

Entwicklung eines Druckprüfstandes für Schallwandler

Diplomarbeit

durchgeführt von

Martin Rohmoser

Institut für Kommunikationsnetze und Satellitenkommunikation
Technische Universität Graz



Vorstand: Univ.-Prof. DI Dr. Otto Koudelka

Begutachter: Univ.-Prof. DI Dr. Otto Koudelka

Betreuer: DI Dr. Franz Graf

Graz, im Dezember 2011

EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....

(Unterschrift)

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt all jenen, die mich beim Erstellen dieser Diplomarbeit unterstützt und ihr Entstehen mit Interesse verfolgt haben.

Allen voran bedanke ich mich bei meinem Betreuer Franz Graf für die Ideen und Anregungen, die wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben. Weiters möchte ich mich bei den Mitarbeitern von Joanneum Research, besonders bei Harald Rainer und Bernhard Rettenbacher bedanken für die gute Zusammenarbeit und die tatkräftige Unterstützung.

Ich bedanke mich bei meinen Freunden und Weggefährten während dieses Studiums, besonders bei Christoph Reitbauer für den motivierenden Austausch im Lauf dieser Arbeit.

Der größte Dank gilt meiner Mutter und meinem Vater, die mir durch ihre Unterstützung und Motivation die großartigen Rahmenbedingungen für dieses Studium und die lange Ausbildung ermöglichten. Und nicht zuletzt danke ich dir, Sigrid, für deine Geduld und dafür, dass du für mich da bist.

Martin Rohrmoser

Graz 2011

Zusammenfassung

Akustische Messungen unter schwankendem Umgebungsdruck sind eine besondere Herausforderungen für Messmikrofone. Vor allem schnelle Luftdruckschwankungen können zu Störungen im Übertragungsverhalten der Mikrofone führen.

Diese Arbeit beschreibt die Entwicklung eines Druckprüfstandes, mit dem es möglich ist, Mikrofone auf ihr Verhalten gegenüber Druckschwankungen hin zu überprüfen. In einer Druckkammer, in der sich das zu messende Mikrofon und ein Lautsprecher zur Erzeugung eines Messsignals befinden, wird ein beliebiger Druckverlauf reproduziert. Der dafür erforderliche Luftdruck wird von einer Servo-betriebenen Zylinderpumpe erzeugt. Eine kontinuierliche akustische Messung zeigt eine vom Druck abhängige Veränderung im Übertragungsverhalten der Messmikrofone in Echtzeit auf. Mithilfe dieses Druckprüfstandes können schnell und einfach verschiedene Mikrofontypen bewertet und verglichen werden. Eine Weiterentwicklung von Mikrofonen, die an die speziellen Druckbedingungen angepasst sind, soll dadurch wesentlich erleichtert werden.

Abstract

Acoustic measurements under varying ambient pressure pose special challenges to the measurement microphones. Especially rapid air pressure fluctuations can cause errors in the transfer behavior of the microphones.

By developing a pressure test rig, it is possible to verify microphones on their behavior to pressure fluctuations. The tested microphone and a speaker for generating a measurement signal are inside a pressure chamber, in which an arbitrary pressure function is reproduced. The required air pressure is generated by a servo-driven cylinder pump. A continuous acoustic measurement shows a pressure-dependent change in the transfer function of the microphone in real-time. Using this pressure test rig, it is possible to compare different types of microphones quickly and easily. Thus a further development of microphones, which are adapted to specific pressure conditions, should be significantly easier.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IX
1 Einleitung.....	1
1.1 Grundlegendes Konzept.....	3
2 Theoretische Basis.....	5
2.1 Allgemeines zu Druck.....	5
2.1.1 Definition von Druck.....	5
2.1.2 Luftdruck und Luftvolumen	6
2.2 Aufbau von Druckmikrofonen.....	8
2.3 Akustische Messverfahren.....	11
2.3.1 Messverfahren mit definierten Rauschsignalen	12
2.3.2 Dirac-Impuls.....	13
2.3.3 MLS Verfahren.....	13
2.3.4 Multisinus Verfahren	13
3 Messung des Luftdrucks in realen Umgebungen	15
3.1 Messaufbau.....	15
3.2 Auswahl eines Drucksensors.....	16
3.3 Übertragung der Sensordaten	16
3.3.1 Messdatenumformer, Konzept und Dimensionierung	17
3.3.2 Testmessungen, Funktionsprüfung	19
3.4 Differenzdruckmessung – Druckreferenz	23
3.5 Druckmessung in realer Umgebung.....	24
3.6 Auswertung der Messergebnisse.....	25
3.6.1 Statistische Auswertung der Druckdaten	25
3.6.2 Spektrale Analyse des Mikrofonsignals	27
4 Dimensionierung und Fertigung.....	31
4.1 Konstruktion der Druckkammer	31
4.1.1 Akustik in der Druckkammer	32
4.1.2 Auswahl des Lautsprechers	34
4.1.3 Praktische Kriterien	36
4.2 Konstruktion der Pumpe.....	39
4.2.1 Dimensionierung des Zylinders	39
4.2.2 Dimensionierung des Antriebs	40
5 Software	45
5.1 Software-Regler	47
5.2 Akustischer Messalgorithmus und Datenanalyse	50
5.3 Grafische Benutzeroberfläche, Messmodi.....	55
6 Messungen der technischen Daten	58
6.1 Messung der Druckkammer-Akustik.....	58

6.2	Messung der Druckwerte.....	63
7	Anwendung des Druckprüfstandes	66
8	Zusammenfassung und Ausblick	70
	Literaturverzeichnis.....	71
	Anhang A: Spezifikationen des Druckprüfstandes	72
	Anhang B: Datenblätter und Konstruktionspläne	73

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1 Signalleistung während des Fluktuationsfehlers in ausgewählten Frequenzbändern (100Hz Bandbreite)	2
Abb. 1.2 Blockdiagramm Konzept der Druckkammer	3
Abb. 2.1 Volumensänderung und Druckdifferenz eines 30l Luftvolumens	7
Abb. 2.2 Aufbauder Kapsel eines Kondensator Druckmikrofons [B&K96].....	8
Abb. 2.3 Kapillare außerhalb des Schallfeldes (A) und im Schallfeld (B) [B&K96]	9
Abb. 2.4 Frequenzgang mit Kapillare außerhalb des Schallfeldes(A) und im Schallfeld (B) [B&K96]	10
Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Messaufbaus für Druckmessungen in realen Umgebungen	15
Abb. 3.2 XR-2206 Aufbau für stromgesteuerten Sinusgenerator [aus Datenblatt].....	18
Abb. 3.3 Außenbeschaltung Messdatenumformer	18
Abb. 3.4 Schematischer Aufbau der Testapplikation für den Messdatenumformer.....	19
Abb. 3.5 Spannungsverlauf des Drucksensors, demodulierter Spannungsverlauf und Fehlerspannung	21
Abb. 3.6 Prototypischer Aufbau des Messdatenumformers.....	22
Abb. 3.7 Verteilung der Druckwerte.....	26
Abb. 3.8 Verteilung der Druckänderung.....	26
Abb. 3.9 Verteilung der Druckwerte.....	26
Abb. 3.10 Verteilung der Druckänderung	26
Abb. 3.11 Druckverlauf (blau, dick) und Druckänderung (grün, dünn), Mi. 06 Juli 2011 10:03 Uhr	27
Abb. 3.12 Spektrogramm des aufgezeichneten Mikrofonsignals, Do. 7. Juli 2011, 13:00 Uhr	27
Abb. 3.13 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (06.06.2010 Mik. C126 #2).....	28
Abb. 3.14 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (06.06.2010 Mik. C126 #7).....	29
Abb. 3.15 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (09.06.2010 Mik. C111 #1).....	30
Abb. 4.1 Darstellung der ersten und dritten Raummode in der Druckkammer mit eingebrachter Dämmung.....	33
Abb. 4.2 Schallabsorptionsgrad von Basotect verschiedener Stärken [© BASF SE 2011]	33
Abb. 4.3 Frequenzgang und Impedanzverlauf des gewählten Lautsprechers Visaton W 100 S [VIS11]	36
Abb. 4.4 3D-Modell der Druckkammer	38
Abb. 4.5 Pneumatik Rundzylinder Fa. Norgren	40

Abb. 4.6 3D-Modell der Zylinderpumpe.....	44
Abb. 5.1 Blockschaltbild der Struktur der Software	45
Abb. 5.2 Aufbau Regelkreis	47
Abb. 5.3 Sprungantwort Regelstrecke.....	49
Abb. 5.4 Schleifenstruktur der Software	51
Abb. 5.5 Frequenzgang der Druckkammer und gewählte Multisinus Frequenzen.....	53
Abb. 5.6 Multisinus, eine Periode	54
Abb. 5.7 Grafische Benutzeroberfläche der Messsoftware	55
Abb. 5.8 Zeitverlauf der Druck-Trapezfunktion.....	57
Abb. 6.1 Blockdiagramm für Druckkammer-Akustik Messung	58
Abb. 6.2 Amplitudengang der Raumimpulsantwort der Druckkammer, ohne Glättung: ohne Dämmmaterial (rot), eine Dämmmatte(grün), zwei Dämmmatten (blau) ...	60
Abb. 6.3 Amplitudengang der Raumimpulsantwort der Druckkammer, 1/3 Oktav Glättung: ohne Dämmmaterial (rot), eine Dämmmatte(grün), zwei Dämmmatten (blau).....	60
Abb. 6.4 Amplitudengang, Mikrofon außerhalb (rot) und innerhalb (grün) der Druckkammer positioniert	61
Abb. 6.5 Druck-Sprungantwort der Druckkammer	63
Abb. 6.6 Druckverlust bei Überdruck	65
Abb. 6.7 Druckverlust bei Unterdruck.....	65
Abb. 7.1 ROGA MI-17 bei trapezförmigem Druckverlauf.....	67
Abb. 7.2 ROGA MI-17 bei realem Druckverlauf.....	67
Abb. 7.3 Behringer B-5 bei trapezförmigem Druckverlauf.....	68
Abb. 7.4 Behringer B-5 bei realem Druckverlauf.....	69

1 Einleitung

Herkömmliche Messmikrofone sind für Umgebungsbedingungen konstruiert, die im Bereich der natürlichen klimatischen Veränderungen liegen. Es gibt jedoch auch Einsatzbereiche, die durch spezielle Umstände außergewöhnliche Bedingungen aufweisen und eine Anpassung der Mikrofone notwendig machen.

Diese Diplomarbeit umfasst die Entwicklung eines Prüfstandes für Mikrofone, die unter den Bedingungen eines schnell schwankenden Luftdrucks eingesetzt werden.

Fehler bei schwankendem Luftdruck:

Bei starken Druckschwankungen treten an Schallwandlern hauptsächlich zwei Arten von Fehlern in der Signalkette auf. Diese Fehler sind im aufgezeichneten Signal erkennbar und können folgendermaßen beschrieben werden:

"Flappen" Dabei handelt es sich um ein Störgeräusch, das zwischen 300 ms und 600 ms lang ist und im Signalspitzenpegel 10-20 dB über dem Umgebungsgeräusch zum Zeitpunkt des Auftretens des Fehlers liegt. Das Fehlersignal ist mit dem Störgeräusch vergleichbar, das durch einen starken Windstoß verursacht wird.

"Fluktuation" Dieser Fehler macht sich durch einen Pegelbruch des Signals über das gesamte Spektrum bemerkbar. Der Signalpegel bricht in einem Zeitfenster von 500ms Länge um etwa 8 dB ein. Weitere Analysen dieses Fehlers erfolgen in Kapitel 3.6.2.

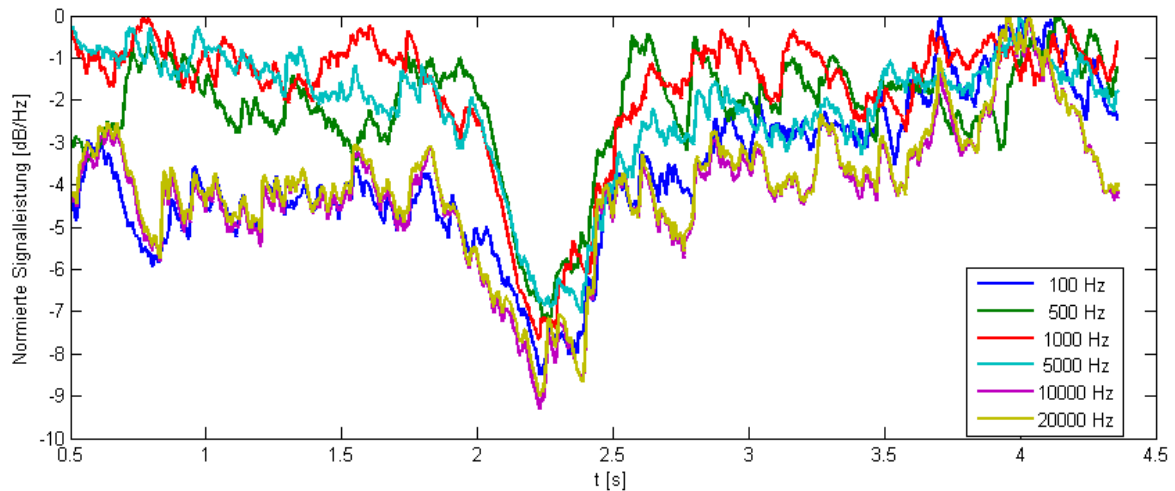


Abb. 1.1 Signalleistung während des Fluktuationsfehlers in ausgewählten Frequenzbändern (100Hz Bandbreite)

Die Ursache für das Auftreten der beiden Fehlerarten konnte erst nach einer Reihe von Versuchen im Labor eingegrenzt werden. Zunächst wurde nicht nur bei den Mikrofonen selber, sondern in der gesamten Signalkette nach dem Verursacher der Störung gesucht. Schließlich konnte der Pegel einbruch des Fluktuations-Fehlers im Labor reproduziert werden, indem das Messmikrofon einer großen Druckschwankung des Umgebungsluftdrucks ausgesetzt wurde.

Ziel dieser Diplomarbeit:

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Druckkammer, in der Mikrofone einem definierbaren Druckverlauf ausgesetzt werden können. Gleichzeitig soll eine akustische Messung erfolgen, sodass die Auswirkungen der Luftdruckschwankungen auf das Übertragungsverhalten verschiedener Mikrofontypen evaluiert werden können.

In weiterer Folge können mithilfe dieses Prüfstandes Mikrofone entwickelt werden, welche für die spezielle Anwendung bei stark schwankendem Luftdruck optimiert sind.

1.1 Grundlegendes Konzept

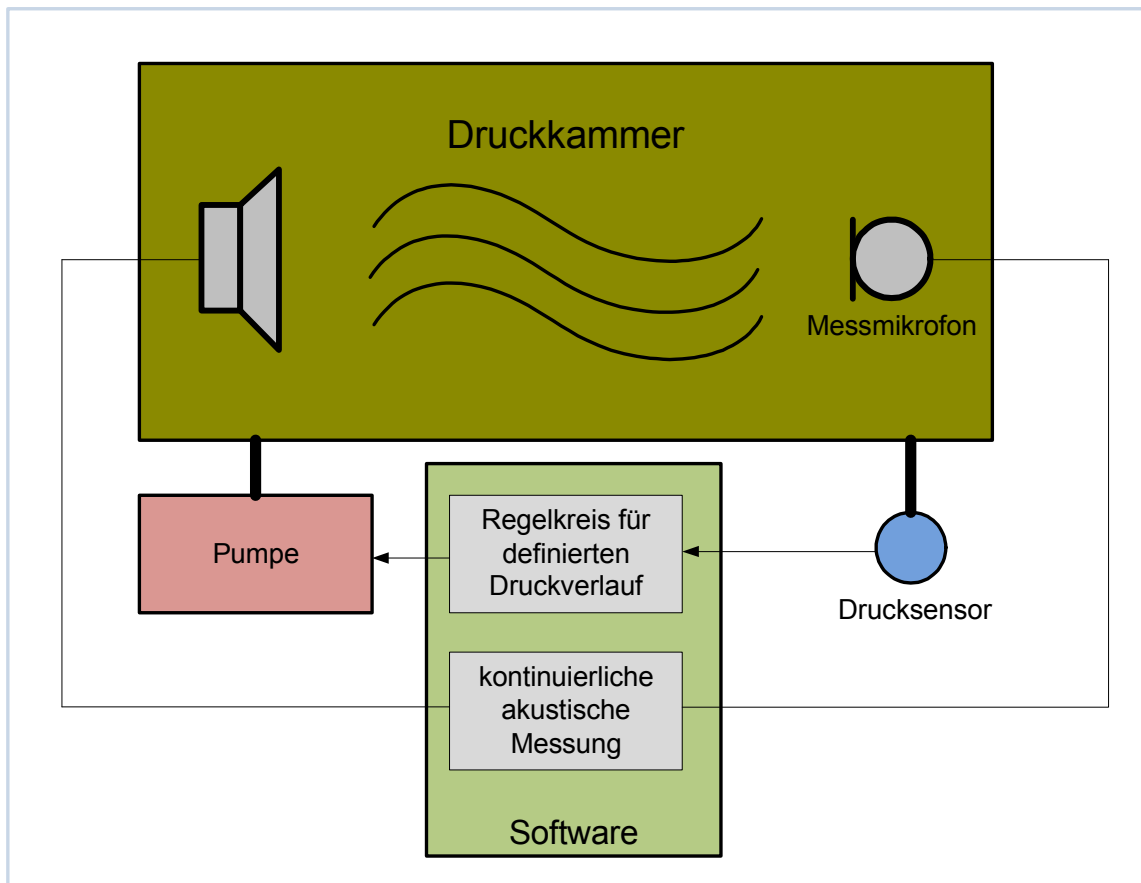


Abb. 1.2 Blockdiagramm Konzept der Druckkammer

Das grundlegende Konzept der Druckkammer ist in Abb. 1.2 dargestellt. Die Druckkammer selbst ist ein luftdichtes Gehäuse, in dem sich das zu testende Messmikrofon und ein Lautsprecher zur Einspielung eines geeigneten Messtons³ befinden. Die Akustik der Druckkammer soll die Messung des Übertragungsverhaltens vom Mikrofon möglichst wenig beeinflussen.

³ Beschreibung des akustischen Messverfahrens siehe Kapitel 2.3.

Eine motorbetriebene Luftpumpe erzeugt den gewünschten Druckverlauf im Inneren der Druckkammer. Dieser Soll-Druckverlauf wird über einen digitalen Regelkreis gesteuert. Es können sowohl gemessene reale Druckfunktionen, als auch beliebige vorab erstellte Druckverläufe reproduziert werden. Die Pumpe muss in der Lage sein, sowohl einen Über- als auch einen Unterdruck relativ zum Umgebungsdruck zu erzeugen. Ein Differenzdrucksensor misst den Druckunterschied vom Innendruck der Kammer zum Umgebungsdruck und liefert die Eingangsgröße (Ist-Wert) für den Regelkreis. Die Pumpe wird über einen Software-gesteuerten Servomotor betrieben. Die Steuerung der Servopumpe und die akustische Messung erfolgt mit der PC-basierten Mess- und Steuerplattform⁴ *LabView* von *National Instruments*.

Das folgende Kapitel widmet sich den theoretischen Grundlagen, in Kapitel 3 wird die Gewinnung der realen Druckdaten beschrieben.

Eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Komponenten des Druckprüfstandes erfolgt in Kapitel 4 (Hardware) und Kapitel 5 (Software).

Abschließend wird die Messung der technischen Eigenschaften (Kapitel 6) und die Anwendung des Druckprüfstandes - an Hand der Vermessung ausgewählter Mikrofone (Kapitel 7) - beschrieben.

⁴ Hardware: PXI-System von *National Instruments*, Software: Entwicklungsumgebung *LabVIEW*, siehe Kapitel 5

2 Theoretische Basis

In diesem Kapitel werden die theoretischen Grundlagen für die Konstruktion des Druckprüfstandes behandelt. Es ist dazu Theorie aus vielen Bereichen der Technik notwendig, die im Umfang, auf die für diese Arbeit nötigen Teilaspekte, beschränkt ist.

2.1 Allgemeines zu Druck

2.1.1 Definition von Druck

$$p = \frac{|\vec{F}_\perp|}{|A|} [Pa] = \left[\frac{N}{m^2} \right] \quad [2.1]$$

Der Druck p ist definiert durch den Betrag der Kraft, die senkrecht zur Fläche A steht, auf die der Druck einwirkt. Diese Kraft kann also als die notwendige Kraft angesehen werden, um einen gewissen Druck aufzubauen, oder auch jene Kraft, die ein Druck auf eine Fläche erzeugt.

