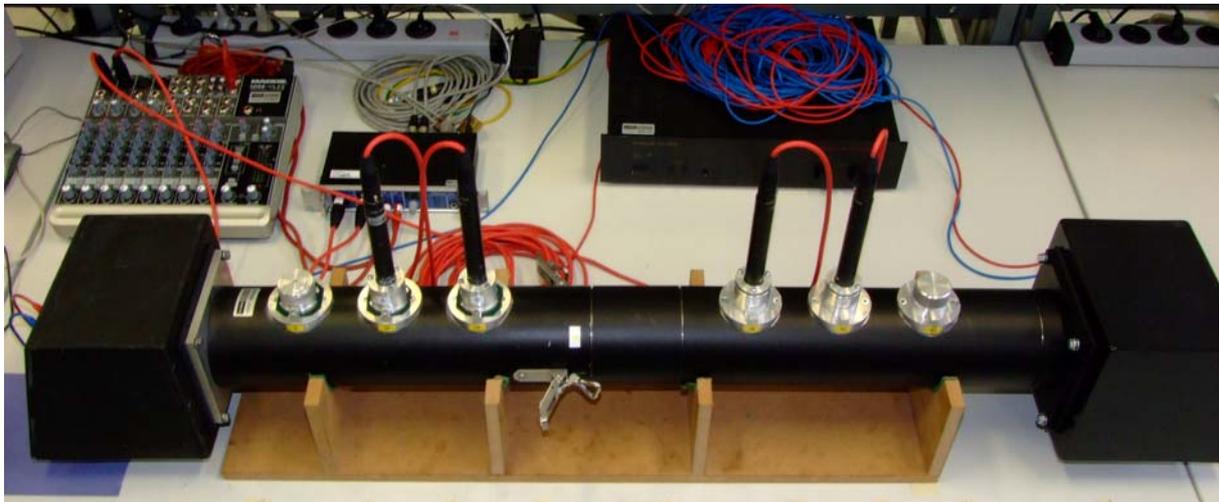


Abb. 4-6: Messaufbau 4-mic

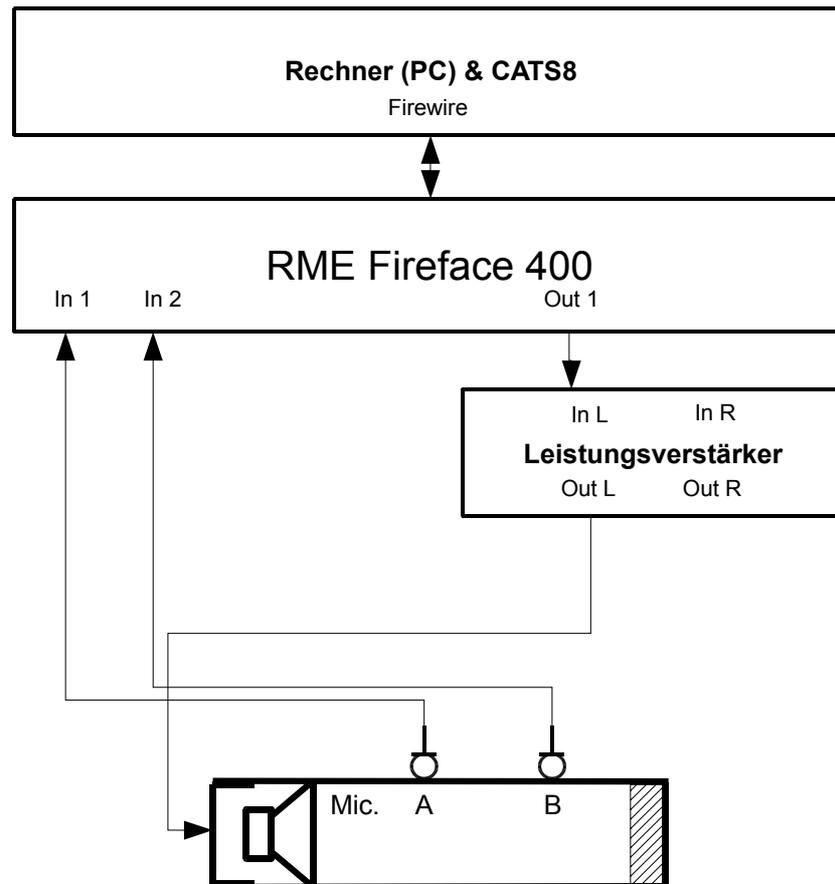


Abb. 4-7: schematischer Aufbau des Messsystems (2-mic)

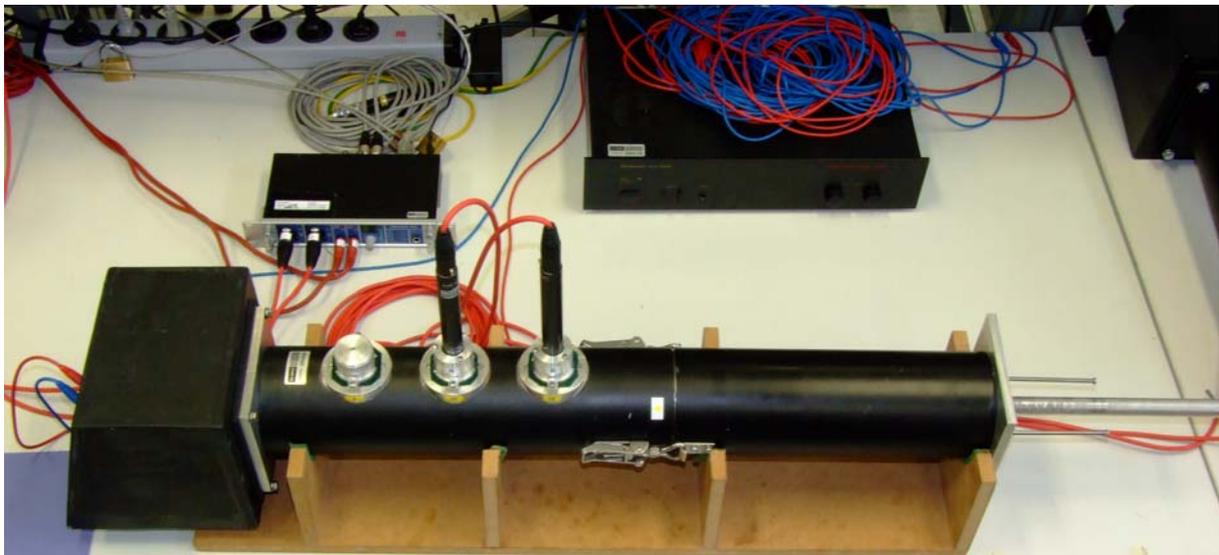


Abb. 4-8: Messaufbau 2-mic

5 Softwareentwicklung

5.1 Wahl der Programmiersprache

Als Programmiersprache wurde MATLAB[®] Version 7.5.0.342 (R2007b) gewählt.

MATLAB[®] ist eine modular strukturierte, objektorientierte Programmiersprache, die vor allem in der Signalverarbeitung, Simulation und im Prototyping verwendet wird. Daher besitzt MATLAB[®] im Gegensatz zu anderen Programmiersprachen Routinen, die speziell für Signalverarbeitung und Analyse entwickelt wurden, wodurch eine einfache Erweiterung des Funktionsumfangs der Software auf Hochsprachebene möglich ist.

MATLAB[®] besitzt eine integrierte und frei programmierbare grafische Benutzeroberfläche, in der unproblematisch Menüstrukturen verändert und erweitert werden können. Auch hierbei werden Funktionen der Signalverarbeitung, wie zum Beispiel die Visualisierung der Ergebnisse direkt unterstützt. Das Erstellen der Benutzeroberfläche ist einfach und erfolgt auf grafischem Weg.

MATLAB[®] ist nicht nur eine Programmiersprache, sondern auch ein Simulationsprogramm. Wird MATLAB[®] für direkte Berechnungen und Simulationen benutzt, so erfolgt dies über das Command Window. Hier besteht nun die Möglichkeit aktiv in den Programmablauf einzugreifen, und mit bereits vorhandenen Daten im Command Window weitere Berechnungen durchzuführen. Doch auch der Aufruf einzelner Programmmodule ist über das Command Window möglich.

Aus MATLAB[®] Files kann bei Bedarf mittels eines Compilers eine „Stand alone application“ generiert werden. Es ist dann keine MATLAB[®]-Umgebung für die Ausführung des Programms mehr notwendig.

Die Software wurde auf der Plattform Windows XP entwickelt und auch unter MATLAB[®] Version 7.6.0.324 (R2008a) getestet.

5.2 Allgemeines

Der Sourcecode beinhaltet Teststrukturen, die zur Verifikation einzelner Programmteile verwendet wurden. Sie sind nicht entfernt, sondern auskommentiert worden. Es handelt sich hierbei beispielsweise um plot-Befehle, mit denen die Funktionalität überprüft werden kann.

Auch wurde bei der Programmierung auf ausführlichste Kommentare im Code Wert gelegt. Dies erleichtert die Lesbarkeit des Codes.

5.3 Entwurf der Benutzeroberfläche (GUI)

Um der Forderung nach einer möglichst einfachen, übersichtlichen Benutzeroberfläche (GUI Graphical User Interface) nachzukommen, wurde beschlossen, sich auf 2 Hauptfenster zu beschränken.

Ein Hauptfenster (CATS8_graph) ist für die Darstellung der Messergebnisse, und deren Weiterverarbeitung konzipiert und ist projektbezogen. Ein weiteres (CATS8) für die Eingabe und Editierung einer Einzelmessung. Es ist also messungsbezogen.

Im Folgenden wird auf die einzelnen Funktionseinheiten der beiden Hauptfenster eingegangen. Die Bedienung selbst wird näher im Kapitel 6 beschrieben.

5.3.1 Fenster „CATS8_graph“

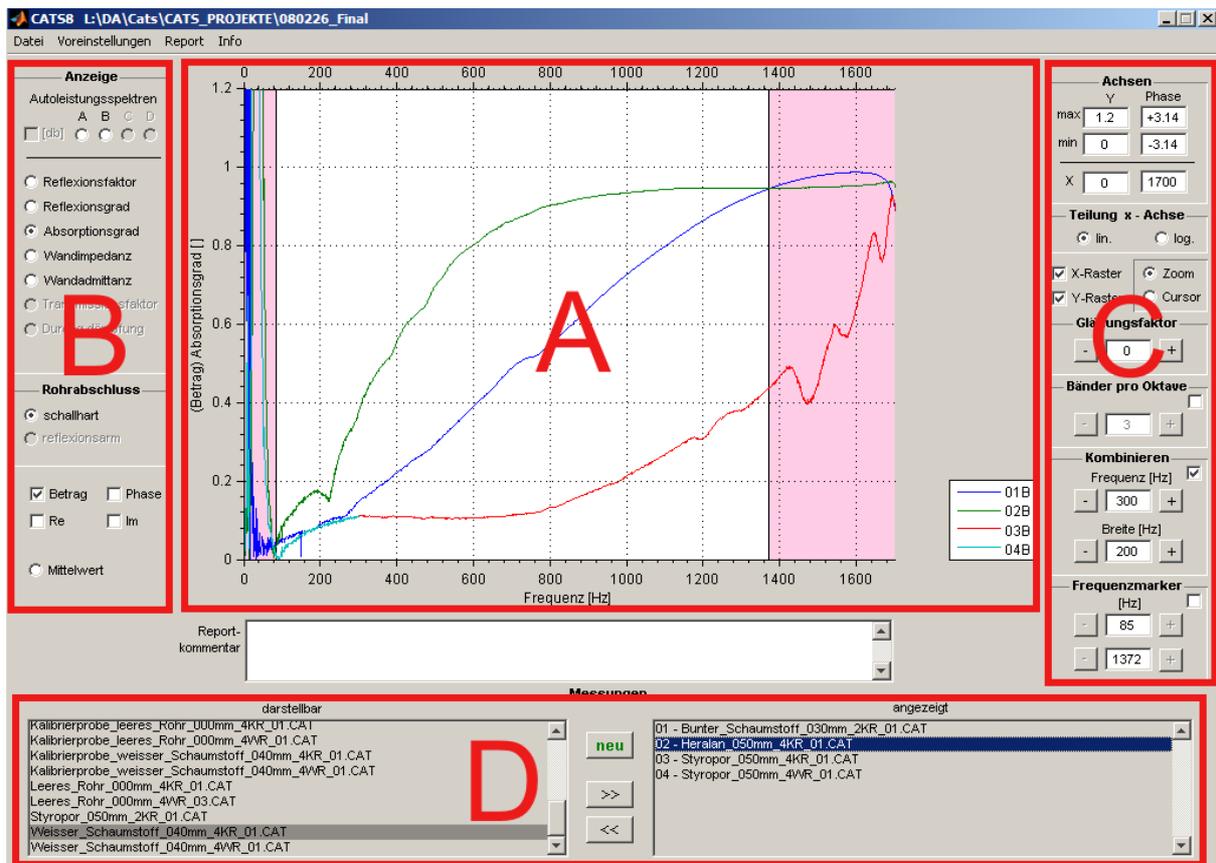


Abb. 5-1: GUI Konzept Fenster CATS8_graph

Dieses Fenster ist in 4 Funktionsbereiche gegliedert. Der Bereich A ist die Diagrammanzeige in der Mitte des Fensters, wo die eigentlichen Messergebnisse angezeigt werden.

Der zweite Bereich B befindet sich an der linken Seite des Fensters. Dieser Bereich dient zur Auswahl der anzuzeigenden Kenngröße (Reflexionsfaktor, Absorptionsgrad etc.), und der Art ihrer Anzeige (Betrag, Phase,..., Abschluss schallhart oder reflexionsarm etc.).

Der dritte Bereich C, der auf der rechten Seite des Fensters zu finden ist, dient der Einstellung der Anzeige. Es können Einstellungen zur Achsenbegrenzung und Unterteilung gemacht werden, sowie Werkzeuge zur genaueren Untersuchung der Kurven (Zoom, Cursor) ausgewählt werden. Weiters stehen Kurvenglättung, Bändermarkierung, Kombination von Messungen und Frequenzmarkierungen zur Verfügung.

Der vierte Bereich D ist im unteren Teil des Fensters zu finden, und dient zur Auswahl der anzuzeigenden Messungen. Er besteht aus zwei Dateiauswahlboxen, die alle Messungen des Projekts beinhalten. Die rechte Dateiauswahlbox enthält die Messungen, die angezeigt werden. Auch die Verwaltung der Messungen passiert in diesem Teil. Bei jeder Messung erreicht man über ein Kontextmenü (rechter Mausklick) das Fenster für die Einzelmessung:

5.3.2 Fenster „CATS8“

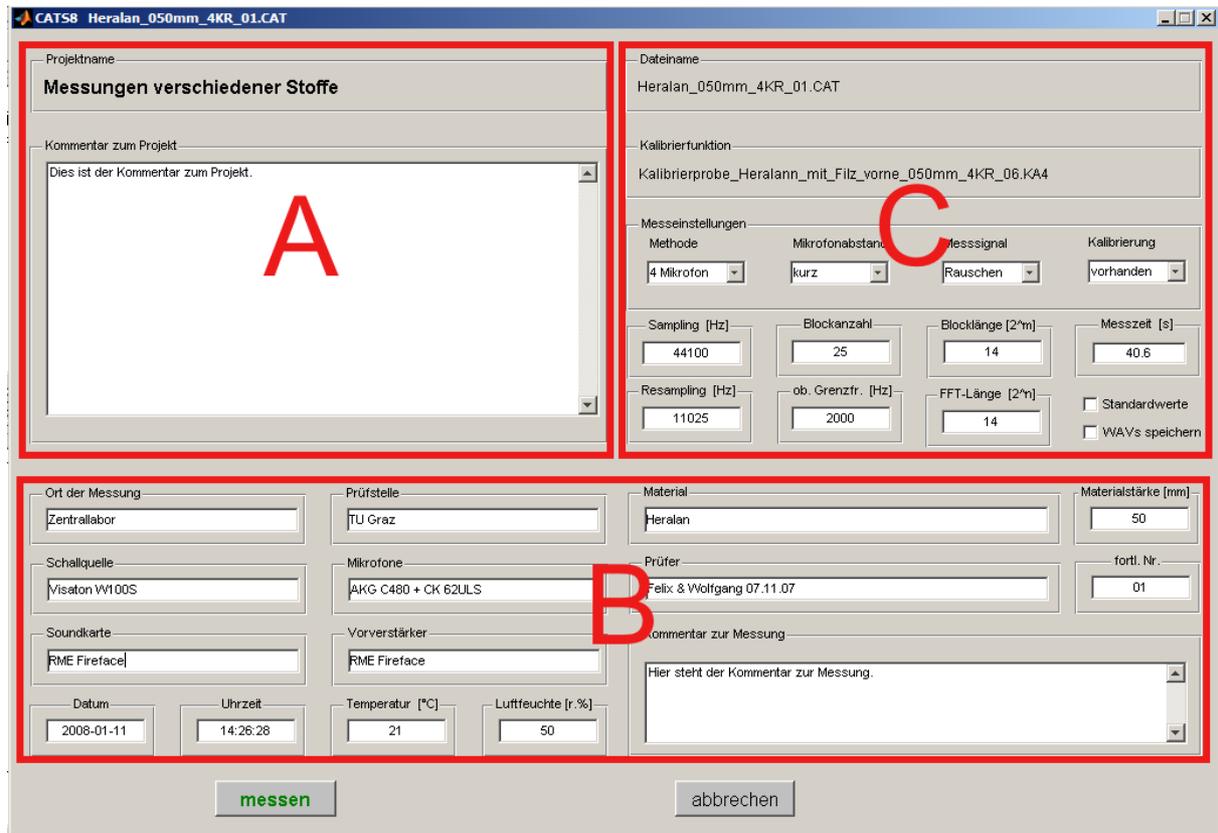


Abb. 5-2: GUI Konzept Fenster CATS8

Dieses Fenster hat immer etwas mit einer einzelnen Messung zu tun. Je nachdem von wo man in diesen Bereich kommt, hat es unterschiedliche Funktionen. So kann es zum Vorbereiten einer neuen Messung, Editieren oder Löschen einer bereits durchgeführten Messung dienen.

Es ist in drei Bereiche unterteilt. Der Bereich A oben links ist projektbezogen. Er liefert den Projektnamen und den Kommentar dazu.

Darunter findet man den zweiten Bereich B. Er enthält die Eingabefelder zu Labordaten, wie dem Ort der Messung, verwendetem Equipment, Temperatur und Ähnlichem, sowie Angaben zum Material.

Der dritte Bereich C, der sich oben rechts befindet, dient den Messeinstellungen, wie Messmethode, Samplingfrequenz etc. Dieser Bereich ist natürlich inaktiv, wenn es sich um eine bereits durchgeführte Messung handelt, ist aber jedoch zu Informationszwecken trotzdem sichtbar.

Insgesamt ergibt das Zusammenspiel dieser beiden Fenster eine schlanke und intuitiv sehr einfach zu bedienende Benutzerführung, die den Umgang mit dem Programm sehr erleichtert und dem Benutzer die Möglichkeit gibt, sich auf die wesentlichen Punkte der Messung zu konzentrieren.

5.4 Programmstruktur

Durch die Erstellung von Benutzeroberflächen ergibt sich eine Programmstruktur, die sich eben an diesen orientiert. Zu jedem Fenster der Oberfläche gehört ein Hauptmodul zur Programmablaufsteuerung.

MATLAB® beinhaltet ein Tool zur Programmierung der Benutzeroberflächen namens „GUIDE“. Mit dessen Hilfe ist es möglich auf grafischem Wege eine Benutzeroberfläche zu entwerfen. MATLAB® generiert hieraus nun ein *.fig*- File, welches die grafischen Informationen enthält, und ein *.m* – File. Das *.m* – File dient zur Ablaufsteuerung. Es besteht hauptsächlich aus Funktionen, die aufgerufen werden, wenn ein Bedienfeld betätigt wird.

Die Hauptmodule von CATS8 sind:

- CATS8 - Eingabe/Änderung der Messeinstellungen und Metadaten
- CATS8_graph - Anzeige der Messungen
- CATS8_messen_2mic - Durchführung der Messung nach 2-mic-Methode
- CATS8_messen_4mic - Durchführung der Messung nach 4-mic-Methode
- ReportErstellen - Erstellung einer Reportdatei in html
- CATS8_Pegel - Fenster zur Einstellung der Ein- und Ausgangspegel

Im Folgenden werden diese Hauptmodule näher beschrieben, und ihre Funktionen erläutert. Auf Funktionen, die der Programmablaufsteuerung dienen, wird hierbei nicht näher eingegangen. Es handelt sich hierbei um Funktionen die aufgerufen werden, wenn ein Bedienfeld der Benutzeroberfläche betätigt wird; so genannte „Callback“- Funktionen.

5.4.1 Programmmodul „CATS8“

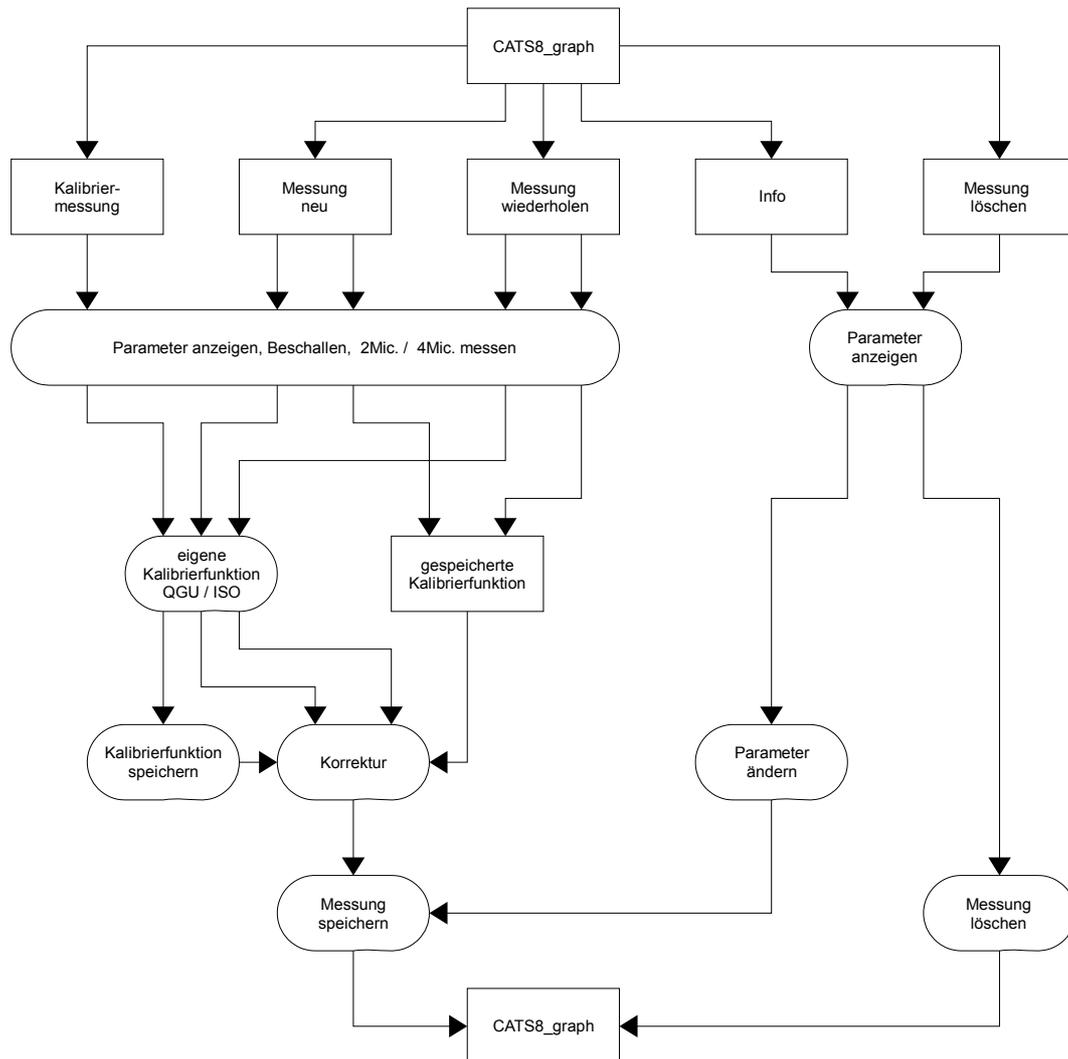


Abb. 5-3: Flussdiagramm Programmmodul CATS8

Dieses Modul ist mit der Benutzeroberfläche für die messungsspezifischen Einstellungen und Metadaten verbunden. Eingegebene Daten zur folgenden Messung werden hier auf Plausibilität geprüft, aufgenommen und an die Module CATS8_messen_2mic und CATS8_messen_4mic weitergegeben. Auch werden aus diesen Daten die Dateinamen der Messung und der Kalibrierfunktion gewonnen und angezeigt.

function CATS8_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

wird vor Visualisierung des Fensters durchlaufen, und stellt fest mit welcher Aufgabe es aufgerufen wurde (Info, Messung löschen, Messung wiederholen, neue Messung, kalibrieren); setzt Textfelder dem entsprechend

function [fs0] = CheckSoundCard(fs0,handles)

ermittelt unterstützte Samplingfrequenz und Kanalanzahl der installierten Soundkarte

function CheckStandards(handles)

prüft, ob Standardwerte eingegeben sind, und setzt entsprechende Textfelder und Checkboxen

function handles = Datei_KaFu_Name_generieren(handles)

generiert Dateinamen der Messung und Namen der Kalibrierfunktion

function Txt = MatLabDateiNameGenerieren(Txt)

ändert z.B. „ö“ in „oe“, damit Konflikt mit MATLAB®-Dateinamensystem verhindert wird

function handles = Parameter_einlesen(handles)

liest alle Eingaben des Nutzers ein

function Ausgabe = ZahlenPruefen(Eingabe, Runden, Zmin, Zmax, ErrText)

korrigiert in Zahleneingaben Komma in Punkt und entfernt Leerzeichen

5.4.2 Programmmodul „CATS8_graph“

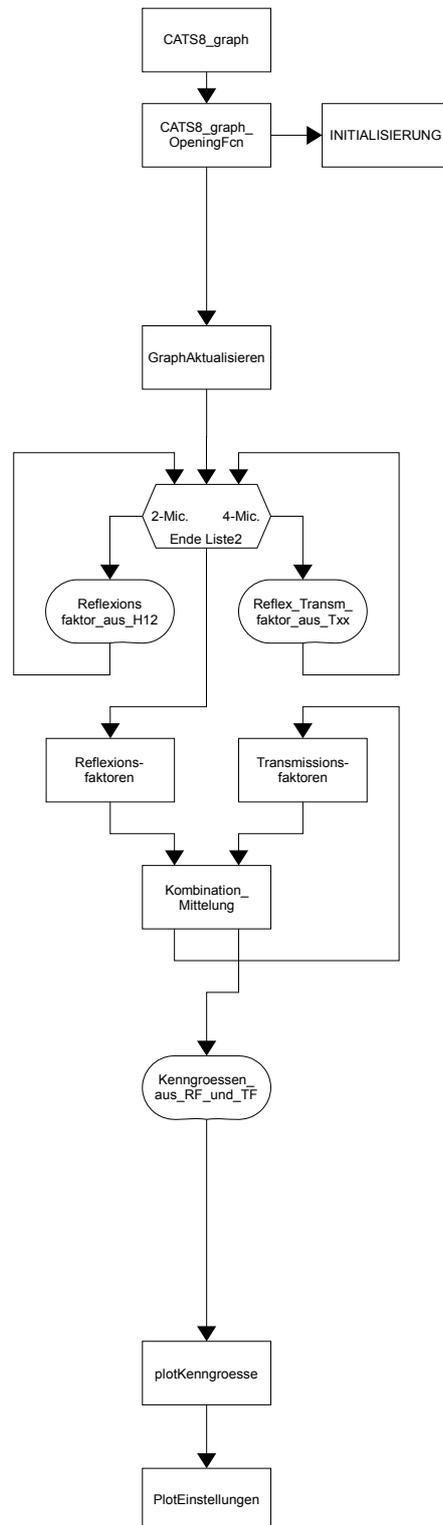


Abb. 5-4: Flussdiagramm des Programmmoduls CATS8_graph

Es handelt sich hierbei ebenfalls um ein mit der Benutzeroberfläche zur Parameteranzeige und Weiterverarbeitung verbundenes Modul. Hier werden alle Messungen des Projektes aufgelistet, und die verschiedenen Parameter auf Wunsch berechnet und angezeigt. Es können mehrere Messungen gemittelt oder kombiniert werden.

function CATS8_graph_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)

wird vor Visualisierung des Fensters durchlaufen und prüft in welchem Status aufgerufen wurde

function handles = Anzeige(handles)

prüft welcher Parameter angezeigt werden soll; Suche des 'Tag' des aktivierten radiobutton im uipanel_Anzeige

function [a1, a0] = Ausgleichsgerade(Frequachse, Werte)

Bilden einer Ausgleichsgeraden

function [handles FrequAchse_Band Werte_Band] = Baender(handles, FrequAchse, Werte)

errechnet die Werte der Frequenzbänder für die Tabelle im Report

function [handles FrequAchse_Band Werte_Band] = Baendermarkierung(handles, FrequAchse, Werte)

entscheidet, ob kombinierte Messungen anzuzeigen sind, und ruft dementsprechend *Baender* auf

function handles = EintragLoeschen(ListenNr, Nummer, handles)

löscht Eintrag aus Dateiauswahlbox

function handles = EintragSchreiben(ListenNr, handles)

Eintrag in Dateiauswahlbox schreiben

function [ListenNr, Nummer] = EintragSuchen(Eintrag, handles)

sucht Eintrag in Dateiauswahlbox

function [Grundgroesse, Frequenzachse] = Glaettung (Grundgroesse, Frequenzachse, handles)

Glättung einer Kurve mit Hilfe eines moving average filters

function handles = GraphAktualisieren(handles)

entscheidet über anzuzeigende Messmethode (nur 2-mic, nur 4-mic, oder gemischt), anzuzeigender Parameter, und plottet alle Kurven neu

function GrauenAutoLeistungsSp(handles)

aktivieren und deaktivieren der entsprechenden radiobuttons, je nachdem, ob Autoleistungsspektren angewählt sind

function GrauenMaterialParameter(handles)

aktivieren und deaktivieren der entsprechenden radiobuttons, je nachdem, ob nur 2-mic, nur 4-mic oder gemischte Messungen anzuzeigen sind

function INITIALISIERUNG(hObject, eventdata, handles, varargin)

initialisiert das Fenster und setzt hierzu Parameter wie Fensterposition, Arbeitsverzeichnis, globale Konstanten und Variablen etc.

function handles = Kenngroessen_aus_RF_und_TF(handles)

berechnet weitere Kenngrößen aus bereits gemitteltem und geglättetem Reflektionsfaktor oder Transmissionsfaktor

function handles = Kombination_Mittelung(Grundgroesse, handles)

hier werden Kurvenpaare kombiniert und/oder alle angezeigten Kurven gemittelt

function ListBoxTest(handles)

prüft Anzahl der Einträge in Dateiauswahlboxen und deaktiviert und deaktiviert entsprechende Bedienelemente

function Inhalt = Liste2gemischt(handles)

prüft, ob die rechte Dateiauswahlbox nur 2-mic, nur 4-mic, oder gemischte Messungen enthält

function handles = MessungLoeschen(handles)

löscht ausgewählte Messung aus dem Projektverzeichnis

function handles = MessungSpeichern(handles)

schreibt ausgewählte Messung in das Projektverzeichnis

function Phase = Phasenkorrektur(Phase,Stelle)

prüft, ob Phase an einer vorgegebenen Stelle mehr als $\pm\pi$ beträgt, und verschiebt entsprechend Phase um ein Vielfaches von 2π , damit diese an jener Stelle in dem Bereich von $\pm\pi$ liegt

function handles = PlotEinstellungen(handles)

plottet rosa Gültigkeitsbereiche, setzt Achsenskalierung auf linear oder logarithmisch, setzt Achsenlimits, setzt Frequenzmarkierungen und Legende, schaltet zwischen Zoom- und Cursorfunktion

function handles = PlotKenngroesse(handles)

löscht alle vorhandenen Kurven, und plottet neu

function handles = Reflex_Transm_faktor_aus_Txx(handles,k)

berechnet den Reflexions- und den Transmissionsfaktor aus der Kettenmatrix

function handles = Reflexionsfaktor_aus_H12(handles,k)

berechnet den Reflexionsfaktor aus der Übertragungsfunktion H_{12}

function [fSum ySum] = Summieren(f1,y1,f2,y2,deltaf)

summiert zwei Funktionen (y_1, y_2) mit evtl. unterschiedlichen Frequenzachsen (f_1, f_2) in neuem Frequenzraster δf

function Ausgabe = ZahlenPruefen(Eingabe, Runden, Zmin, Zmax, ErrText)

korrigiert in Zahleneingaben Komma in Punkt und entfernt Leerzeichen, rundet und beschränkt die Eingabe

5.4.3 Programmmodule „CATS8_messen_2mic“ und „CATS8_messen_4mic“

In diesen Modulen werden die eigentlichen Messungen durchgeführt. Die Testsignale werden generiert und ausgespielt, und die Messsignale werden aufgenommen und frequenztransformiert (vgl. Kap. 5.6). Hieraus werden die Übertragungsfunktionen bestimmt und nach der gewählten Methode korrigiert (vgl. Kap.3.3). Bei der 4-mic-Methode errechnen sich aus diesen die Kettenmatrixparameter, die gespeichert und an das aufrufende CATS_graph zurückgegeben werden. Bei der 2-mic-Methode wird die korrigierte Übertragungsfunktion gespeichert.

Diese Module sind auch eigenständig, ohne Ablaufsteuerung der GUIs, lauffähig.

5.4.4 Programmmodul „ReportErstellen“

Hier werden die vom Nutzer zusammengestellten und aufbereiteten Messergebnisse als Report in *HTML* exportiert. Dieser enthält die Kommentare zum Projekt und zur Messung, die Metadaten, die angezeigten Kurven und die angezeigten Werte dieser in tabellarischer Form. Zusätzlich wird die Abbildung als *.png* gespeichert.

5.4.5 Programmmodul „CATS8_Pegel“

Hierbei handelt es sich um das Funktionsfenster zum Überprüfen der Ein- und Ausgangspegel. Es wird wahlweise ein Sinuston mit 50 Hz oder Rauschen an beiden Ausgangskanälen ausgespielt, und von den vier Eingängen die Spitzenwerte der letzten 3 Sekunden angezeigt.