Die SI Einheit für Druck ist Pascal [Pa] (*ISO 1000, DIN 1301*).

Die Messgröße Druck kommt in vielen technischen Bereichen in sehr unterschiedlichen Größenordnungen vor. Es sind daher auch folgende Vielfache der SI-Einheit Pascal üblich:

1 Bar = 10^5 Pa

1 mBar (Millibar) = 10^2 Pa = **1 hPa** (Hektopascal)

Meistens wird der Druck als Über- bzw. Unterdruck zu einem definierten Bezugsdruck gemessen. Grundsätzlich ist ein gemessener Druck immer ein Über- oder Unterdruck bezogen auf den momentanen Umgebungsluftdruck. Seltener findet man Angaben zu einem Absolutdruck bezogen auf Vakuum. In der Akustik wird zur Angabe des absoluten Schalldruckes (Wechseldruck) ein Referenzdruck von $20\mu\text{Pa}$ verwendet.

2.1.2 Luftdruck und Luftvolumen

Der **atmosphärische Luftdruck** wird durch die Luftmasse der Erdatmosphäre verursacht. Der durchschnittliche Luftdruck auf Meereshöhe beträgt im Mittel 1013 hPa und nimmt mit steigender Höhe näherungsweise exponentiell ab. In Bodennähe sinkt der Luftdruck um circa ein Hektopascal pro 8 m Höhe. Der Luftdruck ist durch Temperaturänderungen und dem Wettergeschehen ständigen Schwankungen unterzogen. Bei konstantem Wetter betragen die normalen Schwankungen während eines Tages etwa 1-5 hPa, bei extremen Wetterbedingungen können innerhalb eines Tages Luftdruckunterschiede von bis zu 100hPa auftreten. Die Skala eines üblichen Barometers reicht von 960 bis 1050 hPa. In der Akustik würde 1hPa Wechseldruck im Hörfrequenzbereich einen unbewerteten Schalldruckpegel von 134 dB ergeben und damit an der Schmerzschwelle des menschlichen Ohres liegen.

Der **Zusammenhang zwischen Luftdruck p und Luftvolumen V** lässt sich aus der thermischen Zustandsgleichung idealer Gase ableiten.

Die allgemeine Zustandsgleichung lautet:

$$p \cdot V = m \cdot R_s \cdot T \quad [2.2]$$

R_s ... individuelle Gaskonstante $\left[\frac{J}{kg \cdot K} \right]$

T ... Temperatur [K]

m ... Luftmasse [kg]

In einem geschlossenem System (d. h. bei konstanter Luftmasse m) und gleichbleibender Temperatur T ist das Produkt aus Druck und Volumen konstant.

$$p \cdot V = \textit{konstant} \quad [2.3]$$

Es gilt daher näherungsweise:
$$\frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = \frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \quad [2.4]$$

Die Näherung, die hier getroffen wird, geht von einer isothermen Zustandsänderung aus. Das bedeutet, dass die Temperaturänderung der Luft, die bei einer Kompression immer entsteht, vollständig absorbiert wird. Das ist der Fall, wenn die entstandene Wärmeenergie der Luft in das Gehäuse und Dämmmaterial übergeht. Wird allerdings angenommen, dass die entstandene Wärmeenergie der Luft nicht abgegeben wird, spricht man von einer adiabatischen Zustandsänderung, und es gilt:

$$p \cdot V^k = \textit{konstant} \quad \text{mit } k=1,4 \text{ (Isentropenexponent von Luft)} \quad [2.5]$$

Unter realen Verhältnissen wird die Zustandsänderung zwischen isotherm und adiabatisch liegen. Für die Dimensionierung der Komponenten der Druckkammer wird ein-fachheitshalber eine isotherme Zustandsänderung angenommen und an den wesentlichen Stellen auf den dadurch entstandenen Fehler hingewiesen. Die erforderliche Volumensänderung zur Herstellung einer Druckdifferenz in einem geschlossenen Behälter ist in der folgenden Abbildung dargestellt. Die Druckdifferenz ist im Bereich ± 250 Pa, das geschlossene Luftvolumen beträgt 30 l.

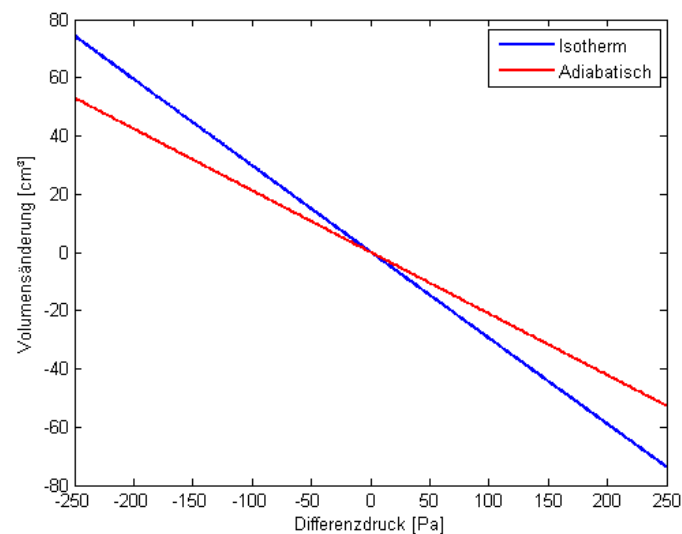


Abb. 2.1 Volumensänderung und Druckdifferenz eines 30l Luftvolumens

2.2 Aufbau von Druckmikrofonen

Mikrofone, die für akustische Messungen eingesetzt werden, unterliegen in ihren Eigenschaften besonders hohen Anforderungen. Gefordert werden ein möglichst linearer Frequenzgang über einen großen Frequenzbereich, hoher Dynamikumfang und eine kleine Bauform, um das gemessene Schallfeld möglichst wenig zu beeinflussen. Außerdem ist in den meisten Anwendungen eine richtungsunabhängige Charakteristik erwünscht. Aufgrund dieser Eigenschaften werden Messmikrofone fast ausschließlich als Druckempfänger – Kondensatormikrofone mit Membrandurchmessern von 1/8" (3,18 mm) bis 1" (25,4 mm) gebaut. (Siehe Abb.2.2)

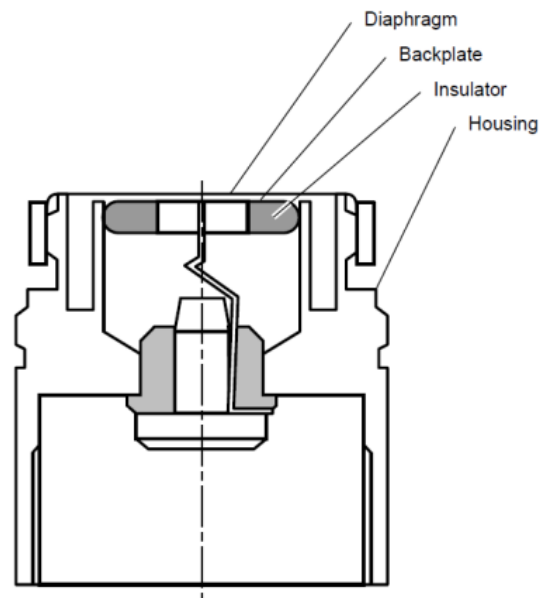


Abb. 2.2 Aufbau der Kapsel eines Kondensator-Druckmikrofon [B&K96]

Diese Mikrofonkapseln bestehen aus einem Metallgehäuse, an dessen Vorderseite die Membranfolie gespannt wird. In einem Abstand von typischerweise $20\mu\text{m}$, dahinter befindet sich über einen Isolator vom Gehäuse getrennt die Gegenelektrode. Membran und Gegenelektrode bilden einen Kondensator, dessen Kapazität sich abhängig von der Membranauslenkung ändert. Das Metallgehäuse und das darin eingeschlossene Luftvolumen sind nur durch einen sehr dünnen Kanal nach außen verbunden. Diese **Kapillare** sorgt dafür, dass langsame statische Druckänderungen wie atmosphärische Luftdruckschwankungen ausgeglichen werden und damit für die Schalldruckmessung an der Membran Vorder- und Rückseite derselbe statische Druck herrscht. Ist die Kapillare demselben Schallfeld wie die Membran ausgesetzt, weist die Übertragungsfunktion ein akustisches Tiefpassverhalten erster Ordnung auf. Die Zeitkonstante hat dabei

üblicherweise Werte um 160ms. Die Kombination aus geschlossenem Luftvolumen in der Kapsel (= akustische Feder) und Kapillare (akustischer Widerstand) entspricht in der Analogie zur Elektrotechnik einem RC-Glied derselben Zeitkonstante. Es gilt daher dieselbe Formel für die -3dB Grenzfrequenz f_g .

$$p = p_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}} \quad \begin{array}{l} p \text{ Druck im Kapselinneren} \\ p_0 \text{ Umgebungsdruck} \end{array} \quad [2.6]$$

$$f_g = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} = \frac{1}{2\pi \cdot 0,16} = 1 \text{ Hz} \quad \begin{array}{l} f_g \text{ -3dB Grenzfrequenz (in Abb. 2.4 (B))} \end{array} \quad [2.7]$$

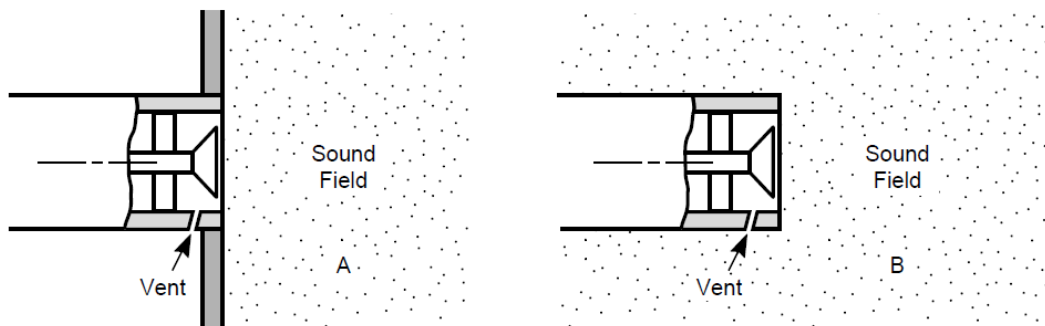


Abb. 2.3 Kapillare außerhalb des Schallfeldes (A) und im Schallfeld (B) [B&K96]

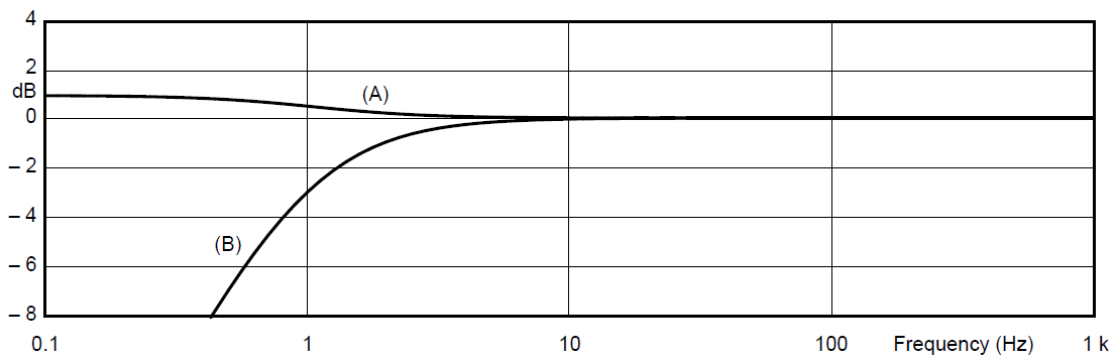


Abb. 2.4 Frequenzgang mit Kapillare außerhalb des Schallfeldes(A) und im Schallfeld (B) [B&K96]

Ist die Kapillare vom Schallfeld getrenntausgeführt (A), ist ein leichter Anstieg im Frequenzgang zu sehr niedrigen Frequenzen hin zu beobachten. Die Ursache dafür ist die sinkende Dämpfung der Membran durch das Luftvolumen hinter der Kapsel. Die Luft entweicht durch die Kapillare, die Membran wird somit weniger gedämpft und stärker ausgelenkt.

2.3 Akustische Messverfahren

Es gibt heute zur Bestimmung der Übertragungsfunktion einer akustischen Übertragungskette eine große Anzahl an Messverfahren. Sie unterscheiden sich im Allgemeinen durch ihr Anregungssignal und die Methode zur Berechnung der Übertragungsfunktion aus der Systemantwort. Jedes Messverfahren hat gewisse Vor- und Nachteile. An Hand der Rahmenbedingungen, unter denen die Messung erfolgt, ist ein passendes Verfahren auszuwählen.

Als Grundvoraussetzung aller akustischen Messverfahren gilt, dass die gemessene Übertragungskette als linear und zeitinvariant angenommen werden kann. Das Anregungssignal kann unter dieser Annahme in der Dauer theoretisch beliebig lange werden. Die Anregung des Systems könnte auch zeitlich versetzt mit schmalbandigen Signalen verschiedener Frequenzen erfolgen, wie es bei Gleitsinus (Sine Sweep) oder Stufensinus (Stepped Sine) Anregungen der Fall ist.

Für diese Arbeit soll ein Messverfahren gefunden werden, mit dem das Übertragungsverhalten vom getesteten Mikrofon während dem Auftreten des Fluktuations-Fehlers⁵ gemessen werden kann. Das Ausgangssignal des Messmikrofons wird beim Auftreten des Fehlers jedoch nichtlinear und zeitinvariant. Um dennoch den Frequenzgang messen zu können, muss die Dauer einer einzelnen Messung so weit reduziert werden, dass während dieses Zeitfensters wieder ein annähernd lineares und zeitinvariantes Verhalten gegeben ist. Der frequenzselektive Signalverlauf des Mikrofons kann unter diesen Voraussetzungen mithilfe der Kurzzeit-Fourier-Transformation analysiert werden.

Eine weitere Voraussetzung für diese Messung ist, dass die Übertragungskette zu jedem Messzeitpunkt eingeschwungen sein muss. Das Schallfeld in der Druckkammer muss während der Messung stationär sein. Die Wahl beschränkt sich damit auf jene akustischen Messverfahren, die zur Anregung ein ausreichend breitbandiges und stationäres Signal verwenden.

⁵ Fluktuations-Fehler: vgl. Kapitel 1

2.3.1 Messverfahren mit definierten Rauschsignalen

Die für dieses Messverfahren verwendeten Rauschsignale haben ein bekanntes Leistungsdichtespektrum. Im Falle von weißem Rauschen ist es über den gesamten Frequenzbereich konstant, bei rosa Rauschen nimmt es mit 3dB pro Oktave ab (=konstante Leistung pro Oktavband). Rosa Rauschen ist in der Praxis wegen der geringeren Signalenergie im hohen Frequenzbereich besser geeignet.

$$\text{weißes Rauschen:} \quad S(\omega) = \text{const} \quad [2.8]$$

$$\text{rosa Rauschen:} \quad S(\omega) = 1/\omega \quad [2.9]$$

Die Übertragungsfunktion wird im Frequenzbereich aus der komplexen Division der abgetasteten Systemantwort mit dem Eingangssignal berechnet. Die Zeitsignale von Anregungssignal und Systemantwort werden zur Berechnung des Spektrogramms mit dem DFT-Verfahren in den Frequenzbereich transformiert.

$$\underline{H}(\omega) = \frac{\underline{A}(\omega)}{\underline{E}(\omega)} \quad [2.10]$$

Nach dem Nyquist-Shannon-Theorem entspricht die höchste messbare Frequenz in der Übertragungsfunktion der halben Abtastfrequenz mit der das Anregungssignal und die Systemantwort gewandelt werden. Die Frequenzauflösung der Übertragungsfunktion ergibt sich durch die diskrete Fourier-Transformation:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-i2\pi \frac{k}{N} n} \quad [2.11]$$

Die Anzahl k der Frequenzlinien X_k entspricht der Anzahl der Samples der diskreten Zeitfolge. Eine Unterteilung des Zeitsignals in kurze Analysefenster ergibt eine geringe Frequenzauflösung. Der Vorteil ist aber eine gute zeitliche Auflösung im Spektrogramm. Bei Anwendung des recheneffizienten FFT-Algorithmus muss das Zeitfenster einer Länge von 2^m entsprechen. m ist eine natürliche Zahl. Somit ist die resultierende Frequenzauflösung der Übertragungsfunktion abhängig von der gewählten Abtastfrequenz und der Länge des Analysefensters.

2.3.2 Dirac-Impuls

Dieses Messverfahren verwendet kein stationäres Anregungssignal. Es ist aber trotzdem als geeignetes Messverfahren für diese Anwendung denkbar. Die Anregung erfolgt mit einem Impuls, der einem idealen Dirac-Impuls möglichst ähnlich ist. Theoretisch ist das Spektrum eines Impulses gleichverteilt (weißes Spektrum). Die Fourier-Transformierte Systemantwort (Impulsantwort) entspricht somit direkt der Übertragungsfunktion des Systems. Praktisch ist dieses Verfahren aber mit großen Einschränkungen verbunden. Über einen Impuls gelangt nur sehr wenig Signalenergie ins System, was schnell zu Problemen in der Aussteuerung des Verstärkers und des Lautsprechers führt. Außerdem entstehen bei der Erzeugung eines Impulssignals über Lautsprecher auch immer nichtlineare Verzerrungen.

2.3.3 MLS Verfahren

Das Anregungssignal beim Maximum Length Sequences-Verfahren ist eine periodische pseudo-Zufallsfolge der Länge $L=2^N-1$ Samples. N ist die Ordnung und wird so groß gewählt, dass das Anregungssignal für die Messung ausreichend lang wird – in der Regel entsprechend der Länge der erwarteten Impulsantwort des Systems. Das MLS Signal hat ein weißes Leistungsdichtespektrum und einen optimalen Crestfaktor (Spitze zu RMS Verhältnis) von 1, da nur die Signalamplituden 1 oder -1 vorkommen. Durch Berechnung der Kreuzkorrelation von Anregungssignal und Systemantwort wird die Impulsantwort gewonnen. Dieses Verfahren ist verhältnismäßig anfällig gegenüber Zeitvarianzen im System.

2.3.4 Multisinus Verfahren⁶

Ein Multisinus Signal ist ein Summensignal von einzelnen Sinusschwingungen frei wählbarer Amplitude und Frequenz. Die Wahl der im Anregungssignal vorkommenden Frequenzen kann für das zu messende System optimiert werden. Im Anwendungsfall dieser Diplomarbeit ist es somit möglich, Frequenzen von Gehäuseresonanzen schon im Anregungssignal zu vermeiden. Das Spektrum eines Multisinus-Signals ist immer auf die gewählten Frequenzen begrenzt. Es kann sehr einfach auf die Anforderungen der

⁶ Vgl. [Meo96].

Abtastung und der Fouriertransformation hin angepasst werden. Durch eine Optimierung der Phasenwinkel kann der Crestfaktor eines Multisinussignals Werte um 1,5 erreichen. Das bedeutet, dass im Vergleich zu Rauschsignalen (Crestfaktor üblicherweise bei 2-5) bei gleicher Aussteuerung der Komponenten eine höhere Signalenergie zur Anregung des Systems möglich ist. Die Auswertung des Frequenzganges erfolgt auch bei der Multisinus-Messung über die diskrete Fourier-Transformation der Systemantwort. Sinnvoll ist eine Frequenzwahl im Anregungssignal bei den Mittenfrequenzen der FFT Bins. So entsprechen die angeregten Frequenzen genau den Analyse-Frequenzbändern der FFT. Das Multisinus Anregungssignal wird einmalig generiert und während der gesamten Messdauer zugespielt.

3 Messung des Luftdrucks in realen Umgebungen

Das Ziel dieser Arbeit ist der Bau einer Druckkammer, die in der Lage ist, die realen Druckschwankungen in verschiedenen Umgebungen zu reproduzieren. Zur Dimensionierung der Druckkammer ist es nötig, möglichst viele real gemessene Druckdaten zur Verfügung zu haben. Dabei sind vor allem extreme Druckschwankungen interessant, die aber nur selten auftreten. Die Datenaufzeichnung muss zumindest über mehrere Tage erfolgen, um ein entsprechendes Datenset für die Analysen zu gewinnen. Gleichzeitig mit den Druckdaten wird auch das Signal des Messmikrofons aufgezeichnet, in dessen unmittelbarer Nähe die Druckdaten gewonnen werden. Der Frequenz- und Dynamikumfang des Mikrofonsignals spielt bei der Auswahl der akustischen Komponenten für die Druckkammer eine wichtige Rolle.