5.5 Datenstrukturen

5.5.1 Programminterne Strukturen

Um zwischen den einzelnen Benutzeroberflächen und ihren Modulen Daten und Variablen zu übergeben, wird die GUI-eigene Datenstruktur „handles“ verwendet. Diese bestehende Datenstruktur wird um die Variablen erweitert:

- `handles.glm`: globale Variablen, die messungsbezogen sind. z.B. Metadaten, wie Temperatur, Luftfeuchte etc. und Messergebnisse z.B. Übertragungsfunktion(en)
- `handles.gla`: globale Variablen, die allgemeiner Natur sind, wie z.B. aktueller Inhalt der Dateiauswahlboxen oder der Zustand anwählbarer Schaltflächen
- `handles.glk`: globale Konstanten, wie z.B. geometrische Abmessungen des Rohres, Soundkarten Parameter, Ein- / Ausschwingzeiten, globaler Fader
- `handles.glv`: globale Variablen, wie z.B. letzte Position des Fensters, zuletzt verwendete Soundkarte und Mikrofone, letzter Ort, Prüfer etc.

5.5.2 Dateistrukturen

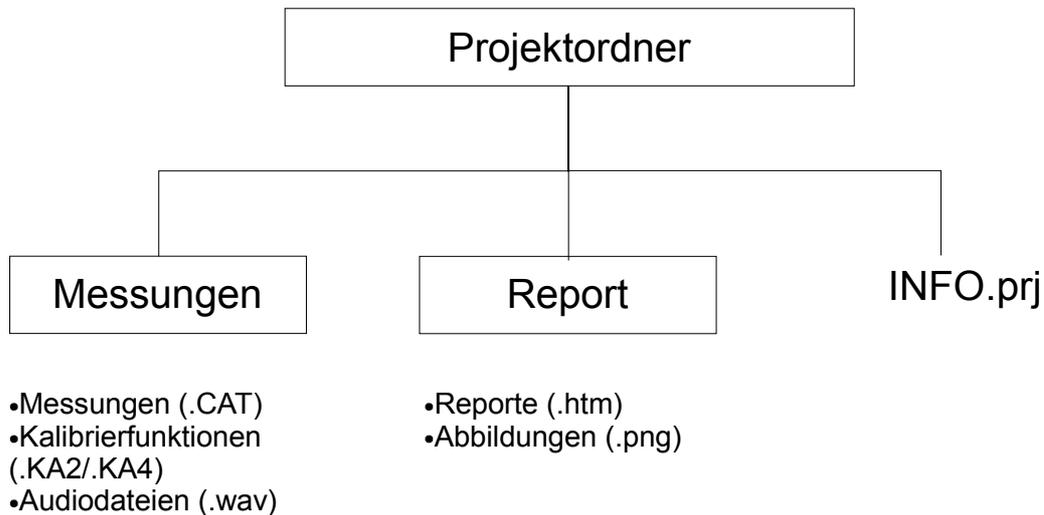


Abb. 5-5 CATS8 Ordner- und Datenstruktur

Bei Anlegen eines neuen Projektes legt CATS8 eine Ordnerstruktur an. Übergeordnetes Verzeichnis ist der Projektordner, der mit dem Projektnamen betitelt ist. Unter diesem liegen die Verzeichnisse „Messungen“ und „Report“, sowie die Projektinformationsdatei „INFO.prj“.

Im Verzeichnis „Messungen“ werden die Messergebnisse gespeichert. Sie erhalten die Dateierweiterung *.CAT. Gespeichert werden hierbei die kalibrierten Übertragungsfunktionen (2-mic), bzw. die kalibrierten Kettenmatrixparameter sowie der Reflexionsfaktor an der der Stelle „1“ (4-mic). Weiters werden die Autoleistungsspektren der ersten Beschallung und die Metadaten mitgespeichert. In der Ergebnisdatei *.CAT sind alle „handles.glm“ enthalten.

Ebenfalls in diesem Verzeichnis werden die Kalibrierfunktion gespeichert und dabei mit der Dateierweiterung *.KA2 (2-mic), bzw. *.KA4 (4-mic) versehen.

Falls gewünscht, werden hier auch die einzelnen Audio-Dateien im *.wav Format abgelegt.

Im Ordner „Report“ werden die Reporte als html Dateien gespeichert, und die zugehörigen Abbildungen als *.png.

INFO.prj ist ein mat-File, das den Kommentar zum Projekt enthält.

5.6 Aufnehmen der Eingangsgrößen

Für das Ansprechen der Audioschnittstelle wird die Programmbibliothek „pawavplay“ von Matt Frear verwendet, welche es erlaubt, mehrkanalig (>2 Kanäle) aufzunehmen.

Zur Rohranregung wird ein vom Nutzer gewähltes Messsignal (Rauschen oder MLS) generiert, mit der Abtastrate f_{s0} ausgespielt und gleichzeitig 2 (oder 4) Mikrofonsignale ebenfalls mit f_{s0} aufgenommen. Die Abtastrate sollte $\geq 11025\text{Hz}$ betragen. Unterstützt die Audio-Schnittstelle $f_{s0}=11025\text{Hz}$ nicht, so ist die nächst höher mögliche Abtastrate zu wählen. In diesem Fall wird das Eingangssignal auf die frei wählbare Resamplingfrequenz ($f_s=11025\text{Hz}$ default) umgerechnet.

Legende zur nächsten Abb. 5-6:

t	.....	Zeitdauer pro Beschallung	.....	[s]
T	.....	Samples pro Beschallung	.....	[samples]
B	.....	Blockanzahl		
m	.....	Exponent der Blocklänge		
M	.....	Blocklänge	.....	[samples]
n	.....	Exponent der FFT-Länge		
N	.....	FFT-Länge	.....	[samples]
f_{s0}	.....	Soundkarten – Abtastrate	.....	[Hz]
f_s	.....	Verarbeitungs-Abtastrate in CATS8	.....	[Hz]
a	.....	Anfang: Einschwingzeit	.....	[s]
A	.....	zu löschende Anfangsamples	.....	[samples]
e	.....	Ende: Ausschwingzeit	.....	[s]
E	.....	zu löschende Endsamples	.....	[samples]

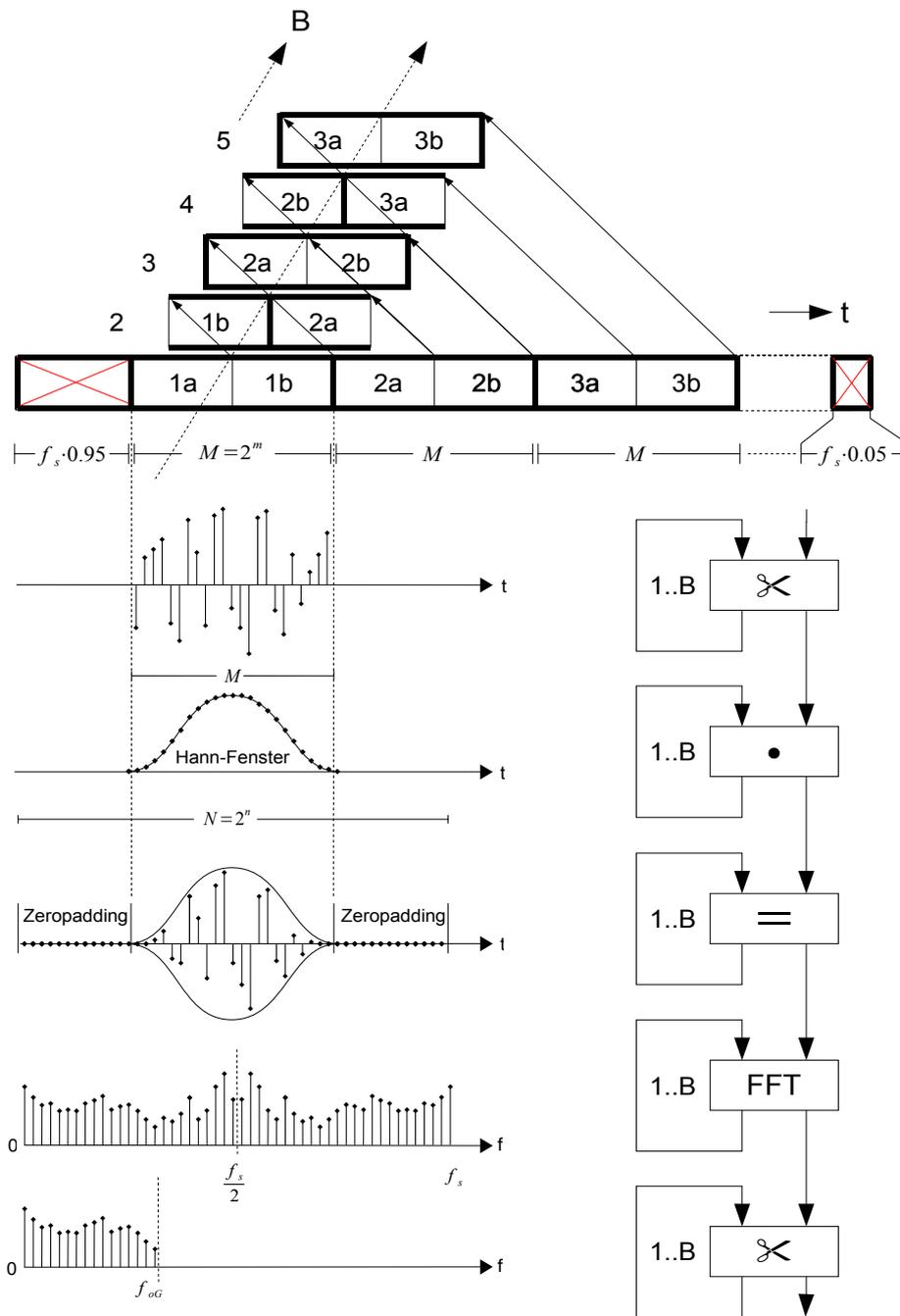


Abb. 5-6: Aufbereitung der Mikrofonssignale

Vom Eingangssignal werden die ersten $a = 950\text{ms}$ abgeschnitten, um zu gewährleisten, dass das System eingeschwungen ist, sowie die letzten $e = 50\text{ms}$, um die beim Resampling eventuell auftretenden Artefakte zu entfernen.

Wie in Abb. 5-6 im oberen Teil zu erkennen ist wird jeder Audiokanal nun in jeweils um eine halbe Blocklänge ($M/2$) versetzte Blöcke gleicher Länge $M = 2^m$ geteilt. Durch die Unterteilung in halbe Blöcke wird die Anzahl der späteren Mittelungen verdoppelt.

Nach der anschließenden Hann-Fensterung und Fourier-Transformation der Länge $N = 2^n$ eine spektrale Erfassung des Audiosignalblocks. Ist die FFT-Länge größer als die Blocklänge

($N > M$) werden an die Blöcke noch im Zeitbereich ($N - M$) Nullen angefügt (*zero-padding*). In diesem Fall ergeben sich nach der Fourier-Transformation zusätzliche ($N - M$) Stützwerte, die zwar eine feinere Frequenzauflösung liefern, jedoch ohne neue Information.

Das erhaltene f_s -breite Spektrum ist um $f_s/2$ symmetrisch, weshalb die Frequenzanteile oberhalb der Grenzfrequenz $f_s/2$ generell abgeschnitten werden. Die obere Grenzfrequenz f_o ist von 2000Hz bis $f_s/2$ einstellbar.

Diese Prozedur wird auf alle Blöcke angewendet.

Auch die Länge und Anzahl der Blöcke kann vor der Messung vom Nutzer angegeben werden. Hieraus errechnet sich die Messzeit zu:

$$t = a + \frac{2^{m-1} \cdot (1+B)}{f_{s0}} + e$$

$$T = A + \frac{M \cdot (1+B)}{2} + E$$

6 Programmbeschreibung

Das folgende Kapitel ist als Bedienungsanleitung des gesamten Messsystems zu verstehen, das für sich alleine stehen kann, und der Software als Hilfedatei beigelegt ist.

6.1 Einleitung

Mit der Software CATS8 können Sie Mikrofonsignale aus zwei verschiedenen Hardwarekonfigurationen messen und verarbeiten:

Konfiguration I 2-Mikrofon-Impedanzrohr mit einem Lautsprecher

Gespeichert wird die **Übertragungsfunktion** der Mikrofonsignale, diese Konfiguration liefert folgende Messparameter:

- Reflexionsfaktor
- Reflexionsgrad
- Absorptionsgrad
- Wandimpedanz
- Wandadmittanz

Konfiguration II 4-Mikrofon-Impedanzrohr mit zwei Lautsprechern

Gespeichert wird die **Kettenmatrix**, diese Konfiguration liefert neben den obigen Parametern, noch zusätzlich:

- Transmissionsfaktor
- Durchgangsdämpfung

Diese Parameter können in der Programmoberfläche angezeigt und weiterverarbeitet werden. Sie können mehrere Kurven, auch aus verschiedenen Konfigurationen mitteln, überblenden und anschließend als Reportdatei exportieren.

6.2 Vorbereitung des Messsystems

6.2.1 Aufbau des Messsystems

4-mic-Messung

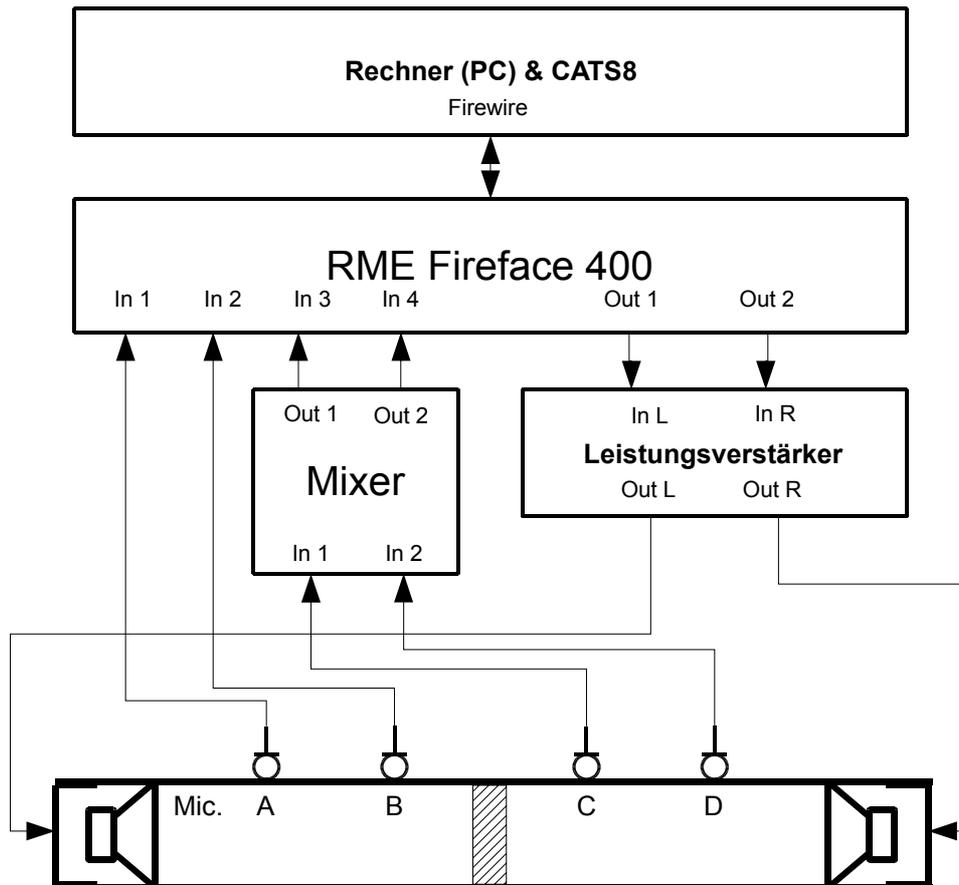


Abb. 6-1: schematischer Aufbau des Messsystems für 4-mic-Messung

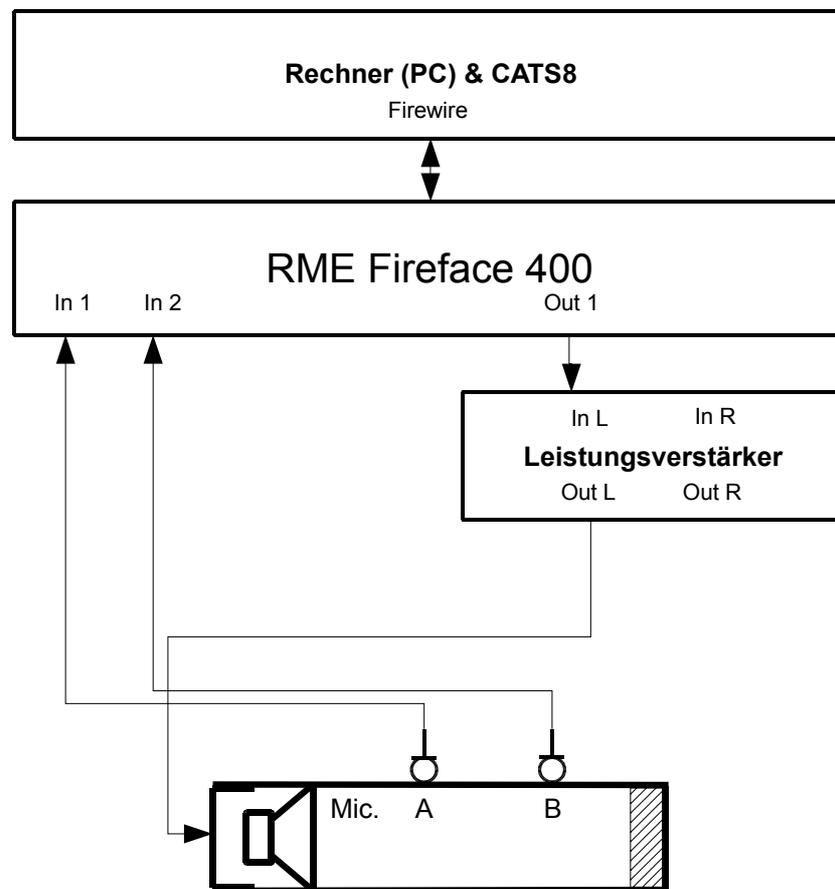
2-mic-Messung

Abb. 6-2: schematischer Aufbau des Messsystems für 2-mic-Messung

Bauen Sie das Messsystem entsprechend Abb. 6-1 oder Abb. 6-2 auf. Achten Sie darauf, dass die nicht benutzten Mikrofonöffnungen des Rohres mit den dafür vorgesehenen Verschlussstopfen verschlossen sind.