3.1 Messaufbau

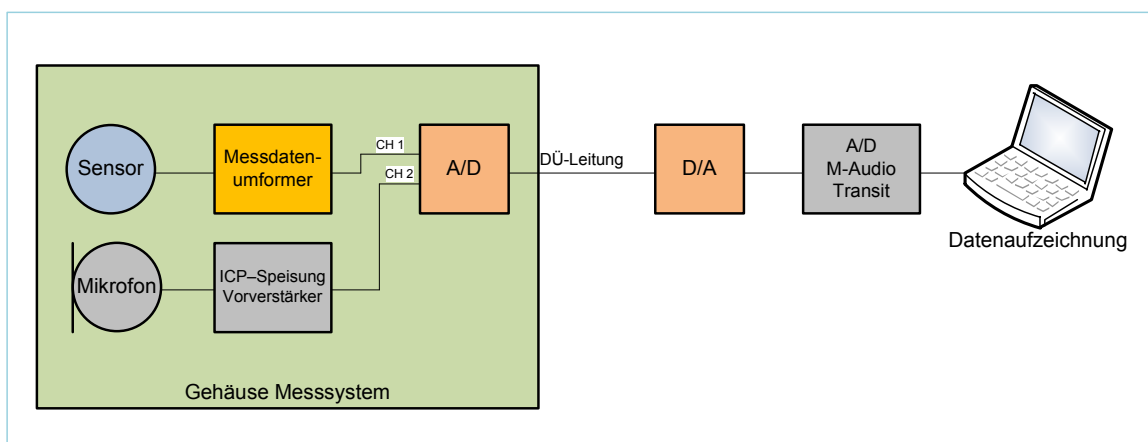


Abb. 3.1 Schematische Darstellung des Messaufbaus für Druckmessungen in realen Umgebungen

Die Druckmessung erfolgt so nahe wie möglich in der Nähe der Mikrofonmembran. Der Luftdruck wird von einem Sensor in eine Spannung gewandelt. Über einen Messdate-numformer (siehe Kap 3.3) wird das Signal zusammen mit dem Mikrofonsignal über das vorhandene optische 2-Kanal Übertragungssystem zum Messplatz übertragen. Dort werden die Signale wieder analog rückgewandelt und stehen für die Datenaufzeichnung auf einem Laptop über einen Audiointerface zur Verfügung.

3.2 Auswahl eines Drucksensors

Im Zuge der Druckmessungen für die beiden Mikrofonfehler ergaben sich maximale Druckschwankungen von etwa ± 30 Pa in einem Zeitfenster von 500 ms. Diese Werte wurden als Richtwerte für die Auswahl eines geeigneten Drucksensors herangezogen. Druckänderungen im Bereich weniger Pascal sind sehr klein im Verhältnis zum absoluten Umgebungsdruck von rund 10^5 Pa. Sensoren in diesem Messbereich können wegen der erforderlichen Empfindlichkeit nur als Differenzdrucksensoren gebaut werden. Diese Sensoren messen den Druckunterschied zu einem Referenzdruck und sind daher mit zwei Druckanschlüssen ausgeführt. Sie bestehen im Prinzip aus einer Luftkammer, die durch eine Membran geteilt ist. Zu jeder Seite der Membran führt ein Anschluss. Stellt sich ein Druckunterschied zwischen den beiden Seiten ein, erfährt die Membran eine Auslenkung, die über einen kapazitiven Wandler⁷ in eine zum Druckverlauf lineare Ausgangsspannung übertragen wird.

Für die Druckdatenerfassung wurde ein Differenzdruck-Messumformer mit einem Messbereich von ± 250 Pa und einer Genauigkeit von 2,5 % gewählt (1 % Fullscale). Der Differenzdruck wird linear in eine Spannung von 0-10 V umgeformt, die Empfindlichkeit ist demnach 50 Pa/V. Die Nullpunktspannung bei $\Delta p = 0$ Pa beträgt 5 V. Um nun mit einem Differenzdrucksensor einen Luftdruckverlauf messen zu können, muss der negative Eingang des Sensors an ein Referenzvolumen mit konstantem Innendruck angeschlossen werden. Die Dimensionierung des Referenzvolumens ist in Kapitel 3.4 beschrieben.

3.3 Übertragung der Sensordaten

Die Übertragung der Daten erfolgte bei den Messungen über ein optisches Übertragungssystem. Die Ausgangsspannung des Sensors ist eine veränderliche Gleichspannung mit einem DC-Offset von 5 V. Da in Audioübertragungssystemen Gleichspannungsanteile oft ausgefiltert werden, ist eine fehlerfreie Übertragung der Sensorspannung nicht garantiert. Das Sensorsignal kann in der Form auch nicht über ein Audiointerface auf einem PC aufgenommen werden. Die A/D Wandler eines Audiointerface

⁷ Drucksensoren werden mit unterschiedlichen Wandler-Prinzipien gebaut. Der hier verwendete Sensor *GEMS 5266* hat einen kapazitiven Wandler über eine Edelstahlmembran und einer Gegenelektrode. Details siehe Datenblatt im Anhang B

der Fa. RME Audio haben einen linearen Übertragungsbereich von 5 Hz bis 21,5 kHz⁸ (bei $f_s=48$ kHz). Die Sensorspannung muss daher über ein Modulationsverfahren in diesen Frequenzbereich übergeführt werden. Für diese Aufgabe wurde ein Messdatenumformer entwickelt.

3.3.1 Messdatenumformer, Konzept und Dimensionierung

Das Ziel des Messdatenumformers ist die Abbildung der Sensorspannung (0-10 V) auf die Frequenz einer Sinuswelle im Audiofrequenzbereich. Das entspricht dem Prinzip einer Frequenzmodulation. Eine einfache Möglichkeit für einen analogen Aufbau eines passenden FM-Modulators ist die Verwendung eines Frequenzgenerator ICs. Der **XR-2206** (Hersteller: EXAR) ist ein universeller **Frequenzgenerator IC** in einem Dual-Inline Gehäuse.

Durch die passende Außenbeschaltung arbeitet der IC als Sinusgenerator mit stromgesteuerter Frequenz (Pin 7). Es kann weiters auch die Amplitude und die Form der Ausgangs-Sinuswelle zur Optimierung der Verzerrungen (THD) über Potentiometer eingestellt werden.⁹

⁸ RME Fireface 800: http://www.rme-audio.de/products_fireface_800.php#5 (aufgerufen im Nov 2011).

⁹ Detaillierte Beschreibung der Funktionsweise des IC: siehe Datenblatt bzw. [AST10].

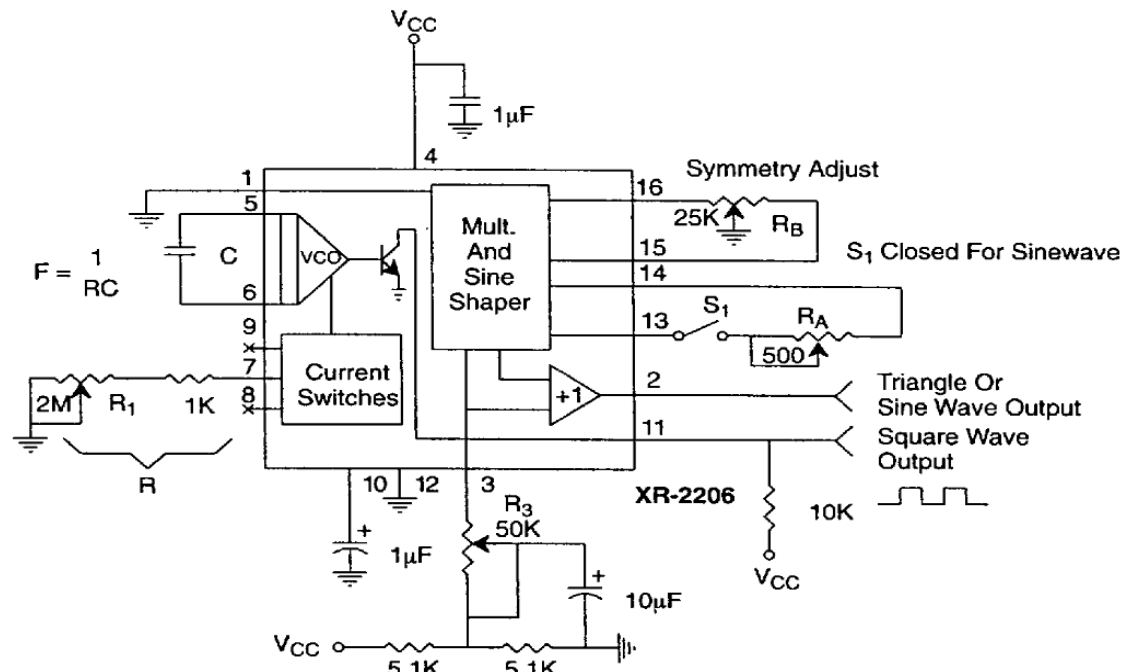


Abb. 3.2 XR-2206 Aufbau für stromgesteuerten Sinusgenerator [aus Datenblatt]

Dimensionierung der Außenbeschaltung zur Frequenzmodulation:

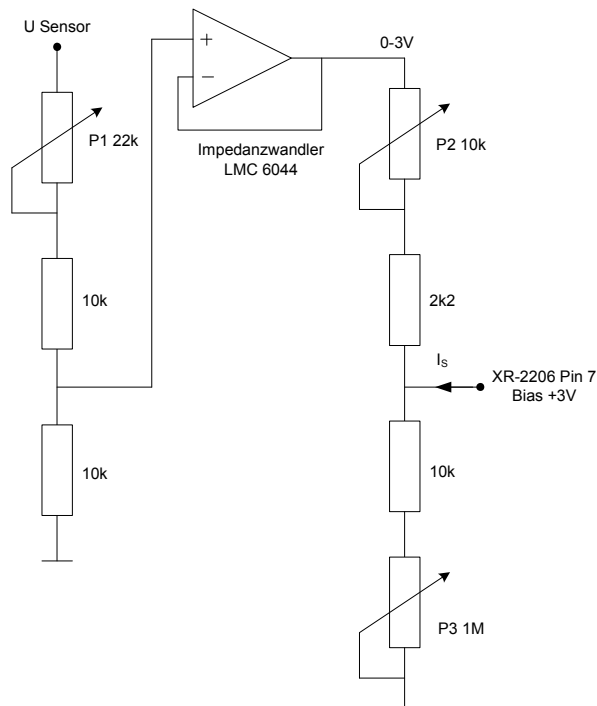


Abb. 3.3 Außenbeschaltung Messdatenumformer

Die Frequenz der Ausgangsspannung des IC wird über eine konstante Kapazität an Pin 5/6 und dem veränderlichen Steuerstrom I_S an Pin 7 bestimmt. Der Strom I_S muss auf max. 3 mA begrenzt werden. Für die Kapazität C wurde 100 nF gewählt.

Die Sensorausgangsspannung (0-10 V) wird über einen trimmbaren Spannungsteiler und einem Impedanzwandler auf den max. zulässigen Steuerbereich von 0-3 V gebracht. Die beiden Potentiometer P2 und P3 dienen zur Einstellung des Frequenzhubs und der Trägerfrequenz des modulierten Signals. Der Steuer-

strom und die Frequenz des Ausgangssignals ergeben sich mit den dimensionierten Werten zu:

$$I_S = \frac{3V}{R_{P3} + 10k\Omega} + \frac{3 - U_{Sensor} \cdot \frac{3}{10}}{R_{P2} + 2,2k\Omega} \quad [3.1]$$

$$f [Hz] = \frac{320 \cdot I_S [mA]}{C [\mu F]} = \frac{320 \cdot I_S [mA]}{0,1} = 3200 \cdot I_S [mA] \quad [3.2]$$

Der **Frequenzhub** $K = df/dU_{sensor}$ ist über P2 in einem Bereich von -80 bis -430 Hz/V regelbar. Anders ausgedrückt bewirkt eine Luftdruckänderung von 2,5Pa (=Auflösung des Sensors) eine Frequenzänderung einstellbar von 0,64Hz bis 21,5Hz. Da eine steigende Sensorspannung einen sinkenden Steuerstrom bewirkt, ist das Vorzeichen des Frequenzhubs negativ.

Die **Trägerfrequenz oder Mittenfrequenz** f_T , also die Frequenz bei einer Sensorspannung von 5 V, kann mit P3 variiert werden.

3.3.2 Testmessungen, Funktionsprüfung

Zur Funktionsüberprüfung des Messdatenumformers wurde eine Testapplikation mit LabView erstellt.

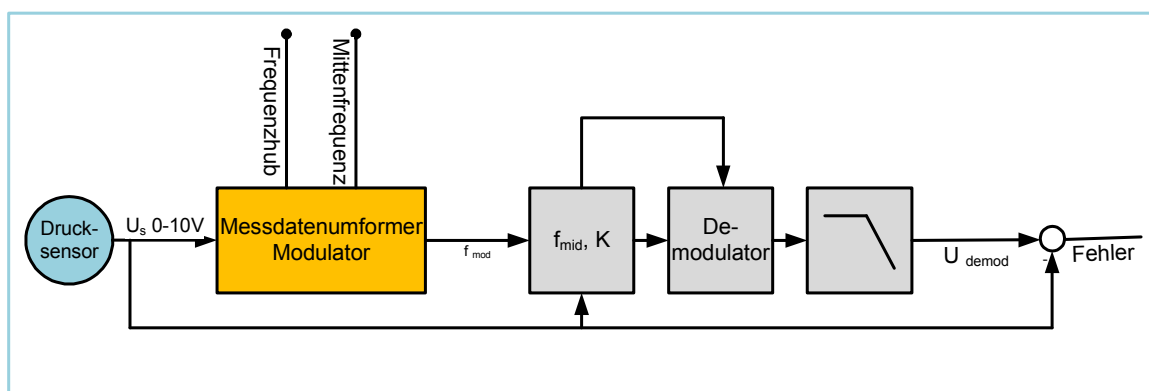


Abb. 3.4 Schematischer Aufbau der Testapplikation für den Messdatenumformer

Die Ausgangsspannung des Drucksensors wird für die Testmessungen von der Software simuliert und über D/A Wandler an den Eingang des Messdatenumformers geführt. Aus der bekannten Sensorspannung und dem Ausgangssignal des Modulators werden der reale Frequenzhub und die Trägerfrequenz bestimmt. Diese Größen können nun über die Potentiometer am Modulator beliebig verändert und anschließend als Eingangsgrößen an den Demodulator übergeben werden. Der Demodulator bestimmt mithilfe einer FFT Analyse die Momentanfrequenz $f(t)$ und rekonstruiert die Sensorspannung U_{demod} :

$$U_{demod}(t) = \frac{f_T - f(t)}{K} \quad [3.3]$$

Zur Reduktion des Messrauschens wird das demodulierte Signal mit einem Tiefpassfilter erster Ordnung bei einer Grenzfrequenz $f_g=20$ Hz gefiltert.

Messung des Übertragungsverhaltens und der Linearität des Messdatenumformers:

Eine anschauliche Größe zur Bewertung der Übertragungsqualität der Messkette ist die Fehlerspannung, die sich aus der Differenz von rückgewandelter Sensorspannung und direkt gemessener Sensorspannung ergibt. Für die Messung der Fehlerspannung wurde im Laborraum durch Öffnen und Schließen der Eingangstür ein kurzzeitiger Über- und Unterdruck erzeugt. Die Ausgangsspannung des GEMS Differenzdrucksensor Typ 5266 100 (± 100 Pa) ist im oberen Plot in Abb. 3.5 als rote Kurve dargestellt. Darüber liegt die blaue Kurve der demodulierten Ausgangsspannung des Messdatenumformers. Im unteren Plot ist die Differenz der beiden Spannungen ersichtlich. Der maximale Fehler durch den Messdatenumformer ist kleiner als 1 %.

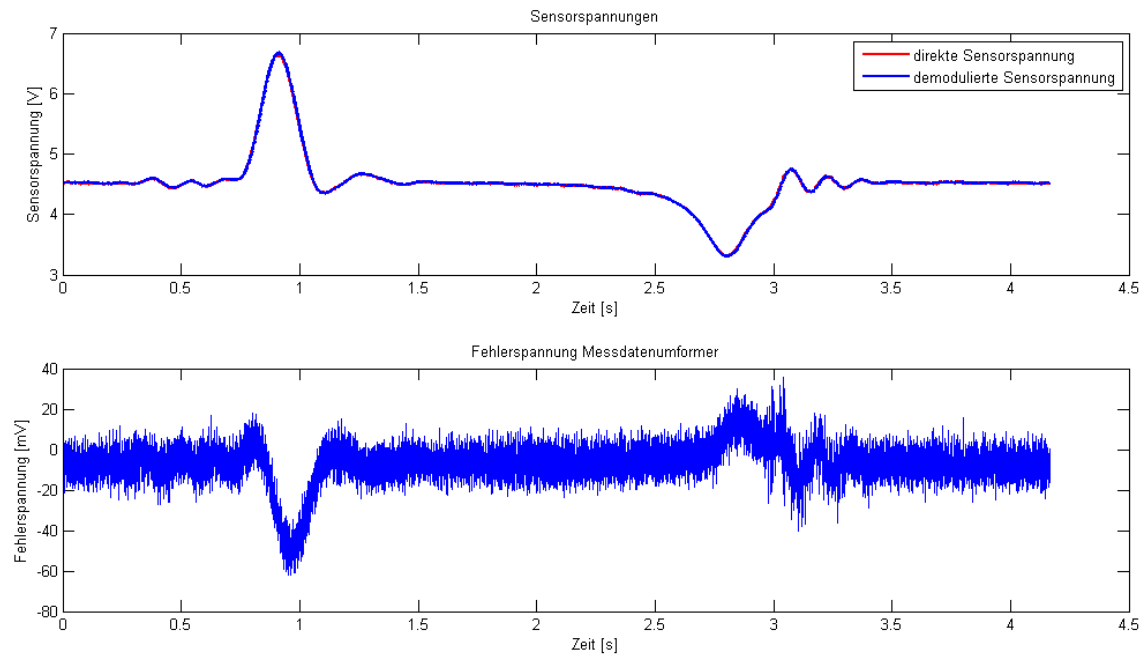


Abb. 3.5 Spannungsverlauf des Drucksensors, demodulierter Spannungsverlauf und Fehlervoltage

Messung der Stromaufnahme und Berechnung der Batterielaufzeit:

Die Stromaufnahme des Sensors und Messdatenumformers beträgt im Mittel 27mA. Die Einheit wird aus 3 parallel geschalteten Blöcken von jeweils 2 Stück 9V Batterien in Serie gespeist (Duracell mit 680mAh Kapazität). Daraus ergibt sich eine Kapazität von 2040 mAh und eine Betriebszeit von 75 h bei einer nominellen Spannung von $U_{\text{Batt}} = 18 \text{ V}$.