Achten Sie weiters auf den korrekten Einbau des Messobjektes. Die Oberfläche muss plan mit dem Probenhalter abschließen (siehe Abb. 6-3).



Abb. 6-3: Einbau der Probe

6.2.2 Anlegen eines Projektes

Um CATS8 zu starten ändern Sie in MATLAB® das *current directory* in das Verzeichnis, in dem die CATS Dateien liegen, und tippen Sie „CATS8“ in das *command window*.

Um nun ein neues Projekt zu erstellen, nutzen Sie das Menü

Datei → Projekt neu/öffnen,

wählen einen Pfad, klicken

Neuen Ordner erstellen,

und geben in das sich öffnende Fenster einen Kommentar zum Projekt an. Dieser lässt sich jederzeit unter

Info → Projekt – Information

einsehen und editieren. CATS legt nun eine Ordnerstruktur an, deren übergeordnetes Verzeichnis den von Ihnen bestimmten Namen trägt. Haben Sie bereits ein Projekt angelegt, welches Sie öffnen wollen, erreichen Sie dies durch selbiges Menü, wobei Sie den Ordner des gewünschten Projekts auswählen.

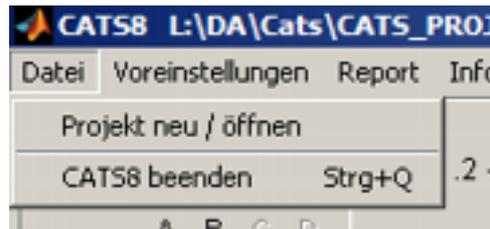


Abb. 6-4: Menü Datei

6.2.3 Voreinstellungen

6.2.3.1 Einpegeln

Bevor Sie mit der eigentlichen Messung beginnen können, müssen Sie Ihre Mikrofone einpegeln und kalibrieren. Stellen Sie vorher fest, dass sich keine Probe im Probenhalter befindet, um eine Dämpfung des Schalls innerhalb des Rohres zu vermeiden.

Über das Menü

Voreinstellungen → *Einpegeln*

gelangen Sie zu einer Oberfläche, von der Sie einerseits ein 50 Hz Sinussignal und andererseits weißes Rauschen auspielen können. Bei beiden Testsignalen können Sie die Dauer derselben angeben.



Abb. 6-5: Menü Einpegeln

Das Sinussignal dient zur Überprüfung der korrekten Ansprache Ihres Verstärkers, sowie ausreichender Anregung der Lautsprecher und der Messanordnung. Stellen Sie sicher, dass Sie Ihren Verstärker im linearen Bereich betreiben.

Das Rauschsignal nutzen Sie zum Einstellen der Mikrofonvorverstärker. Zum Einpegeln benutzen Sie bitte Ihre soundkarteneigene Pegelanzeige und stellen Sie so sicher, dass eine übersteuerungsfreie Aufnahme gewährleistet ist.

In den unteren vier Feldern werden, jeweils nach beendetem Testsignal, die Spitzenwerte der letzten drei Sekunden in dBFS angezeigt

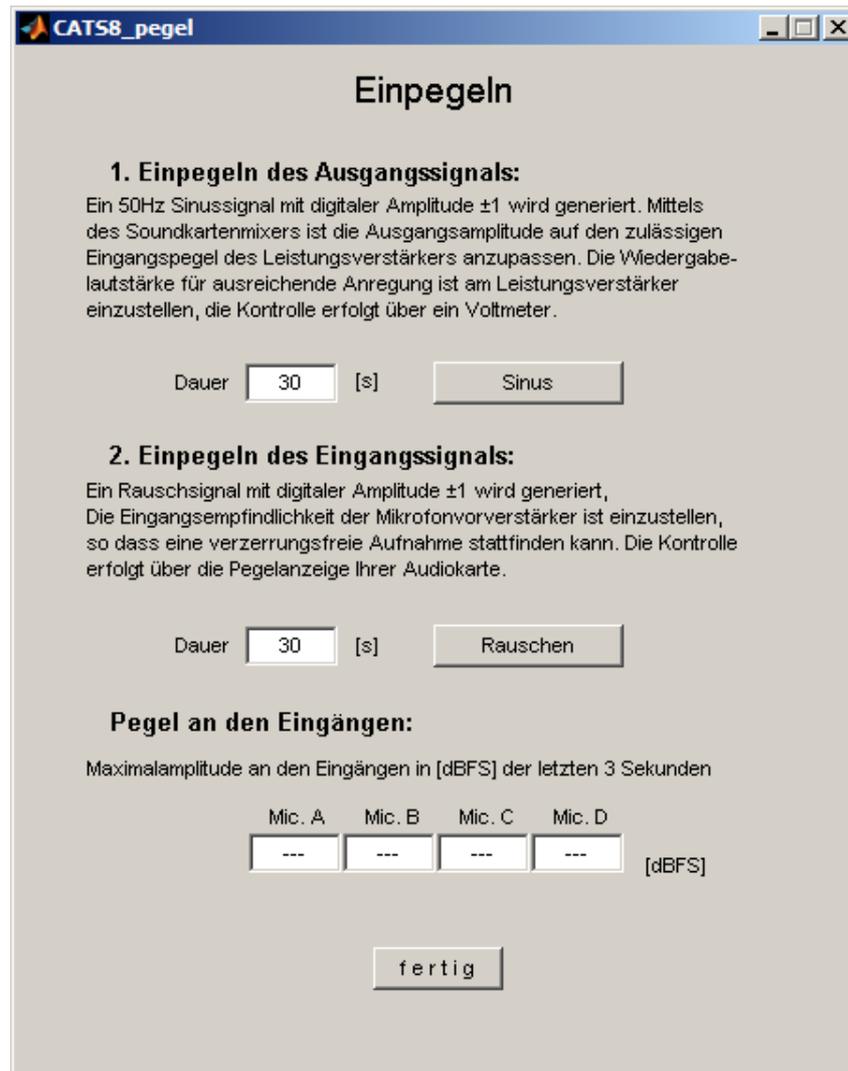


Abb. 6-6: GUI „Einpegeln“

6.2.3.2 Kalibrieren

Anschließend ist das Messsystem zu kalibrieren. Hierbei werden Unterschiede in Frequenz- und Phasengang der einzelnen Mikrofone und Vorverstärker bestimmt. Diese ermittelte Kalibrierfunktion wird gespeichert und dient zur Korrektur der weiteren Messungen.

Geben Sie hierzu eine möglichst gut absorbierende Probe in den Probenhalter um zu starke Reflexionen zu vermeiden. Empfohlen wird hier z. B. 100mm starker Melaminharzschaum.

Wählen Sie den Menüpunkt

Voreinstellungen → *Kalibrieren*.



Abb. 6-7: Menü Kalibrieren

Es öffnet sich ein neues Fenster, welches genauere Metadaten und Einstellungen beinhaltet. Genaueres hierzu entnehmen Sie bitte dem folgenden Abschnitt „Durchführung einer Messung“.

Entscheiden Sie sich bei dem Pull-down-Menü

Messmethode für
 2 Mikrofon oder
 4 Mikrofon Methode

je nach dem, welchen Messaufbau Sie gewählt haben. Geben Sie unter dem Pull-down-Menü

Kalibrierung entweder
 neu: QGU oder
 neu: ISO

als gewünschte Kalibrieremethode an. Näheres zu den Kalibrieremethoden QGU (quasi-gleicher-Umfang) und ISO (angelehnt an ISO 10534-2) finden Sie in Kap.3.3. Empfohlen wird die Kalibrierung nach QGU (default).

Ändern Sie hier nur die Materialdaten (Name, Dicke), falls Sie eine andere Probe als die empfohlene („Kalibrierprobe Melaminharzschaum weiss“) verwenden, und klicken dann

kalibrieren.

Sie müssen nun zwei (2-mic) bzw. viermal zwei (4-mic) Beschallungen durchführen, bei denen jeweils ein (2-mic) bzw. zwei Mikrofonpaare (4-mic) vertauscht werden. Als Messobjekt sollte ein möglichst reflexionsarmes Material benutzt werden. Die jeweiligen erforderlichen Mikrofonpositionen werden in Dialogboxen angezeigt. Die Mikrofone sind mit Buchstaben ‚A‘ ‚B‘ (2-mic) bzw. ‚A‘ ‚B‘ ‚C‘ ‚D‘ (4-mic) bezeichnet. Die Positionen sind von eins bis sechs nummeriert.



Abb. 6-8: Mikrofonpositionen

Für eine 4-mic-Messung mit kurzem Mikrofonabstand ergibt sich folgende Mikrofonreihenfolge:

Messung Nr.	Mik. in Pos.2	Mik. in Pos.3	Mik. in Pos.4	Mik. in Pos.5
1	A	B	C	D
2	C	D	A	B
3	D	C	B	A
4	B	A	D	C

Nach der letzten Beschallung wird im Hauptfenster der Reflexionsfaktor dieser Kalibrierprobe angezeigt. Sie haben jetzt eine für die Folgemessungen geltende Kalibrierfunktion abgelegt. Wenn Sie entscheidende Eingriffe in den Messaufbau tätigen, wie zum Beispiel von 2-mic- auf 4-mic-Methode oder die Mikrofonvorverstärker neu einpegeln, wiederholen Sie diese Kalibrierprozedur. Folgemessungen werden immer mit der jüngsten gespeicherten Kalibrierfunktion kalibriert. Für jedes Projekt können immer nur zwei Kalibrierfunktionen verwendet werden (2-mic und 4-mic). Sollten Sie eine andere Kalibrierfunktion wünschen, können Sie die Kalibrier-Datei im Projektordner/Messungen löschen, verschieben oder kopieren. Die Kalibrierfunktionen haben folgende Dateiendungen:

- - .KQ2 Kalibrierfunktion nach QGU für 2-mic-Messungen
- - .KI2 Kalibrierfunktion nach ISO für 2-mic-Messungen
- - .KQ4 Kalibrierfunktionen nach QGU für 4-mic-Messungen
- - .KI4 Kalibrierfunktionen nach ISO für 4-mic-Messungen

Es sei jedoch noch einmal darauf hingewiesen, dass es nicht sinnvoll ist ältere Kalibrierfunktionen zu verwenden, da sie sehr empfindlich auf Änderungen des Messaufbaus und der Vorverstärker sind.

6.3 Durchführung einer Messung

Nach der Kalibrierung befinden Sie sich wieder im Darstellungsfenster.

Um nun Ihre erste Messung durchzuführen, klicken Sie auf den Button

Neu.

Es öffnet sich nun das Einstellungsfenster, in dem Sie alle benötigten Informationen und Einstellungen für die folgende Messung eingeben können.

Abb. 6-9: Fenster CATS8

Neben den Metadaten, wie

Prüfort oder
verwendete Soundkarte,

geben Sie hier die Messeinstellungen ein:

Methode: Wählen Sie aus:
2 Mikrofon oder
4 Mikrofon

sowie:

Mikrofonabstand: Wählen Sie aus:
kurz gültig für: $171,65 \text{ Hz} < f < 1373,3 \text{ Hz}$ oder
weit gültig für: $85,75 \text{ Hz} < f < 686 \text{ Hz}$

je nachdem für welchen Messaufbau Sie sich entschieden haben.

Messsignal: Wählen Sie aus:
Rauschen oder
MLS

Neben der nach Kap.6.2.3.2 erstellten Kalibrierfunktion kann für Testzwecke eine Probe auch mit sich selbst kalibriert werden. Dies geschieht über das Menü:

Kalibrierung.

Wollen Sie mit der nach Kap.6.2.3.2 erstellten gespeicherten Kalibrierfunktion kalibrieren, wählen Sie

vorhanden

Wenn Sie die Kalibrierung mit Ihrer aktuellen Probe durchführen wollen, wählen Sie

neu: QGU oder

neu: ISO

je nachdem welche Methode Sie bevorzugen. Bei reflexionsarmen Proben macht die gewählte Methode keinen Unterschied, verwenden Sie jedoch eine Probe mit höheren Reflexionsfaktoren ist die QGU Methode vorzuziehen. Die so erstellte Kalibrierfunktion wird jedoch nicht gespeichert. Empfohlen ist aber auf jeden Fall mit einer vorhandenen Kalibrierfunktion zu arbeiten. Näheres entnehmen Sie Kap. 3.3.

Die Soundkarte wird beginnend mit 11025 Hz gefolgt mit allen gängigen Samplingfrequenzen auf Funktion geprüft und die niederste mögliche Samplingfrequenz im Feld

Sampling

in [Hz] angezeigt. Generell kann jede von Soundkarte und Treiber unterstützte Samplingfrequenz angegeben werden. Die aufgenommenen Daten erfahren jedoch unmittelbar nach der Aufnahme ein

Resampling

mit der frei wählbaren Resamplingfrequenz (Standard: 11025 Hz) und werden ggf. auch in dieser zeitlichen Auflösung gespeichert.

Obere Grenzfrequenz:

Bis zu dieser Frequenz werden die Daten berechnet. Sie beträgt maximal die Hälfte der Resamplingfrequenz, und mindestens 2000 Hz.

FFT Länge[2^n]: Exponent der Länge der FFT, Standardwert: 14

Blocklänge[2^m]: Exponent der Länge eines Blockes, Standardwert: 14

Blockanzahl: Anzahl an Blöcken, Standardwert: 25

aus den letzten beiden Parametern wird die die

Messzeit

bestimmt. Umgekehrt wird bei Eingabe der Messzeit die Blockanzahl ermittelt. Solange Standardwerte gewählt sind bleibt die Checkbox

Standardwerte

angewählt, umgekehrt können mit deren Aktivierung die empfohlenen Messeinstellungen gesetzt werden.

Sollen die aufgenommenen Audiodateien der einzelnen Mikrofone gespeichert werden, aktivieren Sie:

WAVs speichern

Aus den Einträgen

Material

Materialstärke

fortl. Nr.

sowie den Messeinstellungen, wird der Dateiname gewonnen. Aus den Messeinstellungen wird hierfür folgendermaßen ein Buchstabentripel gewonnen:

erster Buchstabe:	2	für 2-mic	oder
	4	für 4-mic	
zweiter Buchstabe:	K	für kurzen Mikrofonabstand	oder
	W	für weiten Mikrofonabstand	
dritter Buchstabe:	R	für Rauschen	oder
	M	für MLS	

Der Dateiname setzt sich nun nach folgendem Format zusammen:

Material_Materialstärkemmm_Buchstabentripel_fortlNr.CAT

z. B.: Styropor_050mm_4KR_01.CAT

Hierbei wird die fortlaufende Nummer automatisch gesetzt bzw. erhöht, wenn gleiche Dateinamen auftreten.

Im oberen rechten Bereich des Fensters sehen Sie einerseits den vollständigen Dateinamen, der für die Messung vergeben wird, und andererseits den Namen der Kalibrierfunktion, die Sie gerade verwenden.

Die Eingabe von

Datum und
Uhrzeit erfolgt automatisch.

Die Angaben von

Temperatur (Standardwert: 21°C) und
Luftfeuchte (Standardwert: 50%rel.)

können editiert werden, und sind jedenfalls erforderlich. Wenn keine Korrektur oder Bestätigung erfolgt werden die Standardwerte rot dargestellt und übernommen.

Haben Sie alles hinreichend ausgefüllt und eingestellt, kann die eigentliche Messung beginnen. Klicken Sie hierzu den Button

messen.

Nach der letzten Beschallung wird im Darstellungsfenster der Reflexionsfaktor dieser Messung angezeigt.

Haben Sie bereits eine Messung durchgeführt, und wollen diese als Ausgangspunkt für eine weitere nutzen, verwenden Sie das der Messung zugehörige Kontextmenü (rechter Mausklick)

Messung wiederholen.

Damit werden in alle Felder im Einstellungsfenster die Daten übernommen, und die fortlaufende Nummer um eins erhöht.



Abb. 6-10: Kontextmenü Messung wiederholen

Alternativ können Sie im Darstellungsfenster auf den zentralen Button *neu* klicken, und im Einstellungsfenster alle Daten neu eingeben.