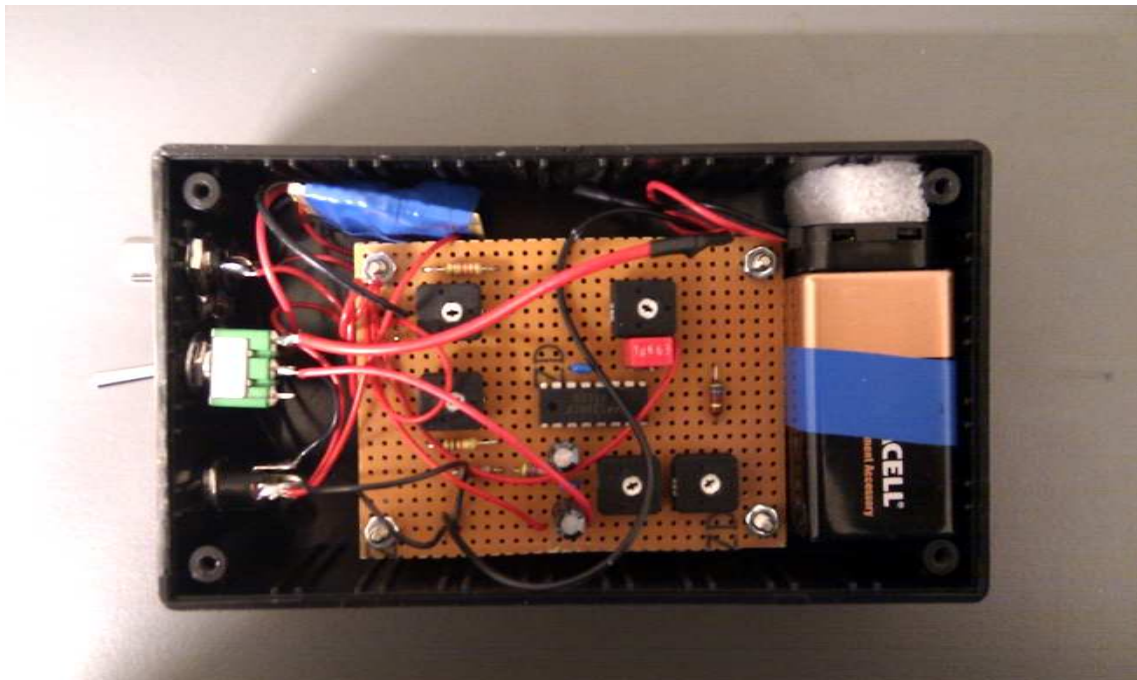


Abb. 3.6 Prototypischer Aufbau des Messdatenumformers

3.4 Differenzdruckmessung – Druckreferenz

Ein Differenzdrucksensor kann, wie der Name bereits sagt, aufgrund seiner Bauform immer nur eine Differenz zwischen den beiden Druckanschlüssen messen. Im Falle der Druckmessung im Inneren der Druckkammer bleibt der negative Druckanschluss offen und der positive Anschluss ist mit der Druckkammer verbunden. In dem Fall ist der Referenzdruck der aktuelle Umgebungsdruck. Für die Messung der Druckverhältnisse in realen Umgebungen soll derselbe Sensor verwendet werden. Dazu ist aber eine stabile Druckreferenz notwendig, die unabhängig vom Umgebungsdruck möglichst gleich bleibt. Ein einfaches "zustöpseln" des negativen Eingangs würde das Messergebnis stark verfälschen, da die Bewegung der Membran das kleine verschlossene Luftvolumen im Sensor stark verdichten würde. Die Empfindlichkeit des Drucksensors wäre somit stark herabgesetzt, was einen großen Messfehler zur Folge hätte.

Je größer das Volumen mit dem Referenzdruck ist, das mit dem negativen Sensoreingang verbunden wird, desto kleiner wird dieser Messfehler. Für die Dimensionierung dieses Volumens muss die Luftverdrängung der Sensormembran bekannt sein. Mit Hilfe einer Einwegspritze mit Milliliter-Skala und einem möglichst kurzen Verbindungsschlauch kann diese Luftverdrängung gemessen werden. Im Falle des verwendeten Sensors wurden bei einem Anzeigewert von 250 Pa (Vollausschlag des Sensors) 0,20 ml (= 0,20 cm³) von der Skala der Spritze abgelesen. Es kann nun das mindestens notwendige Referenzvolumen bestimmt werden, das zur Einhaltung eines Fehlers von 3 % nötig ist:

$$\text{Aus der Beziehung zwischen Druck und Volumen: } \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} = \frac{V_0}{V_0 + \Delta V} \quad [3.4]$$

$$V_{min} = \frac{\Delta V \cdot (p_0 + \Delta p \cdot 0,03)}{\Delta p \cdot 0,03} = \frac{0,20 \cdot (101300 + 7,5)}{7,5} = 2700 \text{ cm}^3 \quad [3.5]$$

Das Referenzvolumen wurde als quaderförmige Box aus 8 mm starkem, luftdicht verleimtem Fichtensperrholz gebaut. Die Außenabmessungen wurden so gewählt, dass die Box exakt im Messgehäuse verbaut werden kann. Die Innenabmessungen sind 360 mm x 150 mm x 50 mm, das Luftvolumen beträgt 2,7 Liter. Das Referenzvolumen muss beim Anschluss an den Sensor möglichst auf Umgebungstemperatur gebracht werden. In geschlossenen Volumen ist die absolute Temperatur direkt proportional zum Druck. Eine Erwärmung der Luft im Volumen von 20 °C auf 21 °C hätte einen Druckanstieg von 345 Pa zur Folge. Damit wäre der Nullpunktdrift bei nur einem Grad Erwärmung be-

reits größer als der Messbereich des Sensors. Es ist daher notwendig vor Messbeginn mit dem Druckprüfstand sicherzustellen, dass die Lufttemperatur in der Druckkammer an die Raumtemperatur angeglichen ist. Kritisch zu betrachten sind auch langsame atmosphärische Schwankungen des Umgebungsluftdrucks. Druckdifferenzen von 100 Pa bis 500 Pa während eines Tages sind üblich. Diese Druckdifferenzen können durch eine Entlüftung der Druckkammer unmittelbar vor der Messung ausgeglichen werden.

3.5 Druckmessung in realer Umgebung

Datum	Mittwoch, 06. Juli 2011 8:00 bis Freitag 08. Juli 2011 23:59
Datenaufzeichnung	Software: Steinberg Wavelab, Datenformat: 48kHz/24Bit Hardware: Lenovo Laptop, MAudio Transit USB Audio-interface
Datenformat/ Dateinamen	PCM Wav, 2 Kanal, Länge je Datei: 1h Dateinamen: DA_Druckmessung_060711001.wav bis DA_Druckmessung_060711064.wav
Kanalbelegung	CH1: Messmikrofon CH2: Ausgang Druckdaten-Messumformer
Datenmenge	64 Dateien = 64 Stunden Daten. Gesamt: 3,7 GB
Sensor	GEMS Differenzdrucksensor Typ 5266 250 LB AC Messbereich: +-250 Pa -> 0-10 V
Messdatenumformer	FM Modulator basierend auf XR2206 IC: Trägerfrequenz (=Mittenfrequenz bei $\Delta p=0$ Pa) = 2213Hz Frequenzhub= 436 Hz/V = 8,72 Hz/Pa
Referenzvolumen	2,7 Liter

Tabelle 2: Beschreibung der Hardware und Daten der Druckmessung

3.6 Auswertung der Messergebnisse

3.6.1 Statistische Auswertung der Druckdaten

Vorbereitung der Messdaten:

Die aufgezeichneten Druckmessdaten müssen zur weiteren Auswertung wieder in ihre ursprüngliche Form, der Ausgangsspannung des Drucksensors, rückgewandelt werden. Dazu wurden die Daten mit Matlab¹⁰ demoduliert. Die Daten sind nach der Demodulation mit einem starken Messrauschen überlagert. Da die größte Frequenz der Nutzdaten aber unter 10 Hz liegt, konnte das Messrauschen mit einem Tiefpass erster Ordnung bei 20 Hz Grenzfrequenz weitgehend ausgefiltert werden. Die Abtastrate wurde auf 50 Hz reduziert und die Daten für weitere Analysen als .mat Dateien gespeichert.

Auswertung:

Die wichtigsten Informationen aus den Messdaten sind die Verteilung der Druckwerte und die Rate der Druckänderung über die Zeit. Vor allem die Extremwerte dieser beiden Parameter legen die Basis zur Dimensionierung der Druckkammer und der Pumpe zur Erzeugung des Innendrucks. Die Druckwerte stehen in den Messdaten direkt zur Verfügung, die Änderungsrate wird aus der ersten Ableitung des Drucks nach der Zeit berechnet. Zur anschaulichen Darstellung wurde die relative Häufigkeitsdichte dieser beiden Parameter berechnet und in Form eines Histogramms dargestellt:

¹⁰ The Math Works Inc. MATLAB, 2008.

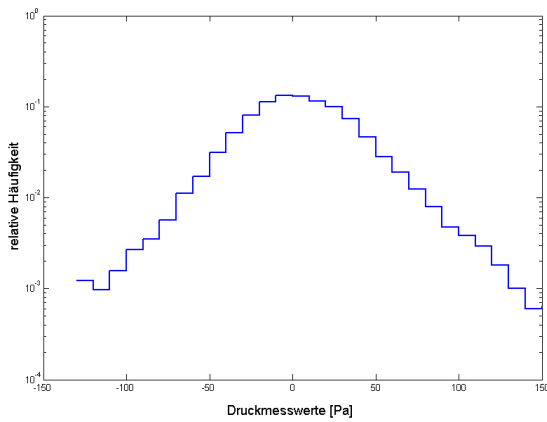


Abb. 3.7 Verteilung der Druckwerte
Do. 7. Juli 2011, 8:00 bis 9:00 Uhr

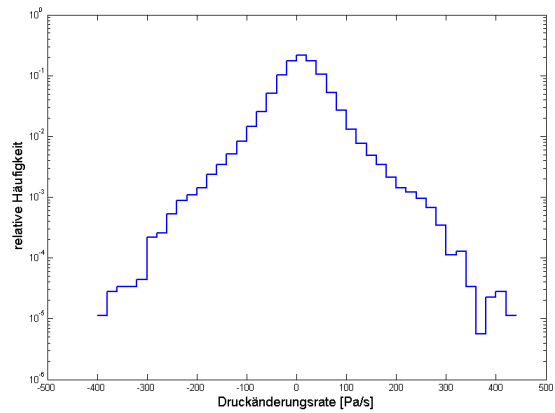


Abb. 3.8 Verteilung der Druckänderung
Do. 7. Juli 2011, 8:00 bis 9:00 Uhr

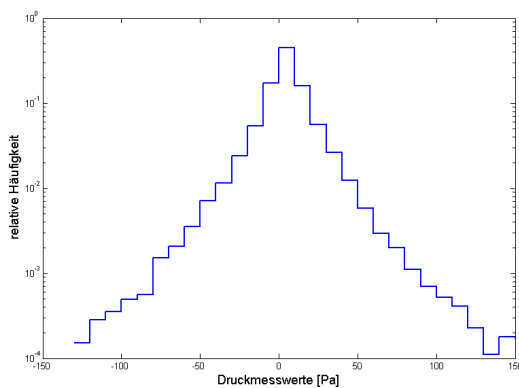


Abb. 3.9 Verteilung der Druckwerte
Fr. 8. Juli 2011, 3:00 bis 4:00 Uhr

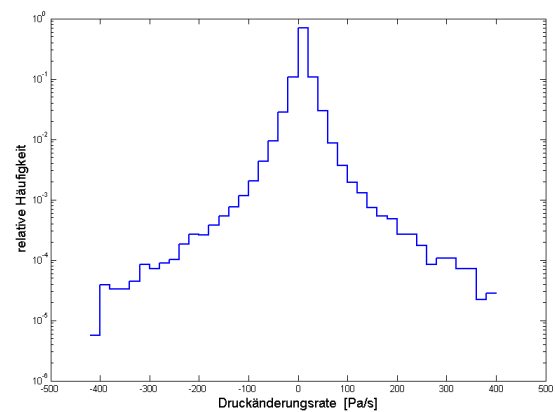


Abb. 3.10 Verteilung der Druckänderung
Fr. 8. Juli 2011, 3:00 bis 4:00 Uhr

Die Extremwerte der Druckänderungen sind bei beiden Messungen annähernd gleich groß und gleich häufig: Über- und Unterdruckwerte von über 100 Pa treten mit einer Häufigkeit von etwa 0,1 % auf.

Die maximale Änderungsrate liegt bei etwa 400 Pa/s und tritt meistens bei plötzlich auftretenden großen Differenzdruckwerten auf. Die folgende Abbildung zeigt einen 30 s langen Ausschnitt des Druckverlaufs und der Druckänderung beim Auftreten eines Extremwertes.

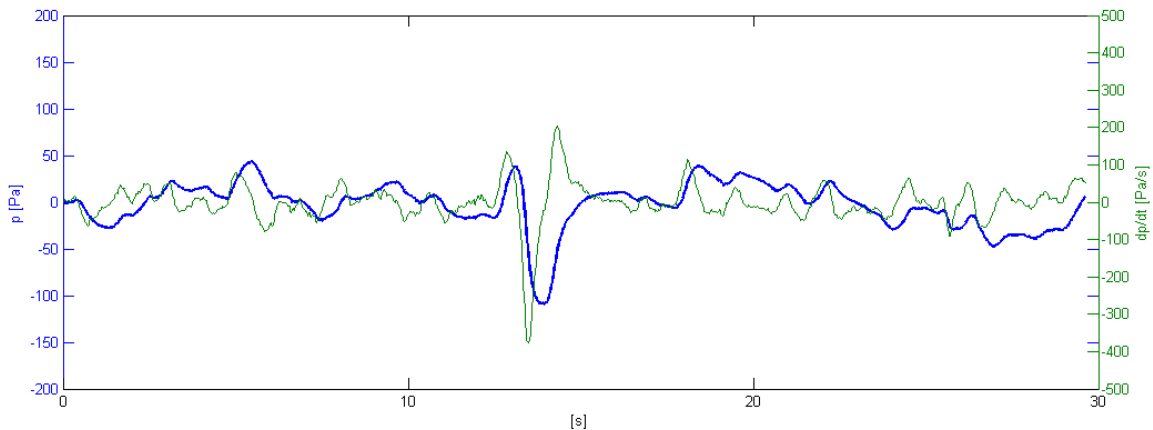


Abb. 3.11 Druckverlauf (blau, dick) und Druckänderung (grün, dünn), Mi. 06 Juli 2011 10:03 Uhr

3.6.2 Spektrale Analyse des Mikrofonsignals

Abb. 3.12 zeigt das Spektrogramm eines 60 s langen Ausschnitts einer Mikrofonaufnahme. Der Farbtintensität gibt die spektrale Leistungsdichte in [dB/Hz] an. Die Stellen mit höherer Signalleistung im hochfrequenten Bereich sind in der Abbildung deutlich erkennbar.

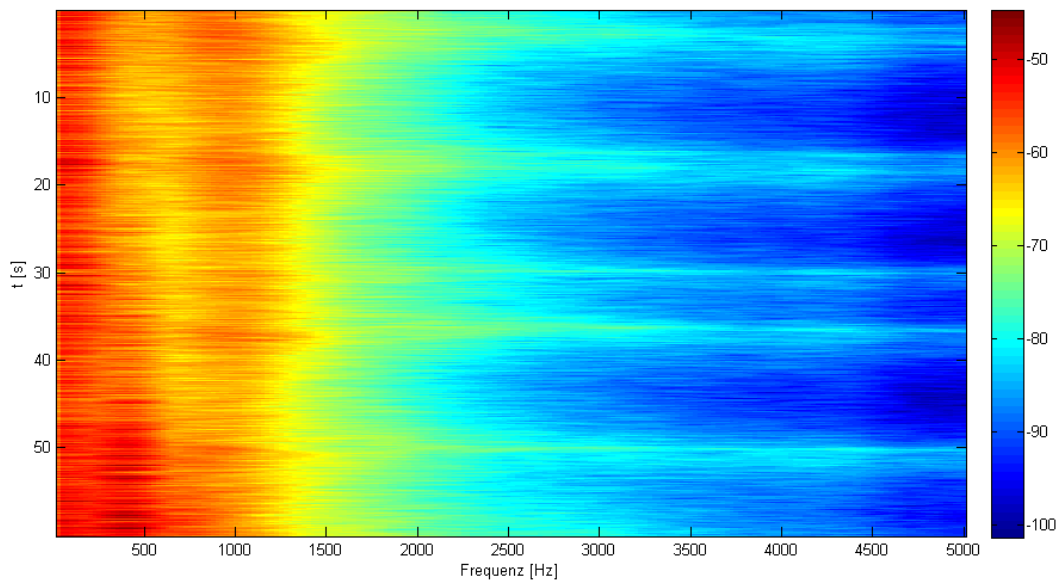


Abb. 3.12 Spektrogramm des aufgezeichneten Mikrofonsignals, Do. 7. Juli 2011, 13:00 Uhr

Die Spektralanalyse des Mikrofonsignals bei einem Fluktuations-Fehler ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Graphen zeigen die Signalleistung über die Zeit ausgewählter Frequenzbänder im gesamten Frequenzbereich der Mikrofone. Die oberen Abbildungen zeigen die absoluten Signalleistungen der ausgewählten Bänder (je 100Hz Bandbreite). In den unteren Abbildungen ist die Signalleistung normalisiert dargestellt. Es ist zu erkennen, dass in allen Bändern der Einbruch in der Signalleistung etwa gleich groß ist. Das Signal wird beim Auftreten des Fehlers um circa 8 dB gedämpft, die Dauer der Störung beträgt rund 500ms.

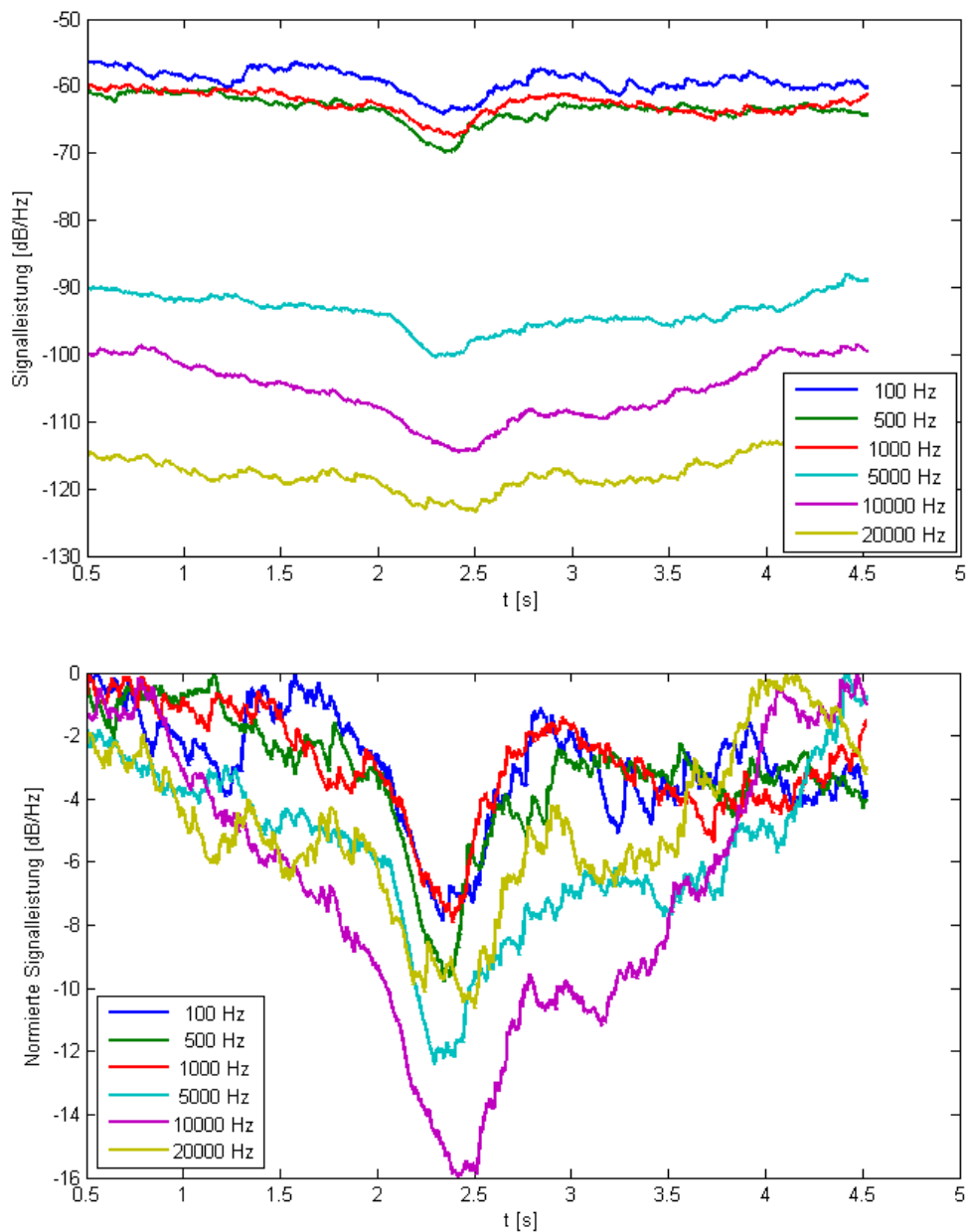


Abb. 3.13 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (06.06.2010 Mik. C126 #2)