6.4 Darstellung der Messergebnisse

6.4.1 Anzeigen der Parameter

In Abb. 6-11 ist das Darstellungsfenster CATS8_graph zu sehen.

Auswahl der Messdaten

Um den gewünschten Parameter anzuzeigen, gehen Sie folgendermaßen vor: In der linken Dateiauswahlbox sehen Sie alle anzeigbaren Messungen ihres Projektes. Markieren Sie eine oder mehrere Messungen und klicken Sie den Button, auf dem der Doppelpfeil nach rechts abgebildet ist:

[>>]

Hierdurch verschieben Sie die Messung in die rechte Dateiauswahlbox, in der diejenigen Messungen eingetragen sind, die aktuell angezeigt werden. Wählen Sie nun auf der linken oberen Seite den anzuzeigenden Parameter aus. Standardmäßig ist hier der Reflexionsfaktor ausgewählt.

Wahl der Anzeigeparameter

Während die Parameter

Reflexionsfaktor,

Reflexionsgrad,

Absorptionsgrad,

Wandimpedanz (spezifische akustische Impedanz) und

Wandadmittanz (spezifische akustische Admittanz)

immer verfügbar sind, können Sie die Parameter

Transmissionsfaktor und

Durchg.dämpfung (Durchgangsdämpfung)

messprinzipbedingt nur anwählen, wenn sich ausschließlich 4-mic-Messungen in der rechten Dateiauswahlbox befinden. Selbiges gilt für die Autoleistungsspektren

S_{CC} und S_{DD} .

S_{AA} und S_{BB} sind hingegen jederzeit verfügbar.

Die Autoleistungsspektren sind sowohl im linearen als auch im logarithmischen Maßstab darstellbar.

In dem Bereich für *Rohrabschluss* geben Sie an, ob für die 4-mic-Messungen der Rohrabschluss

schallhart oder

reflexionsarm

gerechnet und somit angezeigt werden soll. Ist keine der beiden Optionen angewählt, sehen Sie das „in situ“ Ergebnis d.h. „so wie es ist“, Absorber mit Luftvolumen und passivem Lautsprecher dahinter.

Links unten wählen Sie aus, ob Sie

Betrag,

Phase,

Re (*Realteil*) und/oder den

Im (*Imaginärteil*) betrachten wollen.

Die Legende wird rechts neben dem Graphen angezeigt, und ist folgendermaßen zu interpretieren: Die Nummerierung finden Sie in der rechten Dateiauswahlbox der angezeigten Messungen wieder mit den Zusätzen

B für Betrag

P für Phase

R für Realteil

I für Imaginärteil

Haben Sie mehrere Male die gleiche Probe gemessen, und wünschen einen Mittelwert aller angezeigten Messungen so aktivieren Sie

Mittelwert.

Es werden nun alle Messungen der rechten Dateiauswahlbox getrennt nach Betrag und Phase gemittelt angezeigt.

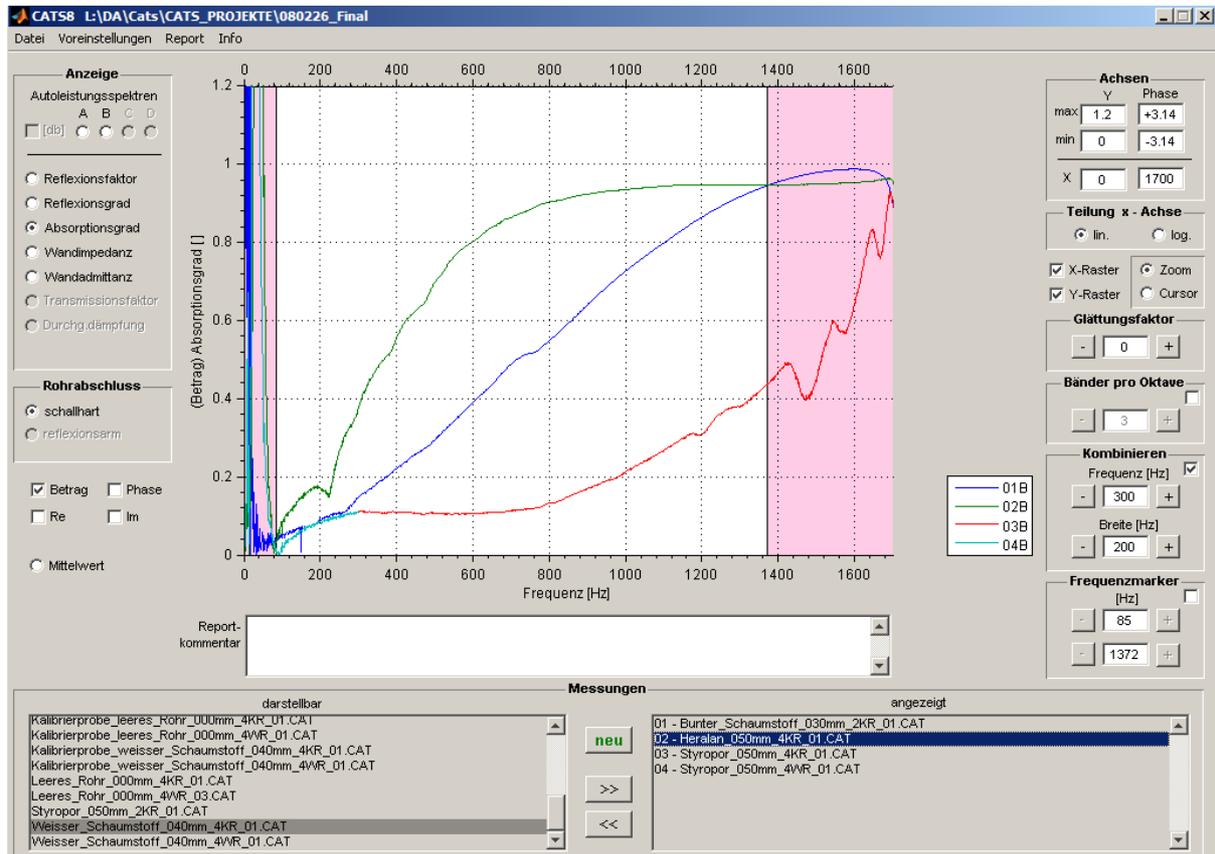


Abb. 6-11: Fenster CATS8 Graph

Darstellungsoptionen

Zur Skalierung der Achsen haben Sie die Möglichkeit ein Minimum und Maximum der X- bzw. Y-Achse anzugeben.

Achsen

min

max

Dies können Sie für die linke (Betrag, Realteil, Imaginärteil) und die rechte (Phase) Y-Achse getrennt angeben. Hierzu werden Ihnen aber jeweils zu den angezeigten Parametern passende Werte vorgeschlagen. Weiters können Sie die X-Achse linear oder logarithmisch darstellen lassen:

Teilung x-Achse

lin

log

Um genauere Untersuchungen der Kurven anzustellen, können Sie zwischen dem Zoom- und dem Cursortool auswählen.

Zoom

Mit dem Zoomtool können Sie in die Kurve hineinzoomen und per Doppelklick wieder herauszoomen. Weitere Zoomfunktionen erreichen Sie per Rechtsklick durch das Kontextmenü. Interessiert Sie der genaue Zahlenwert an einer bestimmten Stelle, wechseln Sie auf das Cursortool.

Cursor

Klicken Sie an eine beliebige Stelle der Kurve, und Ihnen wird der genaue X- und Y-Wert angezeigt. Mit den Pfeiltasten können Sie schrittweise nach links oder rechts springen. Wollen Sie diese Anzeige nicht mehr sehen, drücken Sie die Entfernen-Taste. Weiters können Sie mit

X-Raster bzw.

Y-Raster

ein Gitter in X-, bzw. Y-Richtung einblenden.

Glättungsfaktor

ermöglicht die angezeigten Kurven zu glätten. Dies geschieht durch ein Moving-Average-Filter mit der Breite $2^{\text{Glättungsfaktor}}$. Der maximale Wert beträgt hierbei 6. Ein Glättungsfaktor von 0 entspricht keiner Glättung.

Bänder pro Oktave

bestimmt die Anzahl der pro Oktave angezeigten Frequenzbänder, sowie die Größe der im Report eingefügten Tabelle. Näheres hierzu entnehmen Sie bitte Abschnitt „Erstellung eines Reports“.

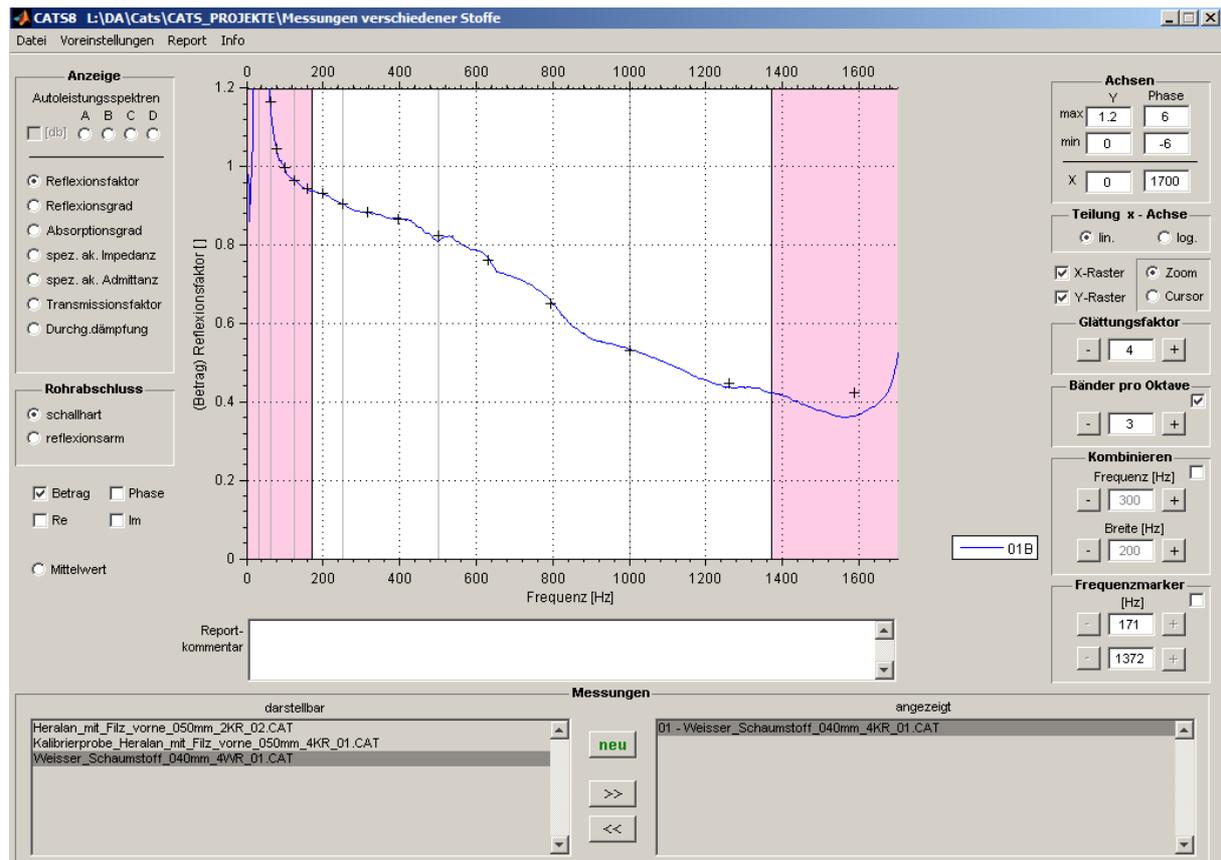


Abb. 6-12: Fenster CATS8 Graph mit Bändermarkierungen

Die akustischen Materialparameter werden für tiefe Frequenzen mit *weitem* Mikrofonabstand und für hohe Frequenzen mit *kurzem* Mikrofonabstand bestimmt. Eine Kombination beider Messanordnungen ergibt einen erweiterten Frequenzbereich und erfolgt durch Anwählen der Checkbox:

Kombinieren mit den Einstellungen:
Frequenz (Übergangsfrequenz)
Breite (Übergangsbreite)

In der rechten Dateiauswahlbox werden Messungen gleichen Stoffes und gleicher fortl. Nummer erkannt (Unterschied nur im Buchstabetripel - ‚K‘ oder ‚W‘) und entsprechend den Einstellungen kombiniert.

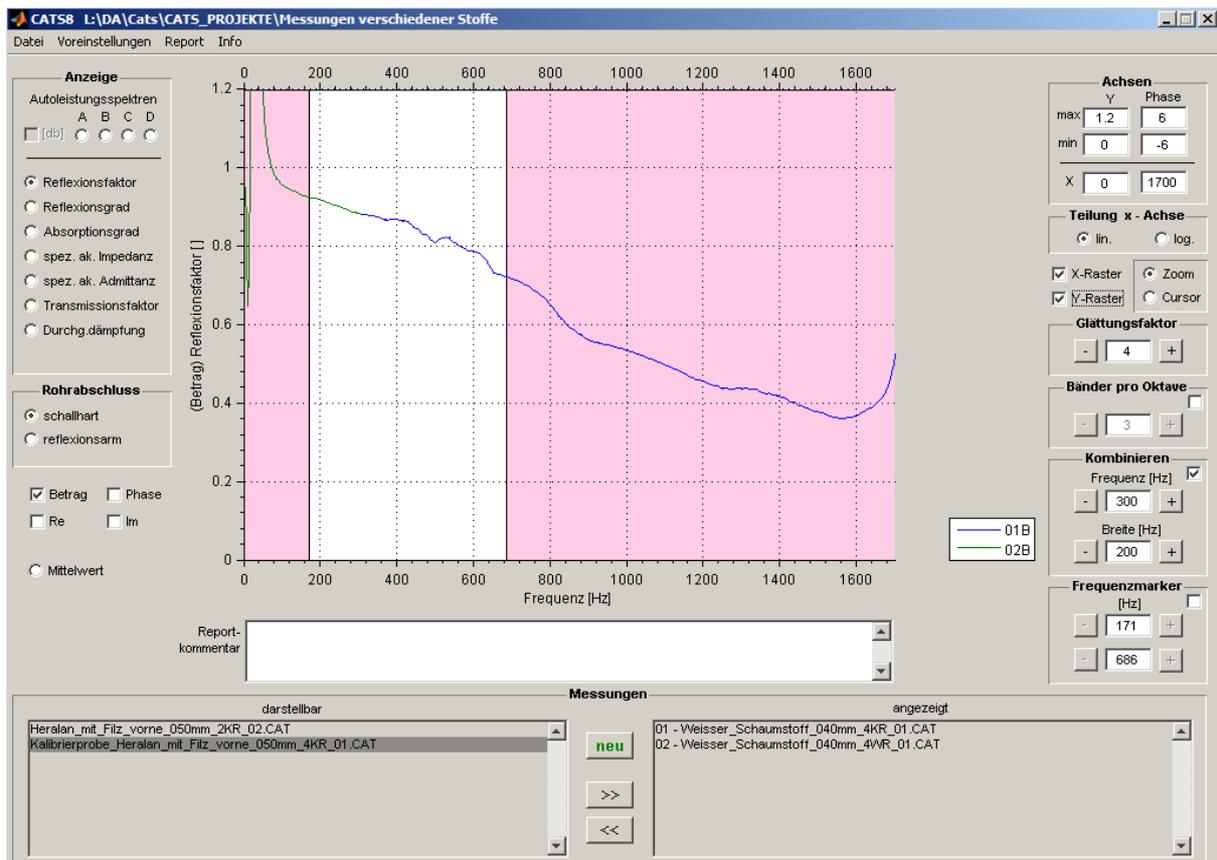


Abb. 6-13: Fenster CATS8 Graph mit kombinierten Messungen

Zur beliebigen Verwendung sind zwei frei positionierbare Frequenzmarkierungen vorgesehen.

Frequenzmarker

Dies sind zwei senkrechte Linien, die Sie frei nach links und rechts bewegen können. Zum Positionieren aktivieren Sie die entsprechende Checkbox und geben Sie jeweils eine Frequenz ein. Ist die Checkbox nicht aktiviert, zeigen die beiden Frequenzmarker die obere und die untere Grenzfrequenz an, für welche die angezeigten Messungen gültig sind (vgl. Kapitel 3.2). Es wird der kleinste gültige Bereich aller Messungen der rechten Dateiauswahlbox angezeigt.

Wollen Sie das Programm schließen, nutzen Sie das Menü *Datei*→*CATS8 beenden* oder schließen Sie das Programmfenster. Hiermit wird die Position des Programmfensters gespeichert, und beim nächsten Öffnen erscheint es eben an diesem Ort.

6.4.2 Verwalten der Messungen

Über das Kontextmenü (rechter Mausklick über einer Messdatei in der rechten oder linken Dateiauswahlbox)

Info

gelangen Sie wieder zum Einstellungsfenster *CATS8*. Nutzen Sie diese Funktion um nachträglich die Bemerkungen zur Messung sowie zum Projekt oder auch den Dateinamen zu editieren. Nicht gebrauchte Messungen löschen Sie über das Kontextmenü (rechter Mausklick)

Messung löschen,

wodurch Sie ebenfalls in das Einstellungsfenster *CATS8* gelangen und mit dem Button

löschen

die Messung in den Papierkorb verschieben.



Abb. 6-14: Kontextmenü Messung löschen

6.4.3 Erstellung eines Reports

Nachdem Sie Ihre gewünschten Messungen mit allen Einstellungen, wie Mittelung, Glättung, Bänder pro Oktave, Kombination usw., zusammengestellt haben, bietet *CATS8* die Möglichkeit Ihre Ergebnisse als html-Datei zu exportieren. Dieser Report besteht im Wesentlichen aus einer Abbildung, die die aktuell dargestellten Kurven zeigt, den Kommentaren zum Projekt, zur Messung und zum Report, sowie Tabellen, die die genauen Werte der angezeigten Frequenzbänder zeigen.

Um zu jeder Kurve eine Tabelle anzulegen, aktivieren Sie die Checkbox

Bänder pro Oktave

und geben Sie die von Ihnen gewünschte Unterteilung an. Sie bestimmt in wie viele Bänder die Oktaven zwischen den Fixbändern (31.25 Hz, 62.5 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1 kHz) unterteilt werden. In der Abbildung werden nun die Oktavfrequenzen mit senkrechten grauen Linien, und die Unterteilungen mit schwarzen Kreuzen dargestellt. Die Kreuze markieren die Tabellenwerte für die Ausgabetabellen. Sie geben den Mittelwert im entsprechenden Frequenzband an und können daher geringfügig über oder unter der Kurve liegen

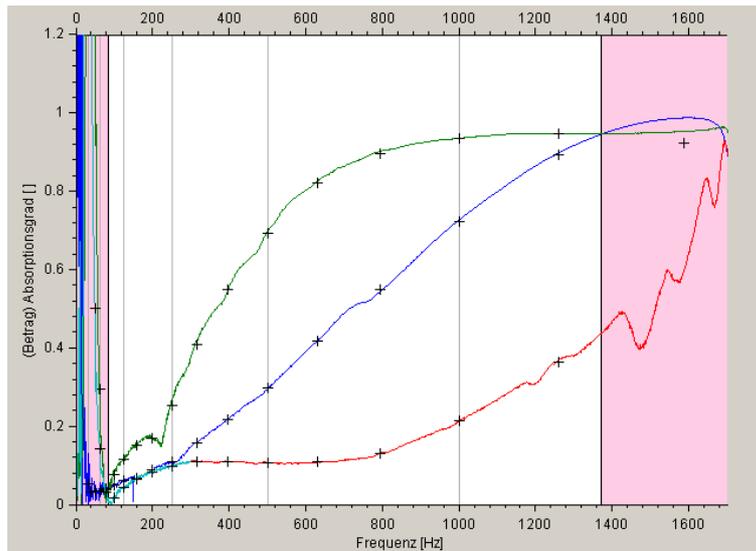


Abb. 6-15 Bändermarkierungen

Mit dem Menüpunkt

Report → *Report neu*

wird nach der Aufforderung zur Eingabe des Reportnamens ein neuer Report erstellt. Dieser besteht aus:

- einer Überschrift, die dem Projektnamen entspricht,
- den Kommentaren zum Projekt und zur Auswahl,
- der Abbildung mit dazugehöriger Legende und Einstellungen, sowie
- den zu den einzelnen Kurven gehörigen Tabellen.

Der gerade erstellte Report wird im MATLAB[®]-internen Browserfenster angezeigt. Die erstellten Abbildungen werden im selben Verzeichnis als .png Bilddateien abgelegt. Die Dateinamen entsprechen hierbei dem Reportnamen mit angehängter fortlaufender Nummerierung.

Um an diesen Report noch weitere Kurven und Tabellen anzuhängen, benutzen Sie den Menüpunkt

Report → *Report erweitern*,

und wählen Sie einen Report aus den Sie erweitern wollen. Hierbei wird keine Überschrift und kein Kommentar zum Projekt mehr exportiert, da diese übergeordnet und projektbezogen sind.



Abb. 6-16: Menü Report

Es werden lediglich die Abbildung, die Legende, die Einstellungen und die Tabellen an den bestehenden Report angehängt. Als Beispiel dient Kap. 7.1.

6.5 Globale Parameter

Wenn im Messaufbau entscheidende Veränderungen vorgenommen werden, wie z.B. Änderungen der geometrischen Abmessungen einzelner Rohrstücke, muss dies dem Programm „mitgeteilt“ werden.

Hierfür liegt im Programmordner ein .m-File namens „*CatsGlobaleKonstanten*“. Hier können alle Rohrabmessungen verändert werden.

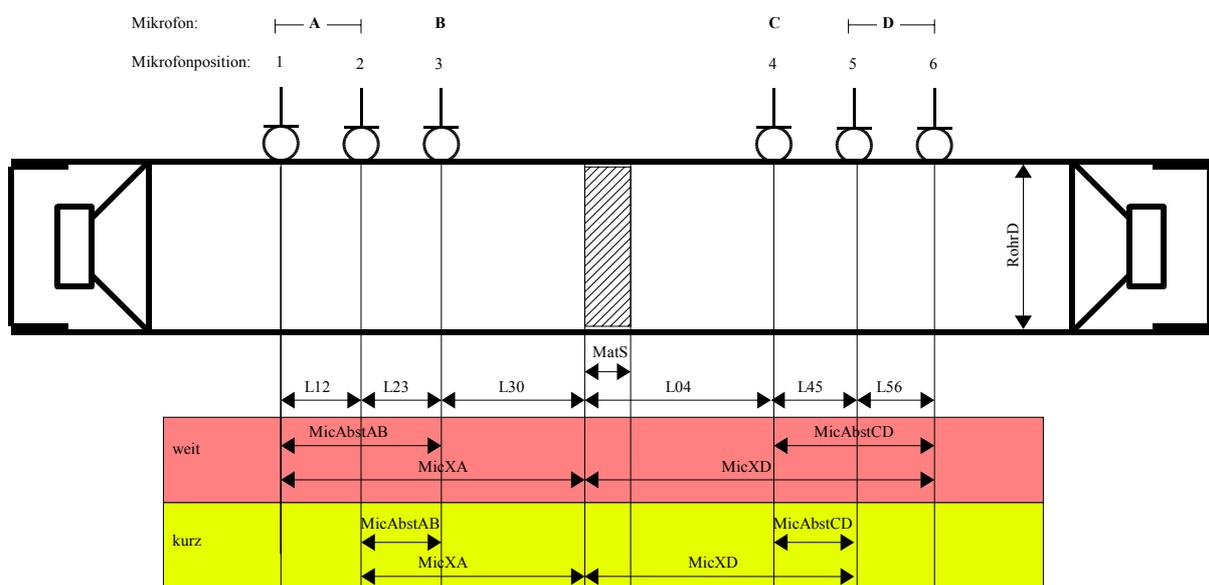


Abb. 6-17: geometrische Parameter

In Abb. 6-17 sind die geometrischen Parameter des Messrohres dargestellt. Alle Längen sind in [m] anzugeben:

$handles.glk.RohrD$	=	0.1	Rohrdurchmesser
$handles.glk.L12$	=	0.1	Mikrofonabstand Mic.1 - Mic.2
$handles.glk.L23$	=	0.1	Mikrofonabstand Mic.2 - Mic.3
$handles.glk.L30$	=	0.1	Mikrofonabstand Mic.3 - Nullpunkt
$handles.glk.L45$	=	0.1	Mikrofonabstand Mic.4 - Mic.5
$handles.glk.L56$	=	0.1	Mikrofonabstand Mic.5 - Mic.6
$handles.glk.L04$	=	0.2	Mikrofonabstand Nullpunkt - Mic.4

Es können in „*CatsGlobaleKonstanten*“ auch Parameter angegeben werden, die die Soundkarte betreffen. Es handelt sich um:

<i>handles.glk.playdevice</i>	= 0	ID-Nr. aus MATLAB®-Befehl <i>'audiodevinfo'</i>
<i>handles.glk.fs0</i>	= 44100	Samplingfreq.; Eingangssignal wird mit <i>'fs0'</i> abgetastet
<i>handles.glk.recfirstch</i>	= 1	1. Aufnahme-Kanal
<i>handles.glk.reclastch2</i>	= 2	letzter Aufnahme-Kanal 2-mic-Methode
<i>handles.glk.reclastch4</i>	= 4	letzter Aufnahme-Kanal 4-mic-Methode
<i>handles.glk.recdevice</i>	= 0	ID-Nr. aus MatLab-Befehl <i>'audiodevinfo'</i>
<i>handles.glk.devicetype</i>	= <i>'asio'</i>	Treibertype

Weiter können einige messspezifische Parameter verändert werden:

<i>handles.glk.Anfang</i>	= 0.9	Einschwingzeit am Anfang der Messung [s]
<i>handles.glk.Ende</i>	= 0.05	Ausschwingzeit am Ende der Messung [s] (wegen Artefakte durch Resampling)
<i>handles.glk.fs</i>	= 11025	Resamplingfrequenz; Eingangssignal mit <i>'fs0'</i> wird auf <i>'fs'</i> umgerechnet

Im Code sind die Standwerte definiert und werden überprüft. Wenn hier Parameter geändert werden, wird dies über die command line Matlabs mitgeteilt ('A C H T U N G !!! Standard-globale-Konstanten wurden verändert !!!').

7 Evaluierung des Messsystems

In diesem Kapitel soll die Funktionalität des Messsystems anhand einiger Messungen gezeigt werden. Einerseits werden einige beispielhafte Reportdateien präsentiert, andererseits wird die 4-mic-Methode mit der 2-mic-Methode verglichen. Das erste Kapitel zeigt den erstellten Html-Report von Messungen von drei verschiedenen Absorbern. Im Einzelnen handelt es sich um:



Abb. 7-1: Beispielabsorber

1..... Melaminharzschaum mit 100mm Dicke

2..... Styropor mit 50mm Dicke

3..... Schaumstoff bunt mit 30mm Dicke

Die Messungen wurden mit der 4-mic-Methode mit 40s Messzeit und Rauschen als Testsignal durchgeführt. Für jeden Absorber wurden je eine Messung mit kurzem und eine mit weitem Mikrofonabstand gemacht, die kombiniert wurden. Die genauen Daten sind Abb. 7-2 zu entnehmen.

Messeinstellungen			
Methode	Mikrofonabstand	Messsignal	Kalibrierung
4 Mikrofon	kurz	Rauschen	vorhanden
Sampling [Hz]	Blockanzahl	Blocklänge [2 ⁿ m]	Messzeit [s]
44100	25	14	40.6
Resampling [Hz]	ob. Grenzfz. [Hz]	FFT-Länge [2 ⁿ m]	<input checked="" type="checkbox"/> Standardwerte
11025	2000	14	<input type="checkbox"/> WAVs speichern

Abb. 7-2: Messeinstellungen

Der Report wird erstellt, in dem man die erste Abbildung zusammenstellt, und einen neuen Report erstellt. Als Überschrift erhält man den Projektnamen und den Kommentar zum Projekt. Als Unterkapitel erhält man den Teil, der sich mit der Abbildung beschäftigt. Er ist mit dem betrachteten Parameter betitelt. Er enthält den Kommentar zum Report, die Abbildung mit Dateinamen, und die zugehörige Legende in tabellarischer Form. Weiter werden die Einstellungen der Abbildung ebenfalls in einer Tabelle angezeigt:

The image shows a software interface for display settings. It is organized into five vertically stacked sections, each with a title and a set of controls:

- Glättungsfaktor**: A numeric input field with a value of 0, flanked by minus and plus buttons.
- Bänder pro Oktave**: A checked checkbox, a numeric input field with a value of 3, and minus/plus buttons.
- Kombinieren**: A checked checkbox, a numeric input field for 'Frequenz [Hz]' with a value of 300, and minus/plus buttons. Below it is another numeric input field for 'Breite [Hz]' with a value of 200 and minus/plus buttons.
- Frequenzmarker [Hz]**: A checked checkbox, a numeric input field with a value of 171, and minus/plus buttons. Below it is another numeric input field with a value of 1372 and minus/plus buttons.

Abb. 7-3: Einstellungen der Anzeige

Durch das Aktivieren des Menüpunkts *Bänder pro Oktave* wird im Report zu jeder Kurve eine Tabelle angezeigt.

Ein nächster Parameter wird genau gleich erstellt, und mit der Funktion *Report erweitern* an den bestehenden Report angehängt. Der projektbezogene Überschrift-Teil wird also nicht noch einmal erstellt.

7.1 Beispielmessungen verschiedener Absorber

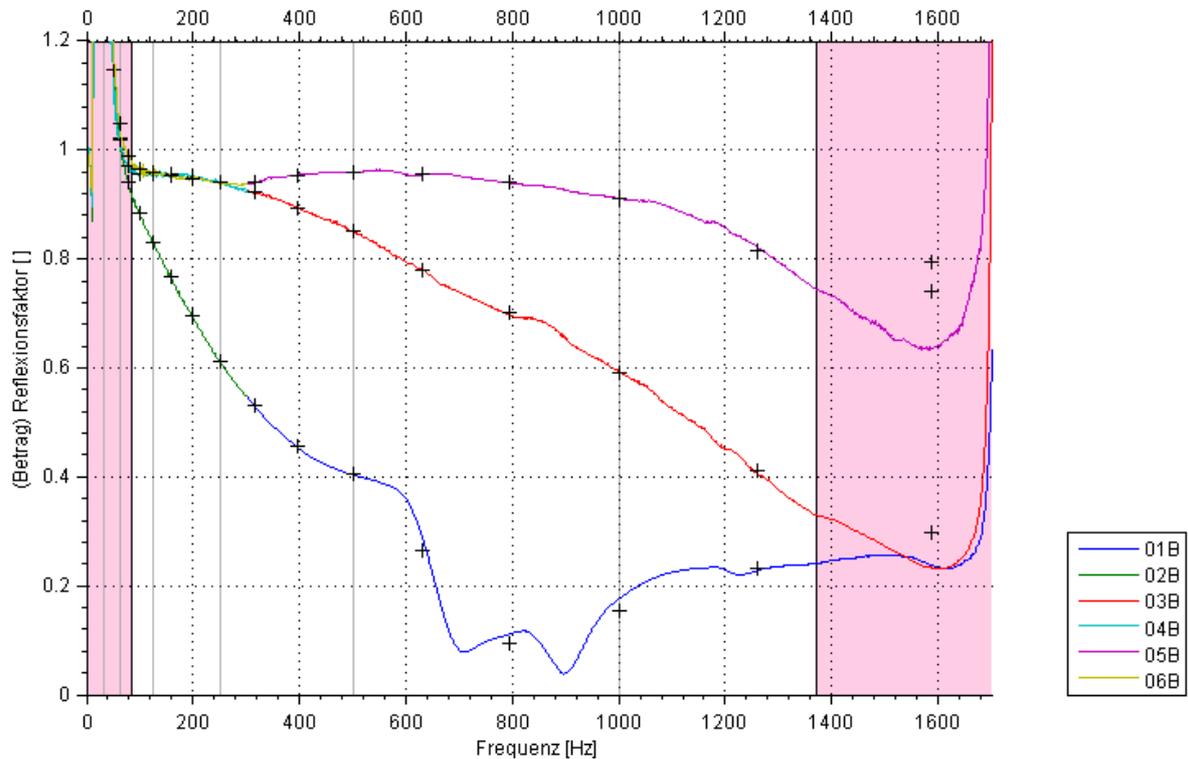
Kommentar zum Projekt:

Anhand einiger Beispielmessungen soll die Funktionalität des Messsystems und die Reportgenerierung gezeigt werden.