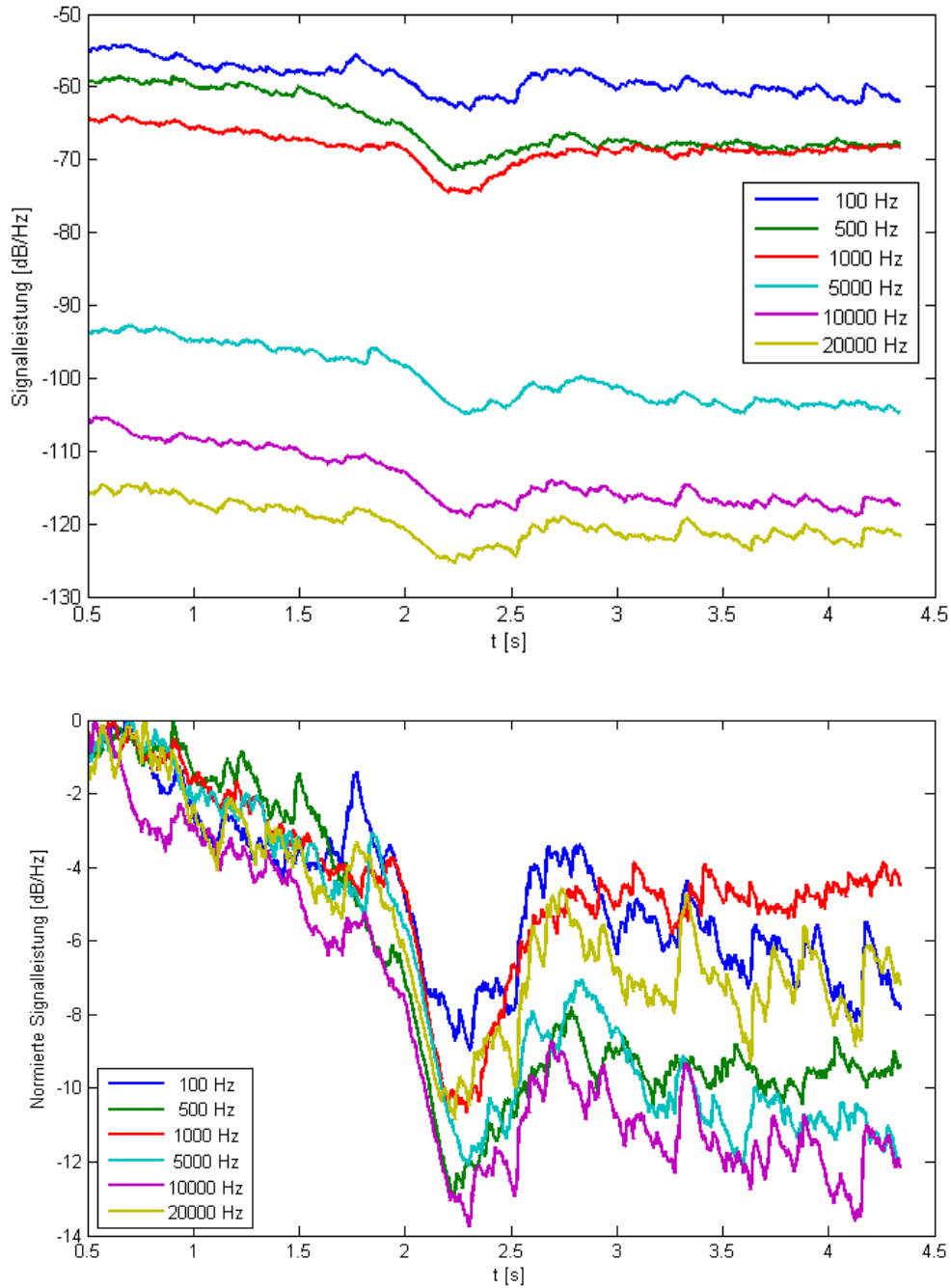


Abb. 3.14 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (06.06.2010 Mik. C126 #7)

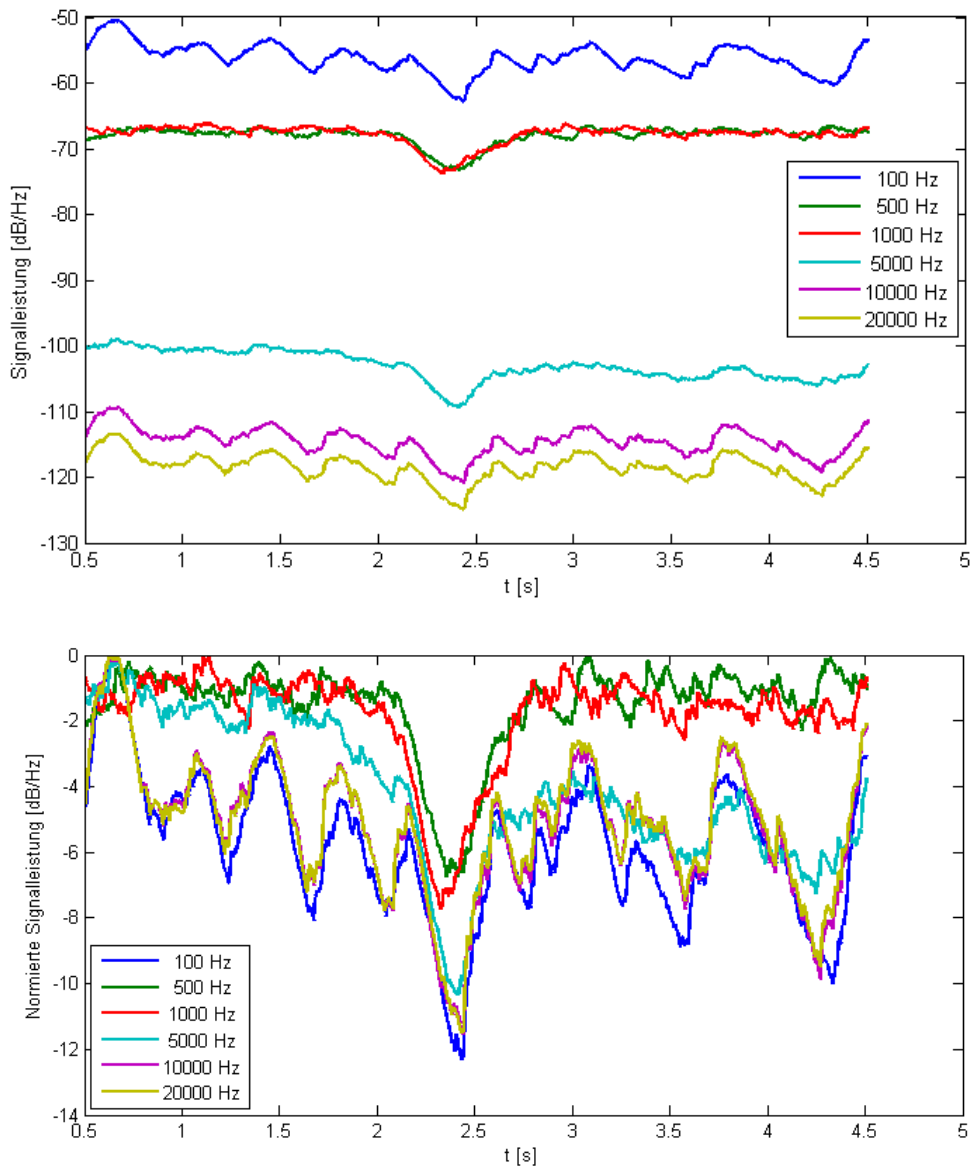


Abb. 3.15 Signalanalyse des Fluktuations-Fehlers (09.06.2010 Mik. C111 #1)

4 Dimensionierung und Fertigung

4.1 Konstruktion der Druckkammer

Es sind eine Reihe von technischen Kriterien und praktischen Überlegungen für die letztendliche Dimension und Bauform der Druckkammer verantwortlich. Es folgt eine Kurzbeschreibung dieser Kriterien, auf die im Anschluss detailliert eingegangen wird.

Akustik in der Druckkammer: Für die akustische Vermessung der Mikrofone in der Druckkammer ist es notwendig, dass sich die einzelnen Komponenten des akustischen Übertragungsweges möglichst neutral verhalten. Ideal wären eine lineare Übertragungskennlinie des Lautsprechers und ein vollständig bedämpftes "schalltotes" raumakustisches Verhalten der Druckkammer. In der Praxis ist das nicht erreichbar, es ist aber möglich - durch eine günstige Bauform und akustische Bedämpfung - die Störeinflüsse zu minimieren.

Lautsprecher: Die Dimensionierung des Lautsprechers ist vom gewünschten Schalldruck und dem Frequenzbereich des Signals abhängig, das der Lautsprecher für die akustische Messung einspielen soll. Die Größe der Lautsprechermembran beeinflusst die Abmessungen der Druckkammer, da ein davon abhängiger Mindestabstand zwischen der Membran und dem Messmikrofon eingehalten werden muss. Der Lautsprecher benötigt ein eigenes geschlossenes Gehäuse, dessen Volumen durch die Thiele-Small Parameter bestimmt werden kann.

Luftvolumen: Ein begrenzender Faktor für die Größe der Druckkammer ist das eingeschlossene Luftvolumen. Je größer die Abmessungen der Druckkammer, desto größer muss auch die Luftpumpe zur Herstellung der gewünschten Druckdifferenz dimensioniert werden und desto stärker muss der Stellantrieb der Pumpe sein.

Einfache praktische Handhabung: Die Druckkammer sollte letztendlich als Prüfstand für Mikrofone verschiedenster Bauformen dienen. Ein schneller und einfacher Austausch der Mikrofone muss daher möglich sein. Die Außenabmessungen und das Gesamtgewicht der Konstruktion sollten nicht zu groß ausfallen und eine Wartung und ein Austausch der Komponenten der Druckkammer solleinfach durchführbar sein.

4.1.1 Akustik in der Druckkammer

Die Akustik in der Druckkammer spielt beim Messvorgang eine wichtige Rolle. Das Schallfeld im Inneren der Druckkammer sollte möglichst konstant sein, Resonanzen und Wandreflexionen so gut wie möglich vermieden werden. Weiters ist eine gute Schalldämmung der Druckkammer nötig, damit Störgeräusche von außen keinen Einfluss auf die Messung nehmen. Die stehenden Wellen (Moden) in der Druckkammer liegen aufgrund der Abmessungen¹¹ genau im Messfrequenzbereich: Bei der größten Innenabmessung von 50 cm liegt die längste stehende Welle bei $\lambda=100\text{cm}$ und entsprechend der Gleichung $f=c/\lambda=343\text{ Hz}$. Eine genaue Modenanalyse erfolgt in Kapitel 6.1

Akustische Maßnahmen: Die Ausbildung von Raummoden ist am stärksten bei parallelen Wänden mit niedrigen Absorptionsgraden ausgeprägt. Eine wirksame Maßnahme gegen starke Modenausbildung ist daher die Optimierung der inneren Geometrie. Antiparallele Wände sind aber aus Gründen der einfachen Konstruktion nur begrenzt realisierbar. Es muss daher versucht werden, die unvermeidlichen Raummoden durch ein bestimmtes Seitenverhältnis möglichst gleichmäßig über den Frequenzbereich aufzuteilen. Als besonders günstiges Verhältnis stellt sich der "Goldene Schnitt"

$\frac{2}{\sqrt{5}+1} : 1 : \frac{\sqrt{5}+1}{2}$ heraus [GW04].

Durch Einbringen von **Dämpfungsmaterial** kann die Ausprägung der Moden verringert werden. Dieses Material setzt den schwingenden Luftteilchen einen Widerstand entgegen und wandelt deren Bewegungsenergie teilweise in Wärmeenergie um. Am effektivsten funktioniert dieses Prinzip an den Stellen, wo die Schallschnelle am größten ist. Wie in Abb. 4.1. erkennbar, tritt die größte Schallschnelle der meisten Moden im Mittelpunkt der Druckkammer auf. An der Wand ist die Schallschnelle aller stehenden Wellen gleich Null und daher das Dämpfungsmaterial am wenigsten wirksam.

¹¹ Abmessungen der Druckkammer: vgl. Anhang A

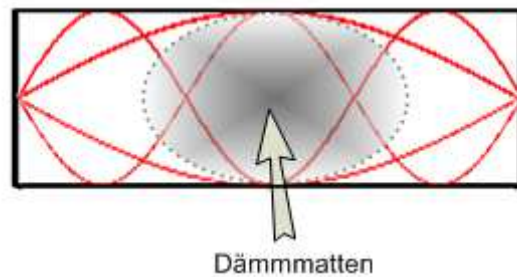


Abb. 4.1 Darstellung der ersten und dritten Raummode in der Druckkammer mit eingebrachter Dämmung

Die Wände der Druckkammer aus Aluminiumblech sind stark reflektierend. Eine Anbringung von Absorptionsmaterial ist nur bedingt sinnvoll, da wegen der möglichen geringen Materialstärken von wenigen Zentimetern nur eine geringe Schallabsorption bei tiefen Frequenzen zu erwarten ist. Am Beispiel des Dämpfungsmaterials Basotect ist ersichtlich, dass für eine wirksame Schallabsorption unter 1000 Hz Materialstärken ab 30 mm notwendig wären.

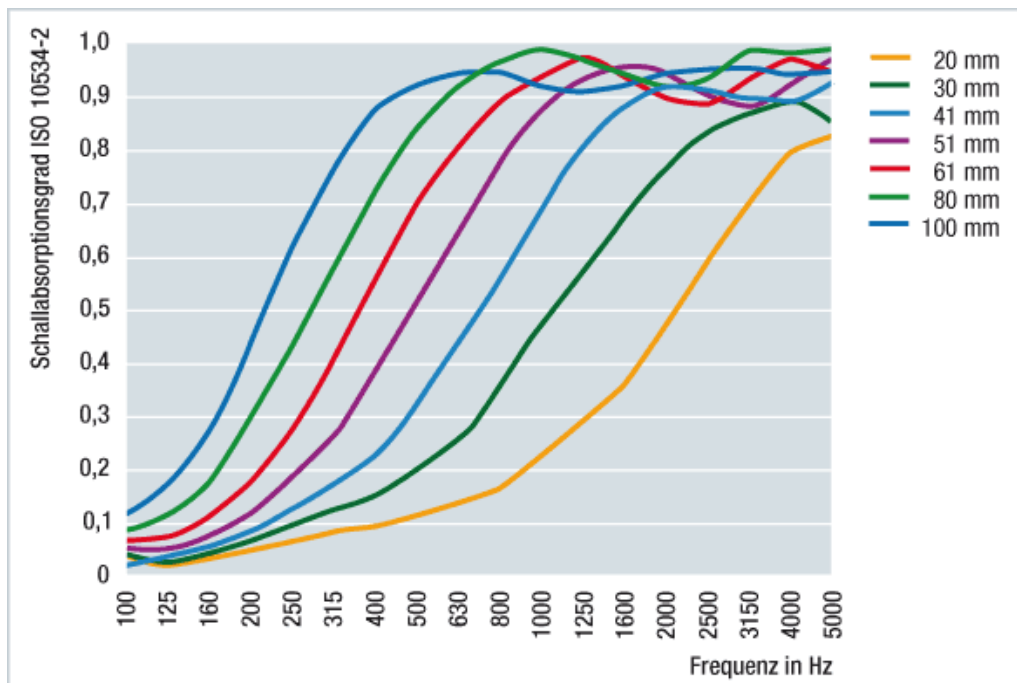


Abb. 4.2 Schallabsorptionsgrad von Basotect verschiedener Stärken [© BASF SE 2011]

Ein weiterer unerwünschter akustischer Effekt ist die **Eigenschwingung des Gehäuses** und die damit verbundenen Resonanzüberhöhungen und **Körperschallübertragung** zum Messmikrofon. Je dicker das Wandmaterial gewählt wird, desto tiefer und weniger ausgeprägt ist die Gehäuse-Resonanz. Es können auch durch zusätzliche Aufbringung von schweren Materialien an den Wänden die Eigenschwingungen reduziert werden. Ein geeignetes Material dafür sind selbstklebende Bitumenplatten.

Durch die Erhöhung der Wandmasse erreicht man außerdem eine Verbesserung der **Schalldämmung von Außengeräuschen**. Der Einfluss von Störgeräuschen auf die akustische Messung kann so verringert werden.

Fernfeldbedingung:

Als Faustregel für den Mindestabstand d zwischen Schallquelle und Schallaufnehmer bei akustischen Messungen im Fernfeld gilt: $d = 3 \cdot M$ [STR94]. M ist die größte Abmessung der Schallquelle, in diesem Fall der Membrandurchmesser. Für die Dimensionierung der Druckkammer wurde ein Abstand zwischen Lautsprecher und Mikrofon von 50 cm gewählt, das entspricht dem fünffachen Membrandurchmesser des gewählten Lautsprechers.

Die Messergebnisse der akustischen Parameter der Druckkammer folgen in Kapitel 6.

4.1.2 Auswahl des Lautsprechers

Lautsprecher sind generell für die Schallabstrahlung in bestimmten Frequenzbereichen optimiert. Tiefe Frequenzen bedingen große Membrandurchmesser, die wiederum die Eigenschaften zu hohen Frequenzen hin verschlechtern. Ein wichtiges Kriterium zur Auswahl des passenden Lautsprechers ist daher der gewünschte Frequenzbereich, in dem sich das abzuspielende Signal befindet. Um diese Bandbreite möglichst klein zu halten, muss evaluiert werden, wie groß der Frequenzumfang der akustischen Messung sein soll. Der Arbeitsbereich der Mikrofone erstreckt sich über das gesamte Übertragungsfrequenzband. Für die Analyse des Mikrofonfehlers mithilfe der Druckkammer ist es jedoch ausreichend, die Messung auf jenen Frequenzbereich einzuschränken, in dem sich die Hauptsignalenergie befindet.¹² Die Wahl des Lautsprechers fiel daher auf

¹² Vgl. Kapitel 3.6.2 Spektrale Analyse des Mikrofonsignals

einen Tiefmitteltöner mit einem linearen Frequenzgang zwischen 100 Hz und 5 kHz (± 5 dB).

Ein Lautsprecherchassis benötigt zur Vermeidung einer akustischen Rückkoppelung zwischen Vorder- und Hinterseite der Membran ein Gehäuse. Lautsprecher und Gehäuse müssen sich vollständig im Inneren der luftdichten Druckkammer befinden. Ein nach außen ventiliertes Lautsprechergehäuse würde bei einem Über- bzw. Unterdruck in der Druckkammer die Membran stark auslenken oder sogar zerstören. Es kommt daher nur ein geschlossenes Lautsprechergehäuse infrage. Die Dimensionierung des Volumens eines geschlossenen Gehäuses wird aus den Thiele-Small Parametern der Lautsprecherchassis berechnet:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}^2}{Q_{ts}^2} - 1\right)} \quad [4.1]$$

V_b ..Volumen des geschlossenen Gehäuses [l]

V_{as} .. Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen [l]

Q_{ts} ..Gesamt-Gütefaktor (Freiluftgüte) der Lautsprecher-Chassis (elektrisch und mechanisch)

Q_{tc} ..Gesamt-Gütefaktor des Lautsprechers im Gehäuse

Der gewählte Lautsprecher der Fa. **Visaton, W 100 S** (4 Ohm Spulenwiderstand) ist ein HiFi-Tiefmitteltöner mit 10 cm Membrandurchmesser und einer relativ geringen Chassis-Güte und Äquivalenzluftvolumen, wodurch dieser Lautsprecher mit einem kleinen Boxenvolumen auskommt. Die hier relevanten Thiele-Small-Parameter sind:

$$Q_{ts}=0,46$$

$$V_{as}=4,49 \text{ l}$$

Für die Gesamtgüte des Lautsprechers wurde die "Butterworth Abstimmung"¹³ für einen möglichst flachen Amplitudenverlauf gewählt. Die Gesamtgüte ist dabei auf

¹³ Vgl. [GÖR08]

$Q_{tc}=0,707$ ¹⁴ abgestimmt. Daraus ergibt nach obiger Formel ein Volumen für das Gehäuse von $V_b = 3,3$ l. Der Hersteller empfiehlt im Datenblatt ein geschlossenes Gehäuse mit 4 Liter Volumen.