7.1.1 Reflexionsfaktor

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben1.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Reflexionsfaktor: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	10,49	62,5	1,021	125	0,8301	250	0,6131	500	0,4053	1000	0,1547
39,37	1,923	78,75	0,9402	157,5	0,7668	315	0,5319	630	0,2662	1260	0,2331
49,61	1,202	99,21	0,8833	198,4	0,6944	396,9	0,4565	793,7	0,09523	1587	0,2979

Reflexionsfaktor: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	5,017	62,5	1,019	125	0,9554	250	0,9399	500	0,8503	1000	0,5924
39,37	1,612	78,75	0,9722	157,5	0,9549	315	0,9221	630	0,7788	1260	0,4113
49,61	1,149	99,21	0,9569	198,4	0,9512	396,9	0,8941	793,7	0,7022	1587	0,7409

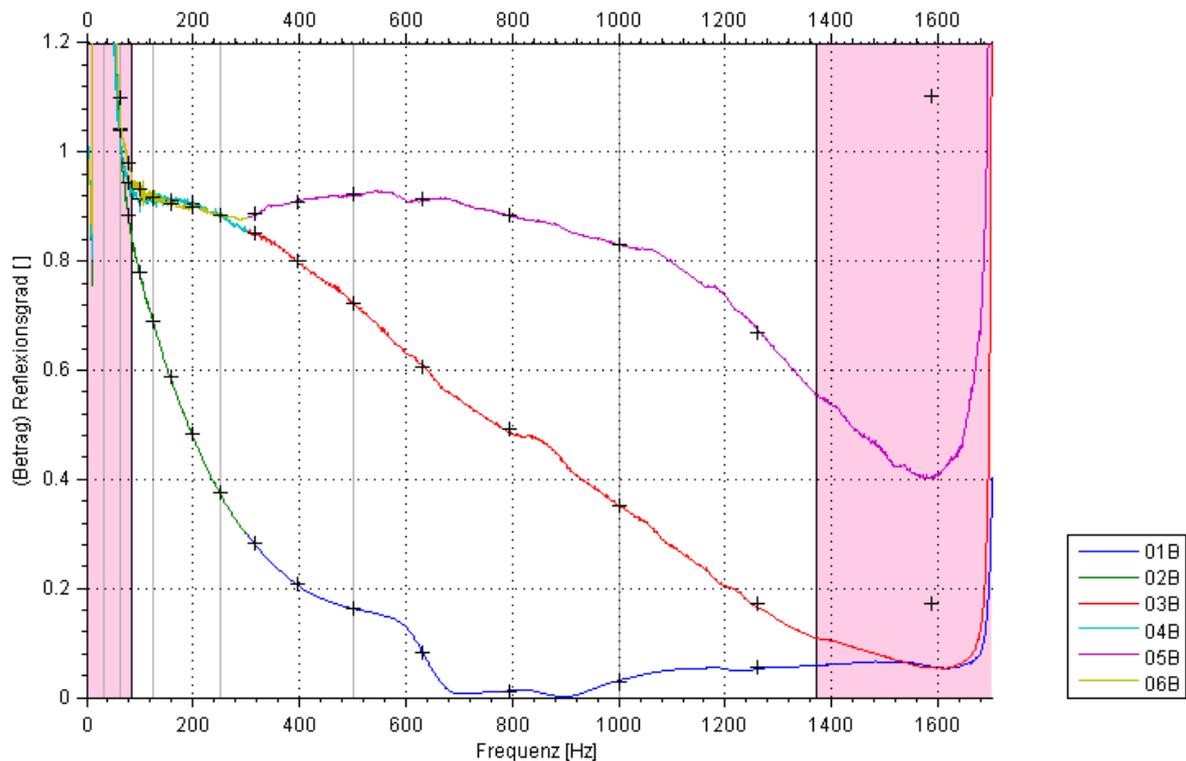
Reflexionsfaktor: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	3,113	62,5	1,049	125	0,9584	250	0,9409	500	0,9601	1000	0,9113
39,37	1,886	78,75	0,9898	157,5	0,9521	315	0,9414	630	0,9565	1260	0,8164
49,61	1,255	99,21	0,965	198,4	0,9476	396,9	0,9538	793,7	0,9405	1587	0,7944

7.1.2 Reflexionsgrad

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben2.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Reflexionsgrad: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	154	62,5	1,044	125	0,6893	250	0,3765	500	0,1644	1000	0,02782
39,37	3,857	78,75	0,8843	157,5	0,5884	315	0,2835	630	0,08227	1260	0,05439
49,61	1,451	99,21	0,7805	198,4	0,4826	396,9	0,2087	793,7	0,009396	1587	0,173

Reflexionsgrad: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	32,71	62,5	1,039	125	0,9128	250	0,8834	500	0,7233	1000	0,3527
39,37	2,646	78,75	0,9453	157,5	0,9119	315	0,8503	630	0,6071	1260	0,1728
49,61	1,324	99,21	0,9156	198,4	0,9049	396,9	0,7996	793,7	0,4935	1587	44,62

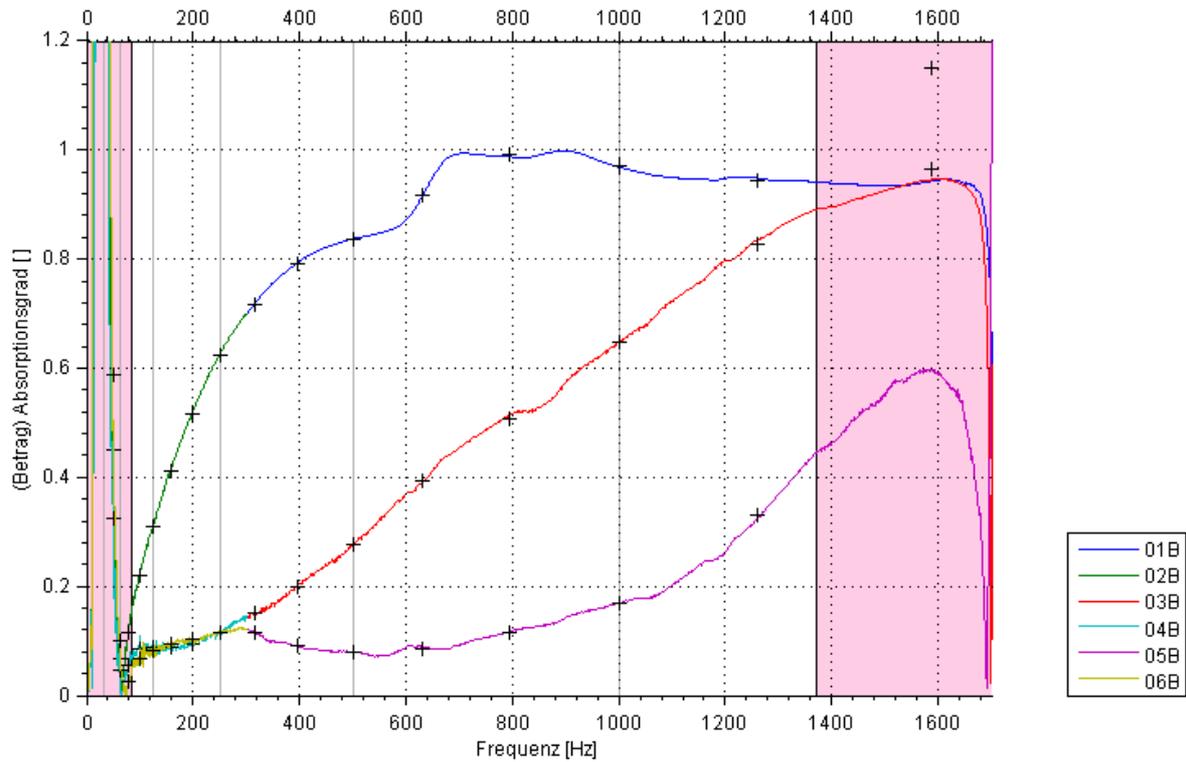
Reflexionsgrad: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	10,26	62,5	1,101	125	0,9186	250	0,8854	500	0,9218	1000	0,8306
39,37	3,582	78,75	0,9798	157,5	0,9065	315	0,8862	630	0,9148	1260	0,6689
49,61	1,587	99,21	0,9312	198,4	0,8979	396,9	0,9097	793,7	0,8847	1587	1,102

7.1.3 Absorptionsgrad

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben3.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Absorptionsgrad: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	153	62,5	0,06683	125	0,3107	250	0,6235	500	0,8356	1000	0,9722
39,37	2,857	78,75	0,1157	157,5	0,4116	315	0,7165	630	0,9177	1260	0,9456
49,61	0,4512	99,21	0,2195	198,4	0,5174	396,9	0,7913	793,7	0,9906	1587	0,9657

Absorptionsgrad: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	31,71	62,5	0,04695	125	0,08721	250	0,1166	500	0,2767	1000	0,6473
39,37	1,646	78,75	0,05469	157,5	0,08812	315	0,1497	630	0,3929	1260	0,8272
49,61	0,3237	99,21	0,08435	198,4	0,09512	396,9	0,2004	793,7	0,5065	1587	45,33

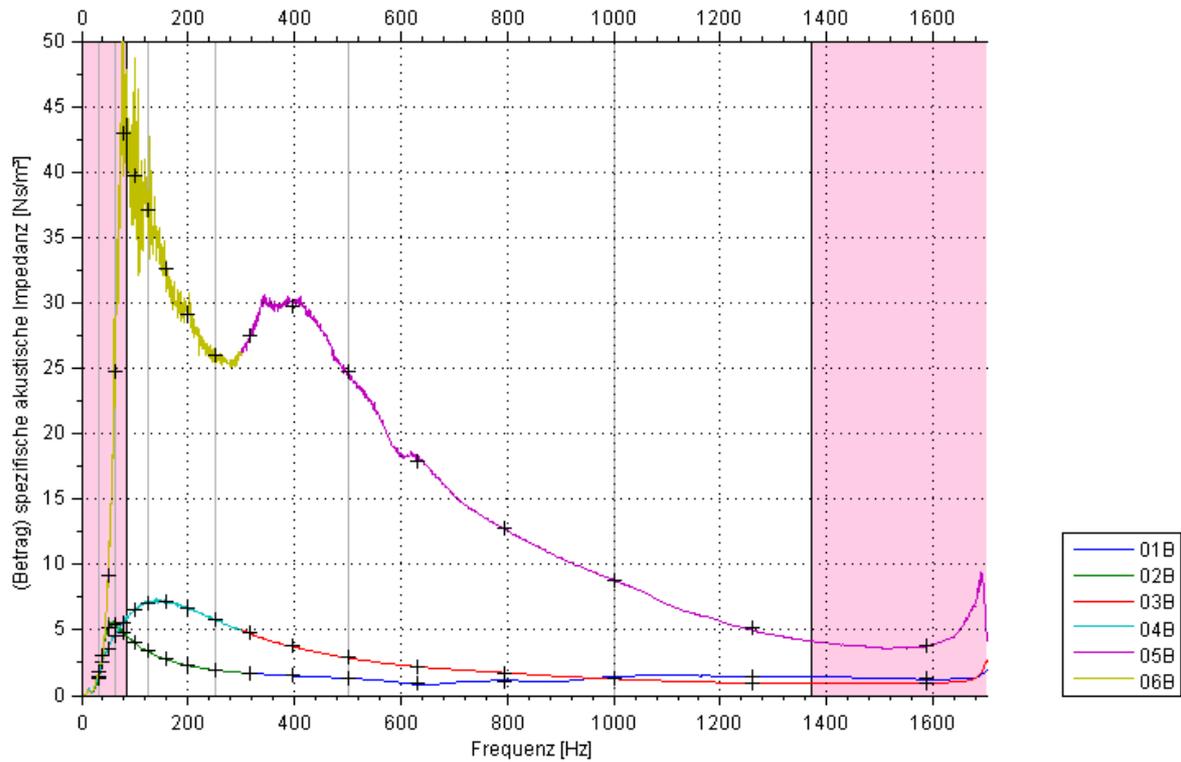
Absorptionsgrad: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	9,259	62,5	0,1012	125	0,08144	250	0,1146	500	0,07824	1000	0,1694
39,37	2,582	78,75	0,02463	157,5	0,09353	315	0,1138	630	0,08518	1260	0,3311
49,61	0,5869	99,21	0,06876	198,4	0,1021	396,9	0,09029	793,7	0,1153	1587	1,15

7.1.4 Wandimpedanz

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben4.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Wandimpedanz: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	1,257	62,5	5,403	125	3,374	250	1,965	500	1,304	1000	1,364
39,37	3,036	78,75	4,8	157,5	2,791	315	1,702	630	0,9378	1260	1,456
49,61	5,152	99,21	4,054	198,4	2,321	396,9	1,504	793,7	1,091	1587	1,271

Wandimpedanz: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	1,432	62,5	4,585	125	7,088	250	5,82	500	2,893	1000	1,272
39,37	2,517	78,75	5,606	157,5	7,154	315	4,757	630	2,225	1260	0,9557
49,61	3,607	99,21	6,489	198,4	6,669	396,9	3,741	793,7	1,736	1587	0,9621

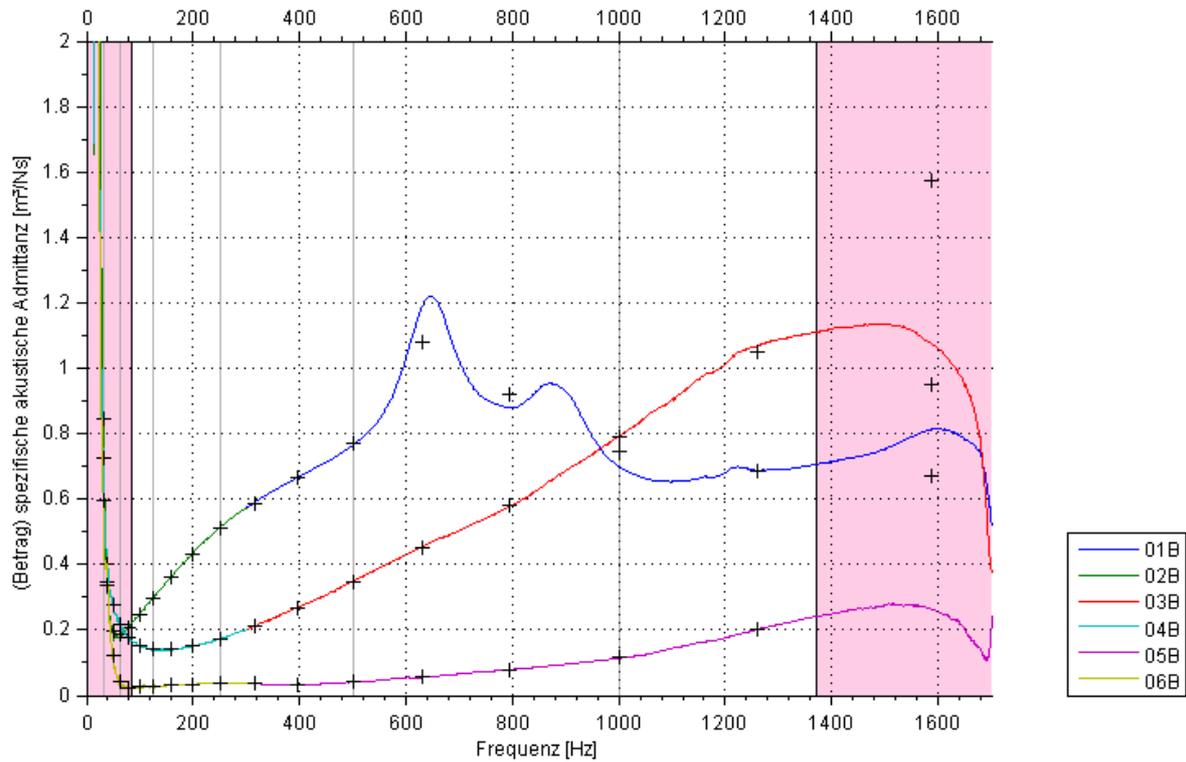
Wandimpedanz: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	1,765	62,5	24,78	125	37,08	250	26,04	500	24,78	1000	8,794
39,37	3,084	78,75	42,95	157,5	32,61	315	27,54	630	17,92	1260	5,127
49,61	9,129	99,21	39,75	198,4	29,07	396,9	29,7	793,7	12,82	1587	3,8

7.1.5 Wandadmittanz

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben5.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Wandadmittanz: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	0,8473	62,5	0,1852	125	0,2973	250	0,51	500	0,7691	1000	0,7442
39,37	0,3453	78,75	0,2087	157,5	0,3593	315	0,5883	630	1,078	1260	0,6871
49,61	0,1952	99,21	0,2473	198,4	0,4319	396,9	0,6656	793,7	0,9178	1587	0,9502

Wandadmittanz: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	0,7272	62,5	0,2191	125	0,1411	250	0,1723	500	0,3479	1000	0,7926
39,37	0,4035	78,75	0,1789	157,5	0,1398	315	0,2111	630	0,4517	1260	1,05
49,61	0,2791	99,21	0,1543	198,4	0,1501	396,9	0,2686	793,7	0,5798	1587	1,574

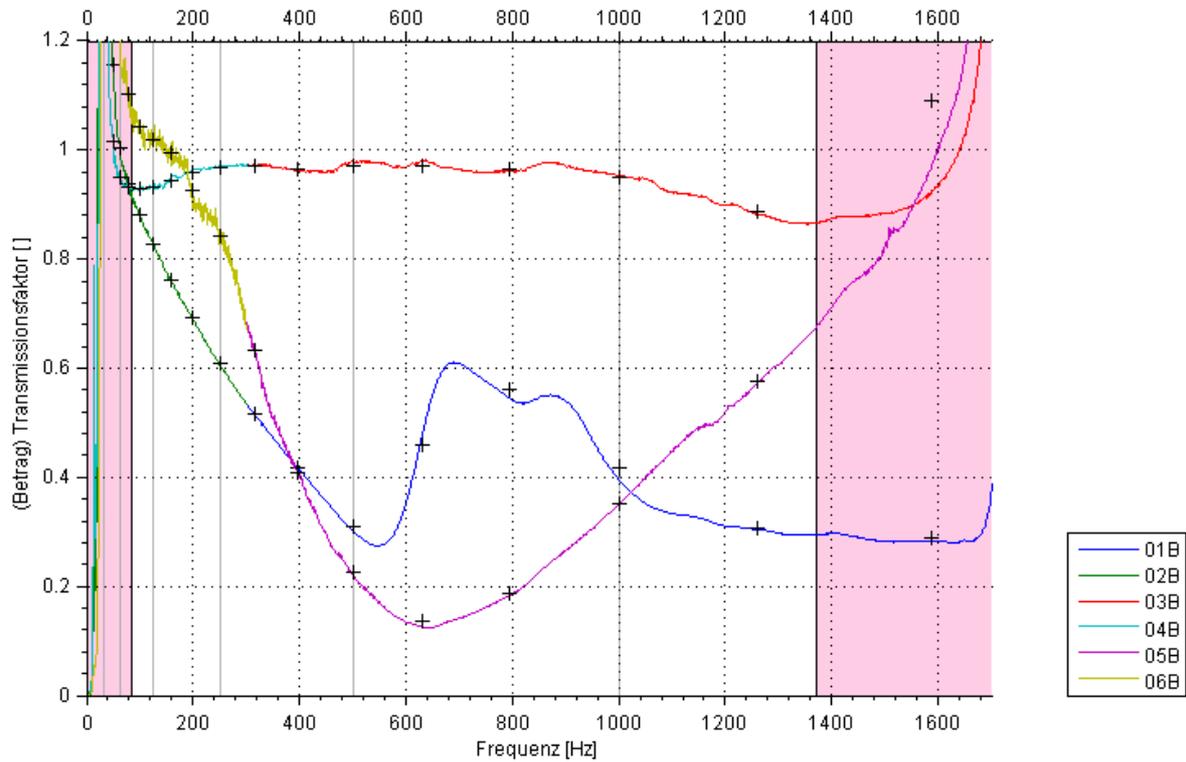
Wandadmittanz: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	0,5981	62,5	0,04376	125	0,02706	250	0,03843	500	0,04061	1000	0,1158
39,37	0,3382	78,75	0,02351	157,5	0,03076	315	0,03645	630	0,05618	1260	0,1999
49,61	0,1216	99,21	0,02542	198,4	0,03445	396,9	0,03368	793,7	0,07875	1587	0,6708