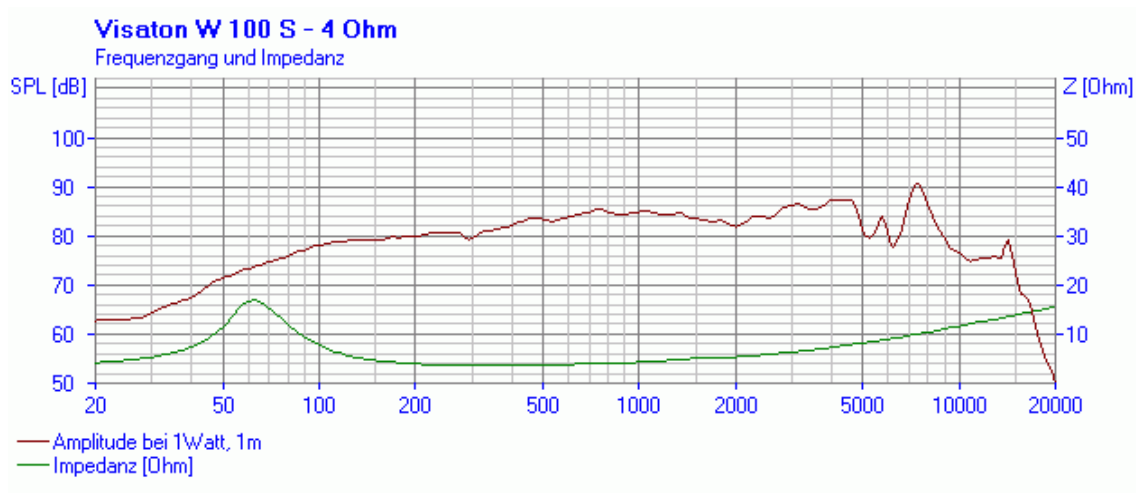


Abb. 4.3 Frequenzgang und Impedanzverlauf des gewählten Lautsprechers Visaton W 100 S [VIS11]

4.1.3 Praktische Kriterien

Die praktische Anwendung der Druckkammer, das schnelle Vermessen unterschiedlicher Mikrofone, sollte so einfach wie möglich sein. Dazu müssen die **Mikrofone von außen verschraubbar** in die Kammer hineinragen. Die Verschraubung muss wie alle Teile der Druckkammer absolut luftdicht sein und Mikrofone mit unterschiedliche Durchmessern aufnehmen können. Messmikrofone haben üblicherweise Durchmesser von 1/4 Zoll bis 1 Zoll. Kleinmembran-Kondensatormikrofone, wie z.B. die AKG Blue Line, haben 19 mm Durchmesser, was somit auch in diesen Bereich fällt. Zur Verschraubung wurden handelsübliche Kabeldurchführungen aus Messing nach Schutzklasse IP68 (bis 10 bar luftdicht) verwendet. Für die geforderten Mikrofondurchmesser stehen drei Größen der Kabeldurchführungen zur Verfügung, die über Reduziergewinde in die Druckkammer eingeschraubt werden können. Der Lautsprecher und das Dämmmaterial im Inneren der Druckkammer müssen bei Bedarf zugänglich und im Schadensfall einfach zu ersetzen sein. An der Oberseite der Druckkammer wurde daher eine große **Wartungsöffnung** eingeplant. Der Deckel wird mit der Deckplatte der Druckkammer verschraubt und durch eine 2 mm starke Gummidichtung abgedichtet.

¹⁴Vgl. [DIC93]

Die **Abmessungen und das Gewicht** der Druckkammer sollten so ausfallen, dass sie von einer Person transportiert und gehandhabt werden kann. Die Druckkammer sollte aus möglichst wenigen Einzelteilen bestehen, die **einfach zu fertigen** sind. Als Material wurde Aluminiumblech mit einer Stärke von 5 mm gewählt. Dünne Materialien neigen leichter zu unerwünschten Eigenschwingungen und schlechter Schalldämmung. Zu große Materialstärken lassen die Konstruktion zu schwer und unhandlich werden. Der Prototyp wurde aus 19 mm starken 3-Schicht Platten (Fichtenholz) gebaut. Ein erster Prototyp aus unbehandelten MDF Platten (mitteldichte Holzfasernplatten) hatte aufgrund der Faserstruktur des Materials einen zu hohen Luftdruckverlust und erwies sich als ungeeignet für diese Anwendung.

Der geforderte Druckbereich von ca. 200 Pa Differenzdruck stellt keine außergewöhnlichen Anforderungen an die **mechanische Belastbarkeit** des Wandmaterials dar. Die Kraft, die durch den Luftdruck z.B. auf die Boden- und Deckplatte wirkt, beträgt je 37 N.

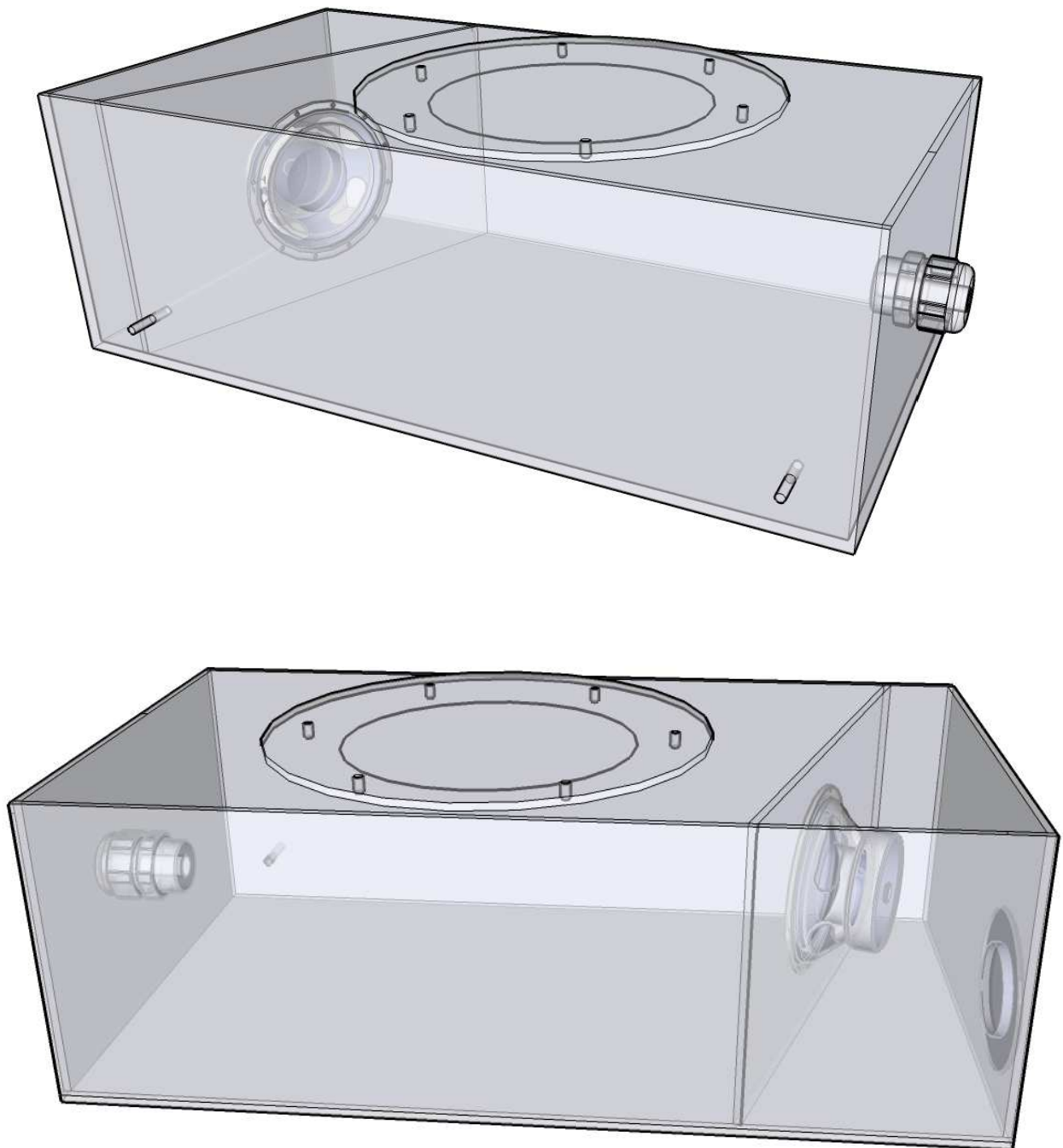


Abb. 4.4 3D-Modell der Druckkammer

4.2 Konstruktion der Pumpe

Der Soll-Druckverlauf, der in der Druckkammer reproduziert wird, hat relativ zum Umgebungsdruck sowohl positive als auch negative Anteile. Anders ausgedrückt, die Pumpe muss in der Lage sein, Über- und Unterdruck zu erzeugen. Die einfachste Form einer solchen Pumpe ist ein Zylinder, dessen Kolben in Mittelstellung steht und durch ziehen bzw. drücken der Kolbenstange die gewünschte Luftdruckdifferenz herstellt. Solche Luftzylinder stehen in vielen Größen als **Pneumatikzylinder** zur Verfügung und können für diese Anwendung als Pumpe genützt werden. Die Kolbenstange muss von einem Stellmotor bewegt werden, der sowohl die nötige Kraft zum Aufbringen des Drucks als auch zur Überwindung der Kolbenreibung hat. Die Steuerung des Motors und somit die Positionierung des Kolbens muss über ein Steuersignal der Software möglich sein. Es wurde für diese Aufgabe ein **Servomotor** aus dem Modellbau-Bereich gewählt, der über einen Hebel den Zylinderkolben bewegt.

4.2.1 Dimensionierung des Zylinders

Der erforderliche maximale Differenzdruck in der Druckkammer soll den gemessenen Maximalwerten in der realen Umgebung entsprechen. Aus Abb. 3.7 und Abb. 3.9 ist ersichtlich, dass die Differenzdruckmaxima ± 130 Pa betragen und bei einer Häufigkeit von 0,01 % bis 0,1 % liegen. Im Kapitel 2.1.2 wurden die Zusammenhänge zwischen Druckänderung und der dafür erforderlichen Volumensänderung detailliert beschrieben. Für das Volumen der Druckkammer von 30 l und einem Umgebungsdruck von 1013 hPa gilt:

$$\Delta V = V_0 \cdot \frac{p_0}{p_1} - V_0 = 30 \text{ l} \cdot \frac{101300 \text{ Pa}}{101430 \text{ Pa}} - 30 \text{ l} = -38,5 \cdot 10^{-3} \text{ Liter} = -38,5 \text{ cm}^3$$

[4.2]

Unter Annahme einer adiabatischen Zustandsänderung reduziert sich die erforderliche Volumensänderung auf $-27,4 \text{ cm}^3$. Zur weiteren Dimensionierung wird der ungünstigere größere Wert verwendet. Das Luftvolumen des Pneumatikzylinders muss daher über den gesamten Hub 77 cm^3 betragen. Normierte Zylinder sind in diversen Kolbendurchmessern und Hublängen erhältlich. Es muss ein Kompromiss aus diesen beiden Werten gefunden werden. Zylinder mit langem Hub und kleinem Kolben haben weniger Reibungsverluste, benötigen aber längere Stellwege und haben daher eine höhere Stellzeit. Der gewünschte Druck kann dafür präziser eingestellt werden. Die langen

Stellwege bedingen einen schnellen Antrieb, damit die geforderte Druckänderungsrate eingehalten werden kann.



Abb. 4.5 Pneumatik Rundzylinder
Fa. Norgren

Für ein Luftvolumen von 77 cm^3 sind bei den erhältlichen Kolbendurchmessern folgende Hublängen erforderlich:

Kolbendurchmesser [mm]	Hublänge [mm]
16	383
20	245
25	157
32	96

Es wurde ein Rundzylinder der Fa. Norgren mit 32 mm Durchmesser und 100 mm Hub gewählt. Die Konstruktion der Zylinderpumpe ermöglicht bei Bedarf auch die Montage von Zylindern mit anderen Durchmessern und 100 mm Hub.

4.2.2 Dimensionierung des Antriebs

Ein softwaregesteuerter Stellmotor muss in möglichst kurzer Zeit die Kolbenstange in die gewünschte Position bringen. Die entscheidenden Auswahlkriterien sind demnach die **Schnelligkeit und die Kraft** des Motors.

Aus der Druckdatenanalyse in Kapitel 3 geht hervor, dass in realer Umgebung die Rate der Druckänderung Maximalwerte um $k = 400 \text{ Pa/s}$ annehmen kann. Mit den Werten des gewählten Zylinders ergibt sich eine Hubzeit t nach folgender Formel:

$$t = \frac{1}{k} \cdot \left(\frac{V_0 \cdot p_0}{V_0 - r_z^2 \pi \cdot h_z} - p_0 \right) = \frac{1}{400} \cdot \left(\frac{30 \cdot 101300}{30 - 0,16^2 \cdot \pi \cdot 1} - 101300 \right) = 0,68s$$

[4.3]

$r_z = 0,16$ dm Kolbenradius

$h_z = 1$ dm Kolbenhub

Der Antrieb muss demnach in der Lage sein, den Zylinderhub von 100mm im Falle der schnellsten Druckänderungsrate in 680 ms zu bewegen. Die dafür erforderliche Stellkraft hängt hauptsächlich von der Massenträgheit aller bewegten Teile und den Reibungskräften der Kolbenstange ab. Der reine Kraftaufwand zur Herstellung des Drucks beträgt bei 32 mm Kolbendurchmesser und 200 Pa nur 0,16 N.

Servomotoren (Abb. 4.3), wie sie im Modellbau eingesetzt werden, sind einfach anzusteuernde Stellmotoren. Sie verfügen über einen internen Regelkreis. Der gewünschte Stellwinkel wird über einen Gleichstrom-Motor und einem Getriebe angefahren und die aktuelle Position von einem Potentiometer gemessen. Ein Regelkreis vergleicht den aktuellen Stellwinkel mit dem Sollwert aus dem Steuersignal. Der Stellbereich beträgt üblicherweise 180 °.

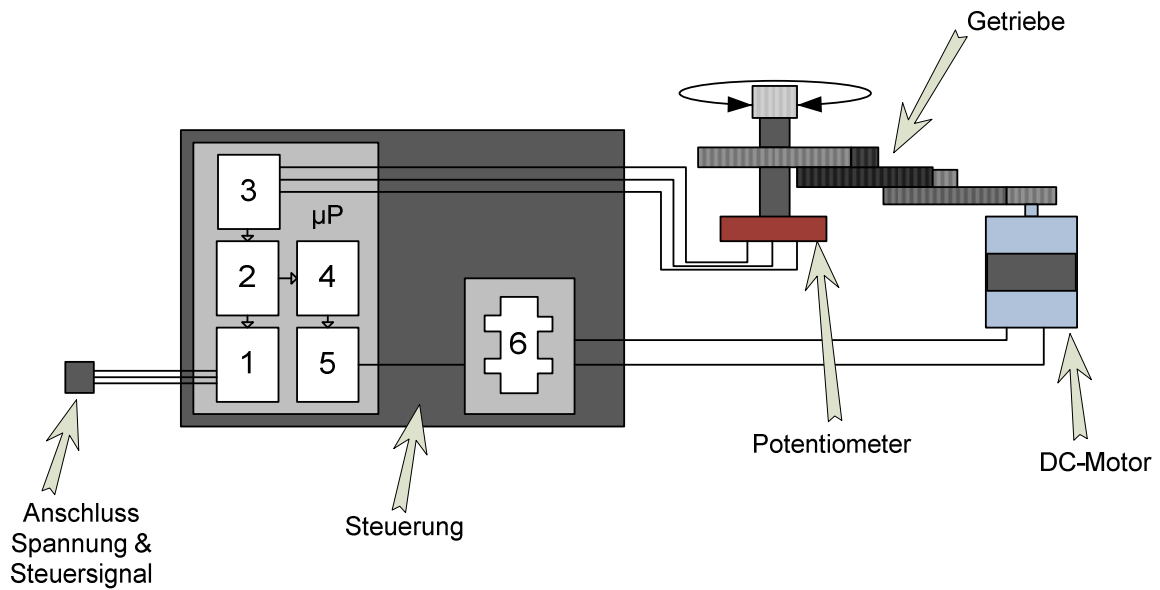


Abb. 4.3 Schematische Darstellung des Aufbaus eines Digital-Servos [CON11]

- 1...Impulsbreitenmessung
- 2...Regler
- 3...A/D Wandler
- 4...Pulsweiten-Generator
- 5...Steuerlogik
- 6...Endstufe

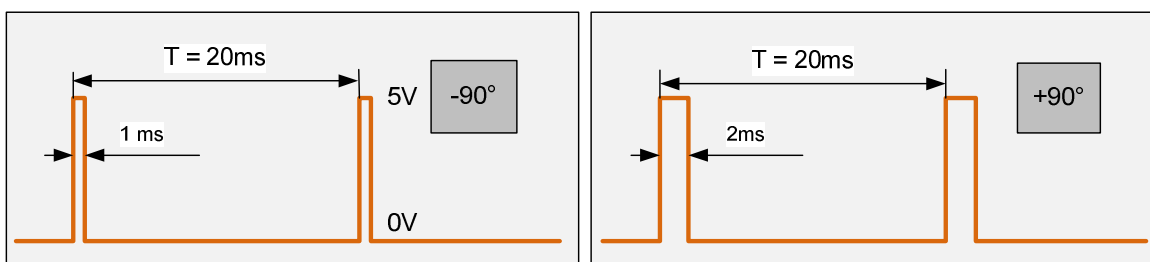


Abb. 4.4 Beispiele für Servo Steuersignale mit unterschiedlichen Impulsbreiten

Das Steuersignal (Abb. 4.4) am Eingang ist ein 50Hz Rechtecksignal mit Pulsbreiten von 1 bis 2 ms Dauer und 5 V High-Pegel. Bei 1,5 ms Pulsbreite wird die Mittelstellung des Servos angefahren.

Bei digital gesteuerten Servos werden das Steuersignal und das Signal des Positionsgewandlers digital gewandelt und mit einem Mikroprozessor verarbeitet. Der Prozessor sendet auch in den Impulspausen des Eingangssignals Stellinformationen zum Motor. Bei Servos mit analogen Regelkreisen erfolgt die Verarbeitung des Stellsignals im Takt des Eingangssignals alle 20 ms. Digitalservos haben daher eine höhere Stellgenauigkeit, da minimale Abweichungen vom Soll-Stellwert schneller nachgeregelt werden. [CON11]

Der gewählte Servomotor "Rhino Digi 4" der Fa. Multiplex hat eine Stellzeit von 100ms für 60° Drehwinkel bei einem Drehmoment von 250 Ncm (Werte für 6 V Spannungsversorgung). Über einen Hebel wird der Zylinderkolben so bewegt, dass ein Stellwinkel von 180° der gesamten Hublänge des Zylinders von 100 mm entspricht. Die Stellzeit beträgt dann 300 ms und die dadurch maximalmögliche Druckänderungsrate in der Druckkammer 900 Pa/s. Die geforderte maximale Druckänderungsrate von 400 Pa/s kann mit diesem Servoantrieb somit theoretisch leicht erreicht werden.

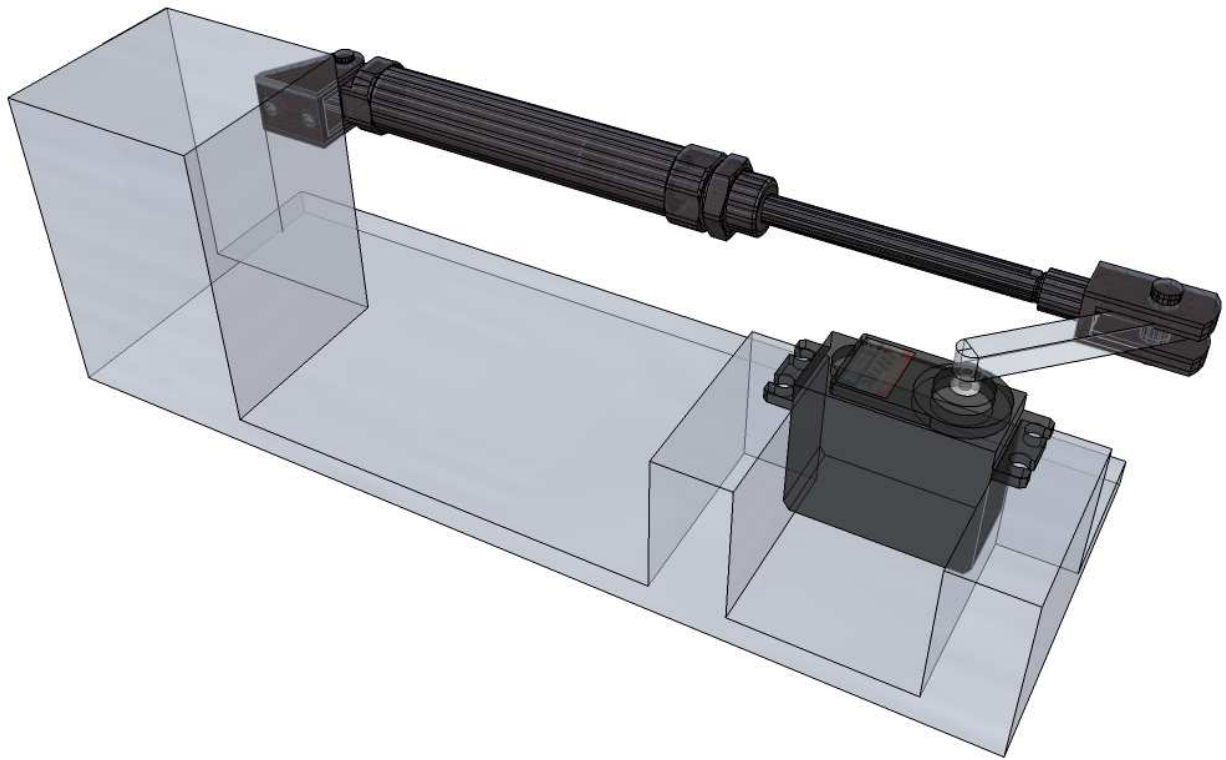


Abb. 4.6 3D-Modell der Zylinderpumpe

5 Software

Die Software für den Druckprüfstand hat zwei Hauptaufgaben: Zum einen wird damit der vorgegebene Soll-Druckverlauf im Inneren der Druckkammer eingestellt und zum anderen wird währenddessen die akustische Vermessung des Mikrofons durchgeführt. Diese beiden getrennten Prozesse werden von einem gemeinsamen Steuerprogramm in Echtzeit verarbeitet.

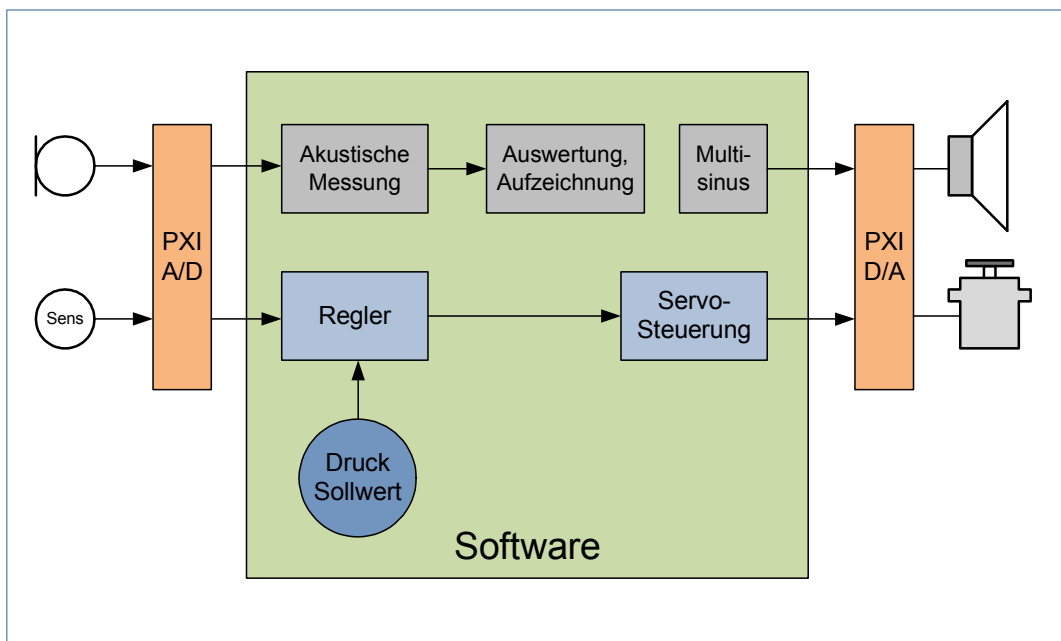


Abb. 5.1 Blockschaltbild der Struktur der Software

Die Software wurde in der grafischen Entwicklungsumgebung LabVIEW¹⁵ programmiert. Als Hardwareschnittstelle wird ein Peripheriemodul der PXI-Plattform¹⁶ mit analogen Ein- und Ausgängen verwendet. Es werden je zwei analoge Ein- und Ausgänge des Moduls benötigt: An den Eingängen werden simultan sowohl die Ausgangsspannungen des Drucksensors und des Mikrofons erfasst und A/D gewandelt. An den bei-

¹⁵ LabVIEW „Laboratory Virtual Instrumentation Engineering Workbench“, Version 10.0.1 National Instruments.

¹⁶ PXI (PCI extensions for Instrumentation), National Instruments.

den Ausgängen des PXI Moduls liegen das Messsignal für den Lautsprecher und das Steuersignal für die Servopumpe an.

Die Auswertung der akustischen Messung geschieht auf zwei Ebenen. Eine übersichtliche Darstellung des Signalpegels am Ausgang vom Messmikrofon bei verschiedenen Frequenzen erfolgt in Echtzeit. Damit soll eine schnelle Kontrollmessung verschiedener Mikrofone möglich sein. Sollte eine genauere Analyse des Mikrofonsignals erwünscht sein, werden die Daten aufgezeichnet und stehen für eine spätere detaillierte Auswertung mit DIADem¹⁷ oder Matlab zur Verfügung.

¹⁷ DIADem: Software zur Datenverwaltung und Datenauswertung, National Instruments.

5.1 Software-Regler

Die Aufgabe des Regelkreises ist es, einen vorgegebenen Soll-Druckverlauf in der Druckkammer herzustellen. Die Soll-Druckfunktion ist eine vorab generierte Funktion, die aus den Messdaten des realen Luftdrucks oder einer speziellen Testfunktion erstellt wurde. Neben der Reproduktion dieser Drucksollfunktion muss der Regelkreis auch Störungen ausgleichen können. Solche Störungen können durch einen leichten Luftverlust der Druckkammer oder Druckschwankungen des Umgebungsdrucks entstehen.

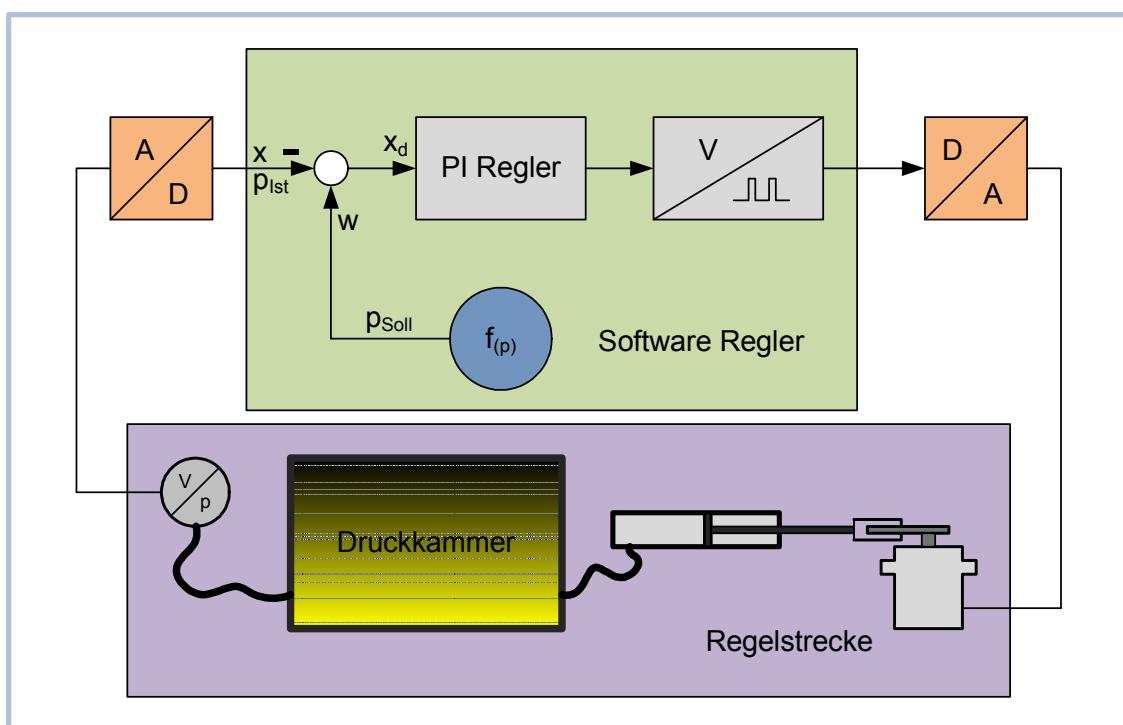


Abb. 5.2 Aufbau Regelkreis

Der Regelkreis lässt sich in die beiden Hauptstrukturen Regeleinrichtung, oder kurz Regler und Regelstrecke unterteilen.

Der Eingangswert für den rein softwaremäßig realisierten Regler ist die Abweichung des aktuellen Drucks in der Druckkammer vom Sollwert. Diese Differenz $x_d = w-x$ wird bei jedem Schleifendurchlauf der Software berechnet. Aus dem vom Regler berechneten Korrekturwert wird in ein Stellsignal für den Servomotor generiert.

Die Regelstrecke besteht aus den Stellgliedern (Servo und Zylinder), der Druckkammer und dem Drucksensor. Diese einzelnen Komponenten können durch standardisierte Regelkreisglieder charakterisiert werden, um eine Aussage über das Verhalten der gesamten Regelstrecke zu treffen. Sensor und Pneumatikzylinder können vereinfacht als reine Proportionalglieder (P-Glied) angesehen werden, die eine sprunghafte Änderung des Eingangswertes in einen nicht verzögerten Sprung der Ausgangsgröße wandeln. Die Übertragungsfunktion ist frequenzunabhängig:

$$F(j\omega) = \frac{U_a}{U_e} = K \quad [5.1]$$

Die Druckkammer selbst zeigt das Verhalten eines PT_1 -Gliedes. Einem sprunghaften Druckanstieg am Eingang folgt der Behälterdruck nach einer e-Funktion auf den geänderten Druckwert. Der Servomotor ist vom inneren Aufbau her genau genommen ein Integrator. Durch den bereits im Servo integrierten Regelkreis verhält er sich aber nach außen hin ebenfalls wie ein PT_1 -Glieder. Im Vergleich zur Druckkammer ist die Zeitkonstante aber gering.

Die vereinfachte Übertragungsfunktion der gesamten Regelstrecke ist das Produkt der Einzelglieder und lautet:

$$F(j\omega) = K_{ges} \cdot \frac{1}{1+j\omega T_1} \quad [5.2]$$

Die folgende Abbildung zeigt die experimentell ermittelte Sprungantwort der Regelstrecke. Das Eingangssignal ist ein Sprung des Servo-Steuersignals vom Mittenwert zur positiven Endposition, hier normiert dargestellt.

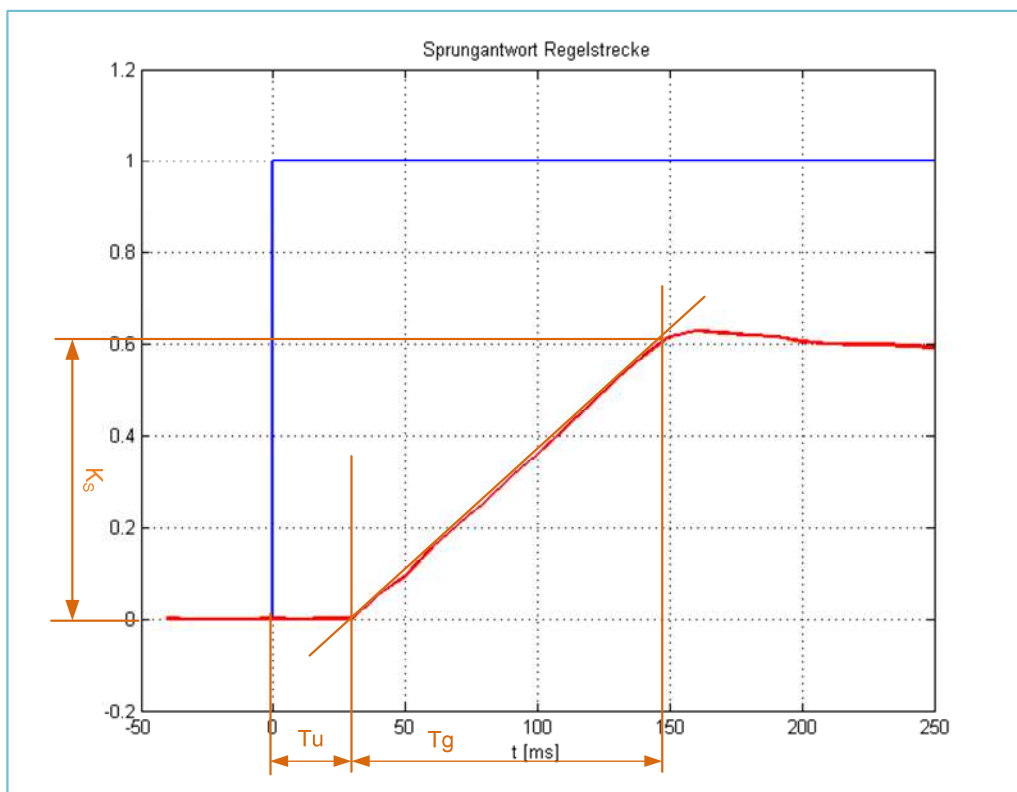


Abb. 5.3 Sprungantwort Regelstrecke

Ein vergleichbares dynamisches Verhalten der Strecke ist in der Praxis bei vielen Prozessen in der Verfahrens- und Antriebstechnik gegeben. Ein geeigneter Standardregler für dieses Regelstreckenverhalten ist der PI-Regler. Der Proportionalteil dieses Reglers multipliziert die Regelabweichung mit einem konstanten negativen Faktor. Der integrale Anteil führt eine mögliche bleibende Regelabweichung zurück.¹⁸

Einstellung der Parameter des PI-Reglers:

Eine schnelle Methode zur Ermittlung der Regler-Parameter für den Proportionalfaktor des P-Teiles und die Integrationszeit des I-Teiles ist die Methode nach Chien, Hrones und Reswick [CHR52].

¹⁸ Vgl. [ORL07]

Aus der experimentell gemessenen Sprungantwort der Regelstrecke lassen sich durch Anlegen einer Tangente die Verzugszeit T_u und Ausgleichzeit T_g messen (Abb. 5.3). Aus einer Tabelle lassen sich so Richtwerte für ein gewünschtes Reglerverhalten ablesen. Die Feineinstellung der Werte erfolgt im Anschluss empirisch.

Regler	Parameter	Einstellg. →		X_m 20%	
		aperiodisch	Führung	aperiodisch	Führung
	für	Störung	Führung	Störung	Führung
P	K_R	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,3 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$
PI	K_R T_N	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$ $4T_u$	$\frac{0,35 T_g}{K_S T_u}$ $1,2T_g$	$\frac{0,7 T_g}{K_S T_u}$ $2,3T_u$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$ $1,0T_g$
PID	K_R T_N T_V	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$ $2,4T_u$ $0,42T_u$	$\frac{0,6 T_g}{K_S T_u}$ $1,0T_g$ $0,5T_u$	$\frac{1,2 T_g}{K_S T_u}$ $2,0T_u$ $0,42T_u$	$\frac{0,95 T_g}{K_S T_u}$ $1,35T_g$ $0,47T_u$

Tabelle 1: Regler-Einstellwerte nach Chien, Hrones, Reswick [ORL07]

5.2 Akustischer Messalgorithmus und Datenanalyse

Die Messung von Mikrofonen in der Druckkammer soll als Ergebnis eine schnelle Analyse des Übertragungsverhaltens schon während des Messvorgangs liefern. Der Messalgorithmus muss daher in der Lage sein, den Pegelbruch des Mikrofonsignals bei einem eventuell auftretenden Fluktuations-Fehler¹⁹ in Echtzeit darzustellen. Um den Pegelbruch in verschiedene Frequenzbänder aufgelöst anzeigen zu können, erfolgt eine Berechnung der Übertragungsfunktion - wie in Kapitel 2.3 *Akustische Messverfahren* beschrieben - mit einer Kurzzeit-Fourier-Transformation mit kurzen Analyseblöcken.

¹⁹ Kapitel 1

Die maximale Länge eines Analyseblocks ergibt sich aus der gewünschten zeitlichen Auflösung des Pegelverlaufs und der Forderung, dass der Signalpegel innerhalb der Blocklänge als annähernd zeitinvariant angenommen werden kann. Bei einem typischen Fluktuations-Fehler bricht die Signalamplitude innerhalb von 400 ms um 6 dB ein und steigt etwa symmetrisch um denselben Wert wieder an.²⁰ Bei einer sinnvoll gewählten Auflösung dieses Vorgangs von etwa 25 Blöcken ergibt das eine Blocklänge von 16 ms und eine Pegeländerung von maximal 0,5 dB pro Analyseblock. Durch die Länge der Analysefenster ist die Frequenzauflösung der Fourier-Transformation vorgegeben. Für diese Anwendung ist jedoch keine sehr hohe Frequenzauflösung erforderlich, da es genügt, die frequenzselektive Darstellung des Pegelverlaufs auf wenige Bänder zu beschränken.

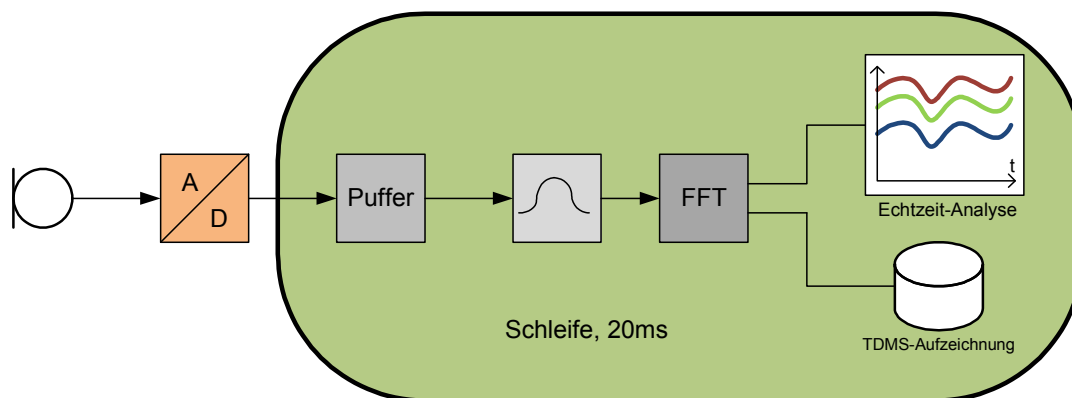


Abb. 5.4 Schleifenstruktur der Software

Die Software ist in einer Schleifenstruktur aufgebaut. In jedem Schleifendurchlauf wird ein Block des Mikrofonsignals aus dem Lesebuffer ausgelesen, mit einem Hanning-Fenster multipliziert und fouriertransformiert. Die Amplitudenwerte jener Frequenzlinien, die im Multisinus-Anregungssignal enthalten sind, werden kontinuierlich in einem Graphen dargestellt und für detaillierte Analysen aufgezeichnet. Aus den Maxima und Minima der bis zu 2 s zurückliegenden Messwerten wird die Höhe der Pegeländerung in jedem Band ermittelt. Damit lässt sich eine Aussage über die Größe des Pegel einbruchs bei einem Fehler treffen. Die Schleife ist mit einer Frequenz von 50 Hz getaktet. Dieser Wert erweist sich als günstig, da die Periodendauer von 20ms etwa der gewählten Blocklänge entspricht und außerdem die Ansteuerung des Servomotors ebenfalls mit dieser Frequenz erfolgt.

²⁰ Signalverlauf bei Fluktuations-Fehler, Siehe Abb. 3.13 ff

Optimierung des Multisinus-Anregungssignals:

Ein entscheidender Faktor für einen möglichst optimalen Messvorgang ist eine günstige Wahl der Frequenzen des Multisinus Anregungssignals. Dabei spielen mehrere Faktoren eine Rolle: Die gewünschte Bandbreite, die vom Multisinussignal abgedeckt wird, hängt davon ab in welchem Frequenzbereich das Mikrofon analysiert werden soll und davon, wo die Grenzen des Wiedergabesystems liegen. Der Frequenzgang des Lautsprechers (Abb. 4.3) hat bis 5kHz eine weitgehend lineare Wiedergabe. Darüber ist das Abstrahlverhalten der Membran nicht mehr optimal. Die untere Grenzfrequenz der Messung wird von dem Effekt bestimmt, dass bei sehr tiefen Frequenzen der Schallwechseldruck die Differenzdruckmessung beeinflusst. Die tiefste Frequenz im Anregungssignal muss deshalb größer als 80 Hz sein (Kapitel 6.1).