7.1.6 Transmissionsfaktor

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben6.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Transmissionsfaktor: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	9,821	62,5	1,004	125	0,8273	250	0,608	500	0,3089	1000	0,4178
39,37	1,799	78,75	0,9367	157,5	0,7624	315	0,517	630	0,4581	1260	0,3069
49,61	1,157	99,21	0,8813	198,4	0,6921	396,9	0,4174	793,7	0,5608	1587	0,2876

Transmissionsfaktor: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	3,262	62,5	0,9497	125	0,9324	250	0,969	500	0,9726	1000	0,9512
39,37	1,277	78,75	0,9325	157,5	0,944	315	0,9723	630	0,9721	1260	0,8881
49,61	1,015	99,21	0,9292	198,4	0,9602	396,9	0,9639	793,7	0,9649	1587	1,292

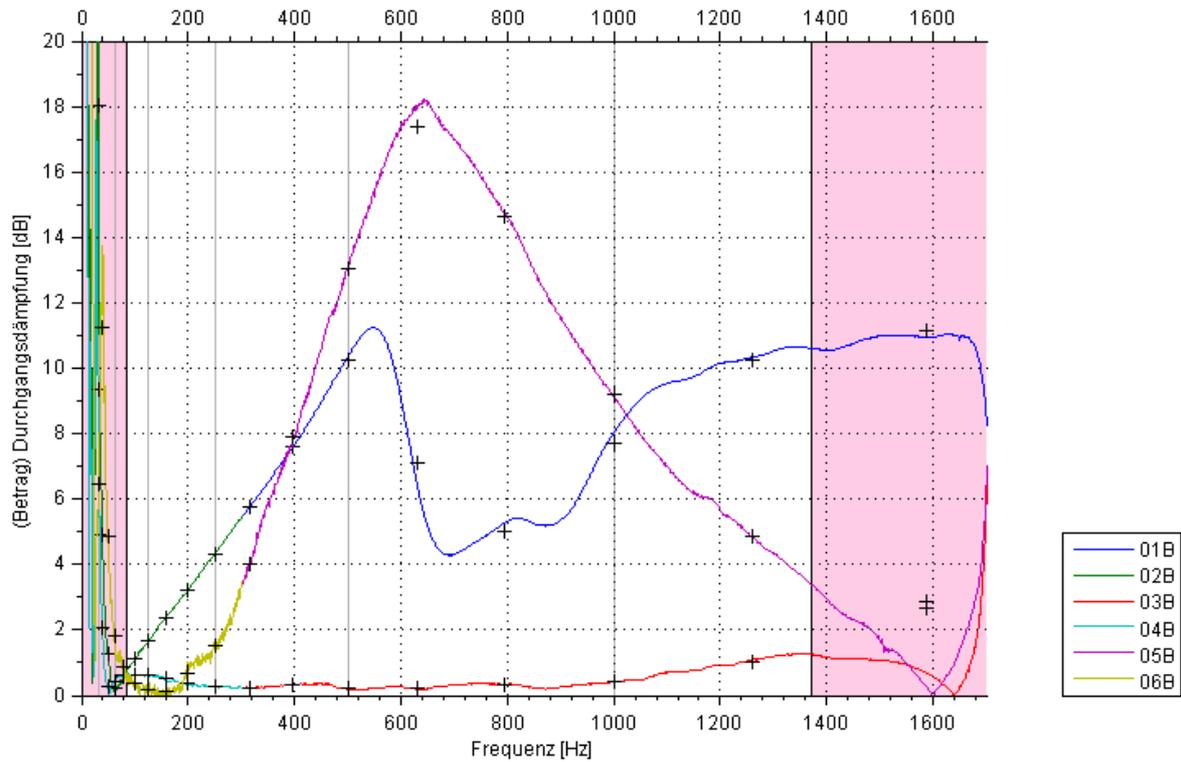
Transmissionsfaktor: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]	Hz	[1]
31,25	2,122	62,5	1,234	125	1,02	250	0,842	500	0,2266	1000	0,3528
39,37	3,702	78,75	1,104	157,5	0,9948	315	0,6338	630	0,1357	1260	0,5762
49,61	1,778	99,21	1,042	198,4	0,927	396,9	0,4073	793,7	0,1881	1587	1,091

7.1.7 Durchgangsdämpfung

Kommentar zum Report:

Hier steht der Kommentar zum Report



drei ausgewählte Proben7.png

Legende:

01 - Melaminharzschaum_100mm_4KR_01.CAT

02 - Melaminharzschaum_100mm_4WR_01.CAT

03 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_01.CAT

04 - Schaumstoff_bunt_030mm_4WR_01.CAT

05 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

06 - Styropor_050mm_4WR_01.CAT

Einstellungen:

Glättungsfaktor	0
Rohrabschluss	schallhart
Kombinationsfrequenz	300 Hz
Kombinationsbreite	200 Hz
Frequenzmarkierung 1	85 Hz
Frequenzmarkierung 2	1372 Hz

Durchg.dämpfung: Melaminharzschaum_100mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	18,04	62,5	0,2279	125	1,648	250	4,329	500	10,24	1000	7,709
39,37	4,928	78,75	0,5693	157,5	2,359	315	5,742	630	7,12	1260	10,27
49,61	1,255	99,21	1,099	198,4	3,201	396,9	7,613	793,7	5,03	1587	11,12

Durchg.dämpfung: Schaumstoff_bunt_030mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	9,331	62,5	0,4485	125	0,6082	250	0,2738	500	0,2419	1000	0,4356
39,37	2,077	78,75	0,6069	157,5	0,5006	315	0,2437	630	0,2458	1260	1,033
49,61	0,2596	99,21	0,6377	198,4	0,353	396,9	0,3198	793,7	0,3105	1587	2,845

Durchg.dämpfung: Styropor_050mm_4xR_01 (Kombination) Betrag

Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB	Hz	dB
31,25	6,446	62,5	1,806	125	0,174	250	1,503	500	13,04	1000	9,181
39,37	11,24	78,75	0,8519	157,5	0,1116	315	4,026	630	17,37	1260	4,858
49,61	4,877	99,21	0,3518	198,4	0,6654	396,9	7,891	793,7	14,64	1587	2,654

7.2 Vergleichsmessung 4-mic- / 2-mic-Methode

Um die Richtigkeit der Ergebnisse mit der 4-mic-Methode zu überprüfen, werden hier die Reflexionsfaktoren von 2 Proben einmal mit der 4-mic-Methode und einmal mit der 2-mic-Methode verglichen. Die 2-mic-Methode wurde schon in der Arbeit von Rudolf Brunnader evaluiert. Daher wird mit dieser verglichen.

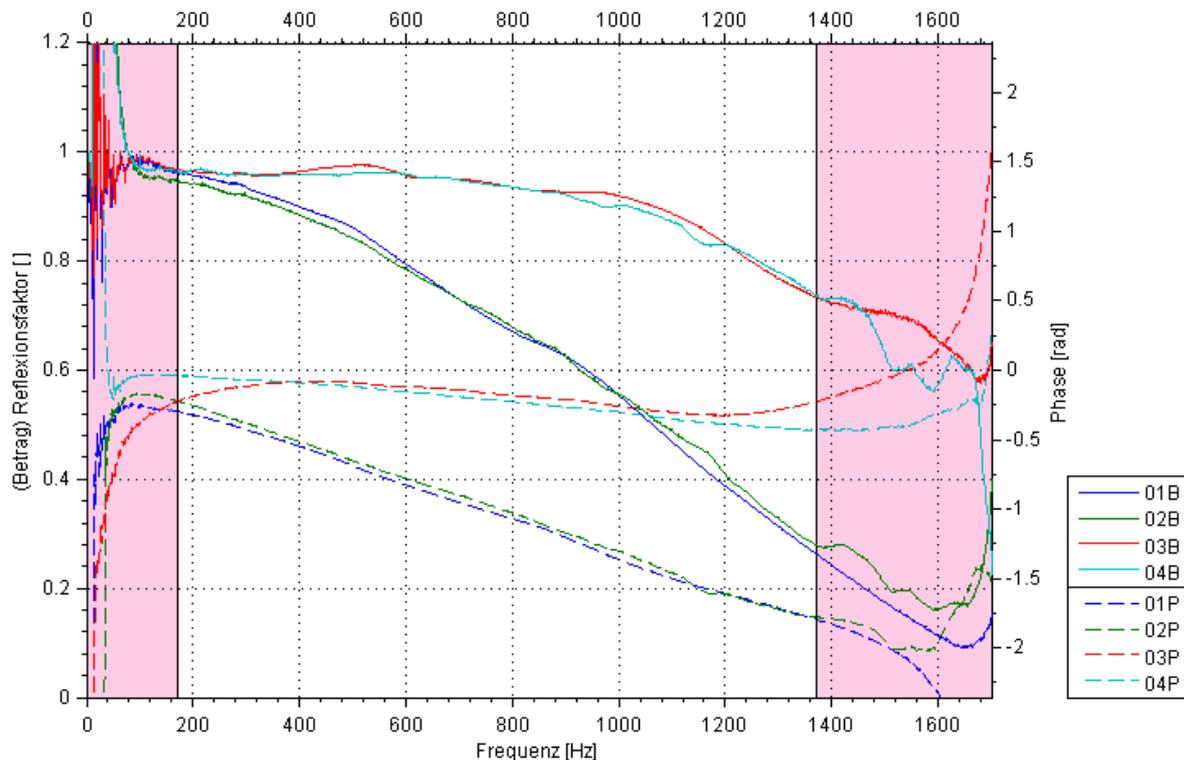


Abb. 7-4: Vergleich Reflexionsfaktor 2-mic- / 4-mic-Methode

Legende:

01 - Schaumstoff_bunt_030mm_2KR_01.CAT

02 - Schaumstoff_bunt_030mm_4KR_06.CAT

03 - Styropor_050mm_2KR_01.CAT

04 - Styropor_050mm_4KR_01.CAT

Wie man erkennen kann, stimmen die Ergebnisse recht gut überein. Unterschiede rühren vor allem vom ungleichen Einbau der Probe her. Die Probe wird bei der 2-mic-Methode vor einer schallharten Wand montiert. Bei der 4-mic-Methode erfolgt der schallharte Abschluss rein rechnerisch. Es erfolgt also keine Wechselwirkung mit der Probe.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem letzten Kapitel werden die Verwendungsmöglichkeiten des Messsystems noch einmal zusammengefasst, um abschließend auf Erweiterungsmöglichkeiten hinzuweisen.

8.1 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde ein bestehendes 2-mic-Impedanzrohr zu einem 4-mic-Impedanzrohr mit neuer Software weiterentwickelt, welches die akustischen Materialparameter Reflexionsfaktor, Reflexionsgrad, Absorptionsgrad, Wandimpedanz- und Admittanz, sowie Transmissionsfaktor und Durchgangsdämpfung eines Absorbers ermittelt.

Dieses besteht grundsätzlich aus zwei Teilen:

- Hardware: Es besteht aus mehreren Rohrstücken mit rundem Querschnitt, welches an beiden Enden mit einem Lautsprecher abgeschlossen ist. Hinzu kommen Öffnungen im Rohr an denen 4 Mikrofone angebracht werden.
- Software: Mit ihrer Hilfe werden die Ein- und Ausgangssignale generiert, aufgenommen und verwertet. Die Ergebnisse können mit ihr angezeigt, weiterverarbeitet und exportiert werden. Hierzu steht eine Benutzeroberfläche zur Verfügung, die mit einigen wenigen Fenstern und Menüs, und logischen Funktionseinheiten, es ermöglicht, die Messungen schnell und einfach durchzuführen und aufzubereiten. Auch ist die Messzeit gegenüber der alten Software deutlich verkürzt worden, was einerseits durch Verzicht auf Kalibrierung vor jeder Messung, andererseits durch die Halbierung der Messsignallänge erreicht wird.

8.2 Ausblick

Einige Möglichkeiten der Erweiterung des Messsystems sind gegeben durch:

8.2.1 Erweiterungen der Software

Reflexionsfaktor und Absorptionsgrad für schrägen Schalleinfall

Es handelt sich um berechnete Größen aus den Kettenmatrizen. Das heißt, dass sie gewonnen werden, ohne den Absorber auch wirklich schräg zu beschallen.

Diese könnten in einem 3D-Plot dargestellt werden. Denkbar wäre auch eine Variante mit einem editierbaren Textfeld zur Winkelangabe.

Reflexionsfaktor und Absorptionsgrad für diffusen Schalleinfall

Auch hier handelt es sich um berechnete Größen, bei denen die Probe nicht wirklich diffus beschallt wird.

Absorberimpedanz und komplexe Ausbreitungskonstante

Die Ausgabe müsste über ein Textfeld passieren, da diese Parameter nicht frequenzabhängig sind und sich als Kurve darstellen lassen.

Rechnerische Kombination mehrerer Absorber

Mehrere Absorber können über deren nacheinander gemessenen Kettenmatrixparameter rechnerisch zu einem kombinierten Absorber zusammengefasst werden. Mit dem bestehenden Messsystem können dann zum Vergleich die Parameter der wirklichen Kombination gemessen werden.

Ansprache der Audio-Schnittstelle

Die Ansprache der Audio-Schnittstelle könnte über einen aktuelleren Befehl als den verwendeten *pa_wavplay* geschehen, um stabilere Ein- und Ausgabe und größere Hardware-Unabhängigkeit zu garantieren.

Sinussweep als Erregersignal

Als Alternative zum Rauschen und zum MLS Rauschen könnte ein Sinussweep implementiert werden.

8.2.2 Erweiterungen der Hardware

Konstruktion weiterer Impedanzrohre

Durch kleinere Rohrdurchmesser ließe sich der Frequenzbereich der Messung nach oben verschieben. Eine Vergrößerung desselben ermöglicht die Vermessung größerer, strukturierter Absorber in einem tieferen Frequenzbereich.

Durch engeren Mikrofonabstand kann die vom Mikrofonabstand abhängige, obere Grenzfrequenz $f_{\max}(s)$ (Gl.(3.2)) angehoben und an die vom Rohrdurchmesser abhängige obere Grenzfrequenz $f_{\max}(d)$ (Gl.(3.1)) angepasst werden.

9 Literaturverzeichnis

in achronologischer Reihenfolge:

WESELAK W.; (2007):

Raumakustische Messtechnik, Kap. 2: Messungen in Messrohren, Skriptum SS 2007

BOONEN R.; SAS P. (2004):

Calibration of the two microphone transfer function method to measure acoustical impedance in a wide frequency range, Proceedings of ISMA 2004

BRUNNADER R. (2002):

Aufbau und Programmierung der 2p Messmethode im Impedanzrohr für die Messung akustischer Materialparameter, Diplomarbeit TU-Graz (Okt. 2002)

SONG B. H.; BOLTON J. S. (March 2000):

A transfer-matrix approach for estimating the characteristic impedance and wave numbers of limp and rigid porous materials, JASA, March 2000

EN ISO 10534-2 (1998):

Acoustics – Determination of sound absorption coefficient and impedance in impedance tubes – Part 2: Transfer-function method, ISO 10534-2:1998(E)

UTSUNO H.; TANAKA T.; FUJIKAWA T.; SEYBERT A. F. (Aug. 1989)

Transfer function method for measuring characteristic impedance and propagation constant of porous materials, JASA, August 1989

SEYBERT A. F. (June 1988):

Two-sensor methods for the measurement of sound intensity and acoustic properties in ducts, JASA, June 1988

CHU W. (July 1986):

Extension of two microphone transfer function method for impedance tube measurements, JASA, June 1988

CHUNG J. Y.; BLASER D. A. (Dec. 1980):

Transfer function method for measuring acoustic intensity in a duct system with flow, JASA, Dec. 1980

CHUNG J. Y.; BLASER D. A. (Sept. 1980):

Transfer function method for measuring in-duct acoustic properties, II: Experiment, JASA, Sept. 1980

Transfer function method for measuring in-duct acoustic properties, I: Theory, JASA, Sept. 1980

SEYBERT A. F.; ROSS D. F. (May 1977):

Experimental determination of acoustic properties using a two-microphone random excitation technique, JASA, May 1977