Für eine ausreichend genaue Analyse des Signalverlaufs des Fluktuations-Fehlers genügen ca. 6 Frequenzlinien im Bereich von 100 bis 3000 Hz. Eine Betrachtung höherer Frequenzen ist nicht notwendig, weil der Pegelbruch beim Auftreten eines Fehlers über das gesamte Frequenzband etwa gleich groß ist. Aus der Wahl der Abtastfrequenz und der FFT-Blocklänge im Signalanalyse-Zweig ergibt sich eine Einschränkung für die Frequenzwahl des Multisinus-Anregungssignals. Die Wahl der Abtastfrequenz f_s des Mikrofonsignals muss nach dem Nyquist-Shannon Kriterium mindestens $2 \cdot f_{\max}$ betragen. Bei einer Fensterlänge T von 20ms (ein Schleifendurchlauf, s.o.) ist bei einer gewählten Abtastfrequenz von 8192Hz eine maximale FFT Länge von 163 Samples möglich:

$$N_{FFT} < f_s \cdot T = 8192 \frac{1}{s} \cdot 0,020 s = 163,84 \quad [5.3]$$

Der recheneffiziente FFT-Algorithmus bedingt eine Blocklänge von 2^n Samples. Die nächstkleinere Zweierpotenz für N_{FFT} liegt demnach bei 128 Samples. Als Abtastfrequenz wurde ebenfalls eine Zweierpotenz gewählt, weil sich dadurch wieder Zweierpotenzen bei den Mittenfrequenzen der FFT-Bins ergeben. Für die Frequenzauflösung (=Abstand zwischen zwei benachbarten FFT-Bins) gilt:

$$\Delta f = \frac{f_s}{N_{FFT}} = \frac{8192 \text{ Hz}}{128} = 64 \text{ Hz} \quad [5.4]$$

Wird das Multisinus-Signal nun so gewählt, dass es nur Vielfache von 64 Hz enthält, kann es mit diesen FFT Parametern optimal analysiert werden, da jede Sinusschwingung im Anregungssignal genau in der Mitte eines FFT-Analysefrequenzbandes erfasst wird.

Zusammengefasst stehen nun für das Multisinus Anregungssignal **Vielfache von 64 Hz** im Bereich von $f_{uG} = 80 \text{ Hz}$ bis zur Grenze der Abtastung bei $f_s/2 = 4096 \text{ Hz}$ zur Verfügung.

Aus der Messung der Übertragungsfunktion der akustischen Messkette²¹ sind jene Frequenzbereiche ersichtlich, in denen es durch raumakustische Effekte zu einer Resonanzüberhöhung oder Auslöschung kommt. Diese Frequenzen sollten bei der Frequenzwahl des Multisinus vermieden werden. In der folgenden Abbildung sind die Übertragungsfunktion und die gewählten Frequenzen des Multisinus Signals dargestellt:

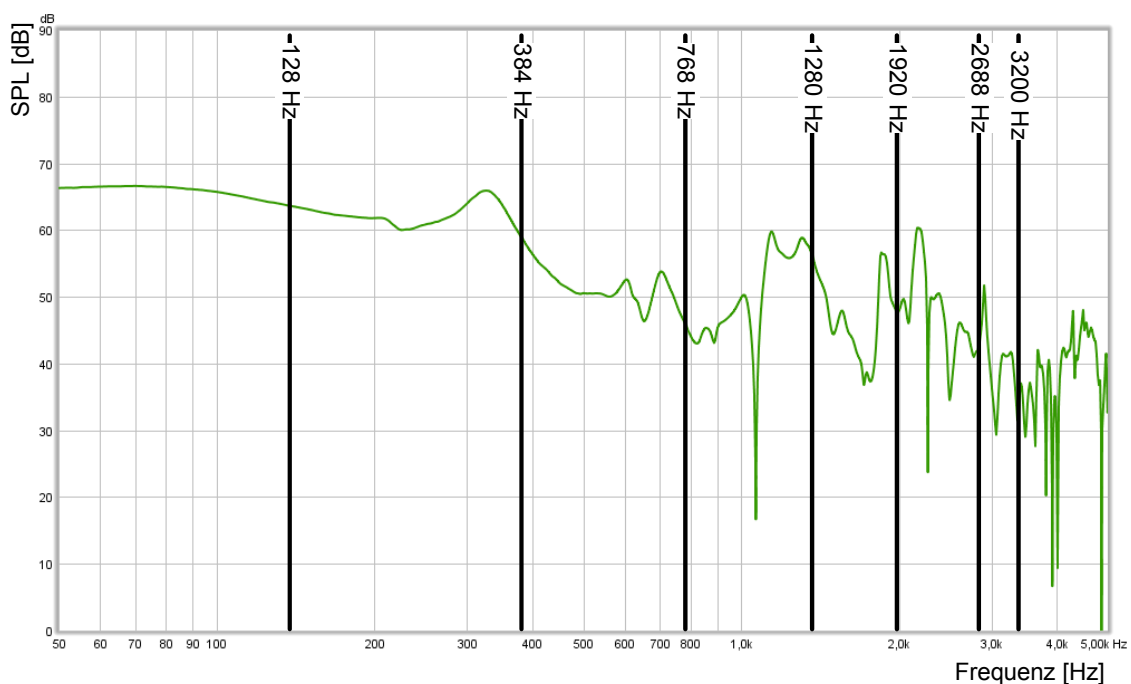


Abb. 5.5 Frequenzgang der Druckkammer und gewählte Multisinus Frequenzen

²¹ Messung der Übertragungsfunktion der akustischen Messkette siehe Kapitel 6.1

Das Multisinus Signal wurde mit Matlab vorab berechnet. Die akustische Anregung der Druckkammer und die Messungen erfolgen kontinuierlich während der gesamten Messzeit, die von der Dauer der Soll-Druckfunktion bestimmt wird. Das Multisinus-Signal muss nicht für die gesamte Messdauer berechnet werden, sondern kann in einer Schleife (Loop) abgespielt werden. Um Unstetigkeiten beim Sprung zum Anfang des Loops zu vermeiden, müssen alle vorkommenden Sinuswellen in einer ganzzahligen Anzahl von Perioden Platz haben. Da alle vorkommenden Frequenzen geradzahlige Vielfache von 64 Hz sind, reicht eine Signaldauer entsprechend der halben Periodendauer dieser Grundfrequenz. Bei 48 kHz Samplingfrequenz ergibt das eine Länge von 375 Samples.

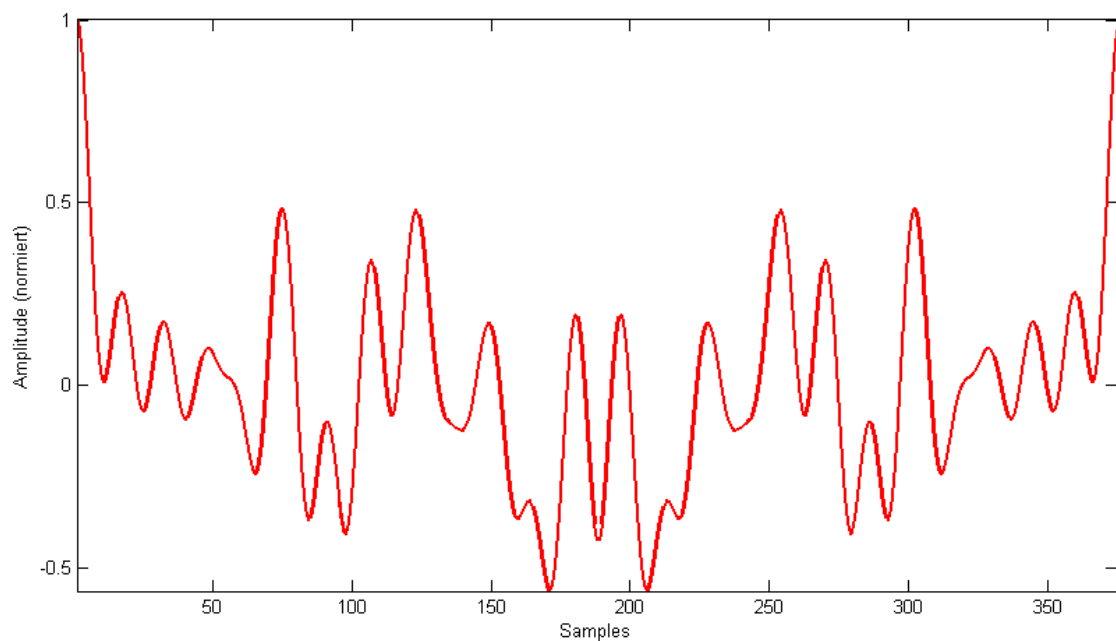


Abb. 5.6 Multisinus, eine Periode

5.3 Grafische Benutzeroberfläche, Messmodi

Über die graphische Benutzeroberfläche (GUI – Graphical User Interface) wird die Konfiguration der Messsoftware vorgenommen. Weiters erfolgt eine einfache Analyse der Auswirkung des Drucks auf den Pegelabfall der Mikrofonsignale in Echtzeit.

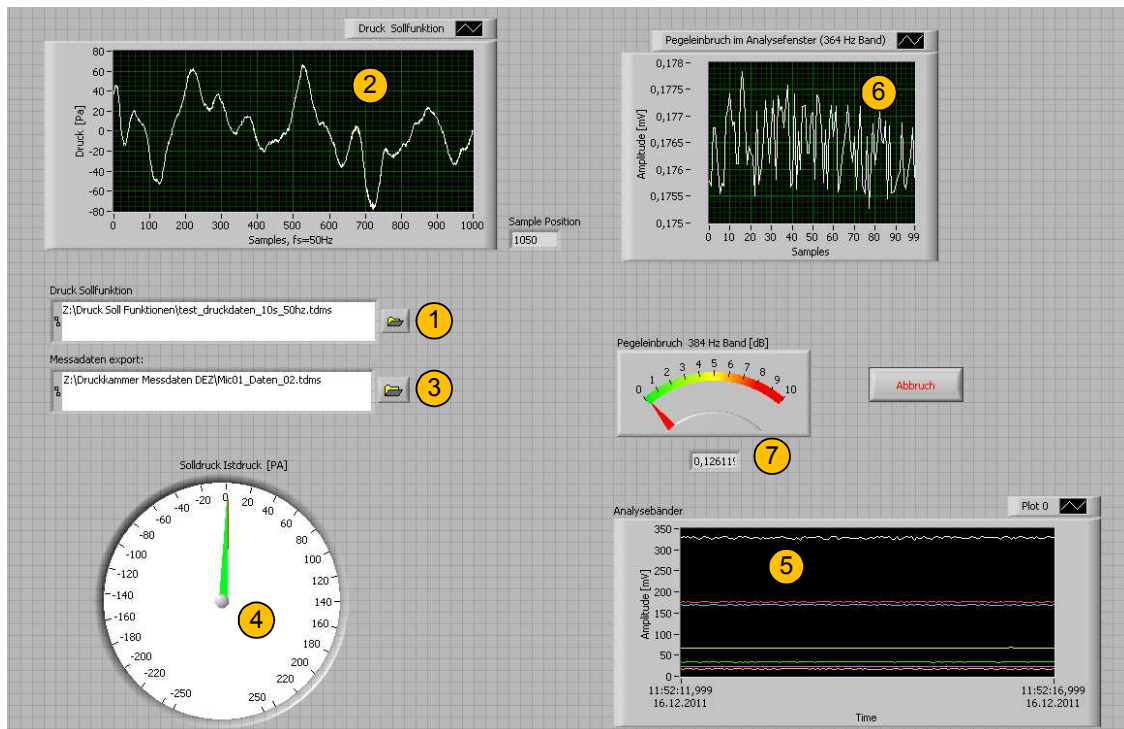


Abb. 5.7 Grafische Benutzeroberfläche der Messsoftware

Im linken Teil der GUI wird eine Druck Sollfunktion aus der Datenbank ausgewählt (1). Diese kann entweder ein Ausschnitt aus einem in der realen Umgebung gemessenen Druckverlauf oder eine vorab berechnete Testfunktion sein. Eine nähere Beschreibung dieser Testfunktion folgt im kommenden Abschnitt.

Sobald die Messung gestartet wird, ist die gewählte Druck-Sollfunktion im Graphen (2) dargestellt.

Im Feld (3) wird der Pfad und Dateiname für die Messdatenaufzeichnung bestimmt. Es werden die Druckfunktionen (Soll- und Istdruck) sowie der Pegelverlauf aller Analyseebänder aufgezeichnet. Diese Daten können im Anschluss an die Messung mit der Datenauswertungssoftware DIAdem genau analysiert werden. (siehe Kapitel 7)

Ein Manometer (4) zeigt während der Messung den Solldruckwert (grüne Nadel) und den aktuellen Druckwert in der Druckkammer (rote Nadel). Letzterer Wert wird zusätzlich numerisch dargestellt.

In Fenster (5) wird der absolute Pegel aller sieben Analysebänder dargestellt.²² Die jeweils letzten 100 Samplewerte (=2 s) des Analysebandes bei 364 Hz werden im Fenster (6) angezeigt. Die Länge dieses Ausschnitts wurde so gewählt, dass ein Pegel einbruch eines Fluktuationsfehlers vollständig erfasst werden kann. Die Differenz zwischen dem maximalen und dem minimalen Wert innerhalb dieses Zeitfensters wird im Messinstrument (7) in Dezibel angezeigt. Diese Größe gilt als Anhaltswert für den Pegel einbruch des Mikrofonsignals beim aktuell reproduzierten Druckverlauf.

Messmodi und Testfunktionen:

Für die Vermessung verschiedener Mikrofone ist eine Druckfunktion sinnvoll, die in ihrem Verlauf eine ansteigende Druckänderungsrate aufweist. Diese Druckfunktion wurde als Trapezfunktion mit ansteigender Flankensteilheit vorab mit Matlab berechnet.

²² Frequenzen der Analysebänder siehe Abb. 5.5

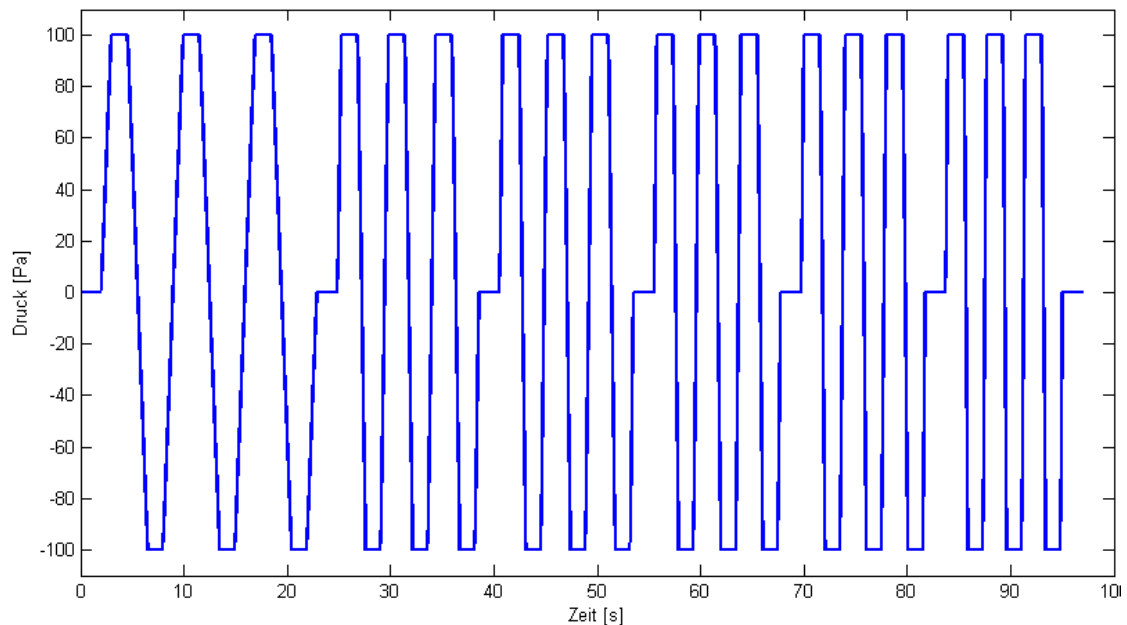


Abb. 5.8 Zeitverlauf der Druck-Trapezfunktion

Die Druckamplitude wurde mit 100 Pa festgelegt. Druckwerte dieser Größe kommen in der realen Umgebung mit einer Häufigkeit von unter 1 % vor.

Die Werte der Druckänderungsrate reichen von ± 100 Pa/s bis ± 500 Pa/s und durchlaufen je 3 positive und 3 negative Flanken. Dieser Messbereich deckt einen weiten Ausschnitt der realen Druckänderungsraten ab²³. Zwischen den Flanken bleiben die Druckwerte für 1500 ms unverändert, damit sich vor der nächsten Druckflanke der Innendruck in der Mikrofonkapsel über die Kapillare ausgleichen kann.

Zur Überprüfung der Mikrofonübertragung unter realen Druckbedingungen kann eine Druck-Sollfunktion aus verschiedenen Ausschnitten der gemessenen Druckfunktionen ausgewählt werden (Messung: siehe Kapitel 3). Diese Ausschnitte stammen aus Stellen, an denen besonders schnelle und hohe Druckänderungen stattfanden.

²³ vgl. Abb. 3.7 bis Abb. 3.10

6 Messungen der technischen Daten

In diesem Kapitel werden die Messvorgänge zur Erfassung der technischen Daten der Druckkammer beschrieben.

Für die Datenerfassung wurden zwei unterschiedliche Messverfahren angewendet:

- Eine Sinus-Sweep Messung zur Erfassung der akustischen Eigenschaften der Druckkammer und des Übertragungsweges.
- Messungen mit verschiedenen Sprungfunktionen als Steuersignal für die Servopumpe zur Ermittlung der maximalen Druckwerte und Dichtheit der Druckkammer.

6.1 Messung der Druckkammer-Akustik

Als Messsoftware wurde *RoomEQWizard*²⁴ verwendet, ein Programm zur Messung und Analyse der Raumimpulsantwort mit einem logarithmischen Sinus-Sweep als Anregungssignal [FAR00].

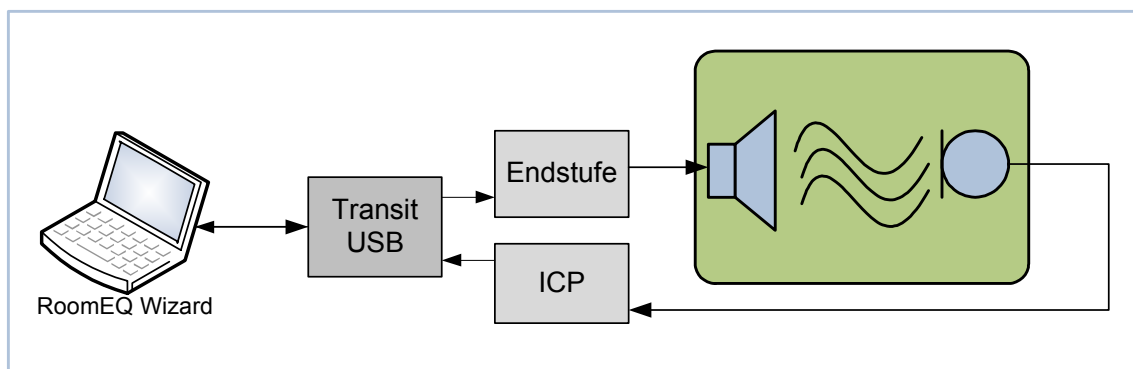


Abb. 6.1 Blockdiagramm für Druckkammer-Akustik Messung

²⁴ RoomEQWizard, Copyright John Mulcahy, 2004-2011, <http://www.hometheatershack.com/roomeq>

Anregungssignal: Log-Sweep50 - 5000 Hz, Länge 256k = 5,3s bei $f_s=48\text{kHz}$
Endstufe: Yamaha P4500
ICP: ICP Speisung und Vorverstärkung für das Messmikrofon
Transit USB : AD/DA Wandler, Audiointerface: M-Audio Transit USB

Die folgenden Abbildungen zeigen den **Amplitudengang der Raumimpulsantwort** im Inneren der geschlossenen Druckkammer. In

Abb. 6.2 ist die Dämpfung der Raumresonanzen durch Einbringung von einer bzw. zwei Dämmmatten²⁵ ersichtlich. In

Abb. 6.3 wird derselbe Frequenzgang gezeigt, allerdings mit einer Dritteloktav-Glättung. Hier wird die Dämpfung der hohen Frequenzen durch die Dämmmatten leichter ersichtlich. Da der positive Effekt der Resonanzdämpfung durch die zweite Dämmmatte nicht wesentlich verstärkt wurde, hohe Frequenzen aber deutlich stärker abgedämpft werden, wurde für die Druckkammer nur eine Dämmmatte verwendet.

²⁵ Verwendetes Dämmmaterial: Dynavox D-126 Dämmmaterial aus Polyesterwolle

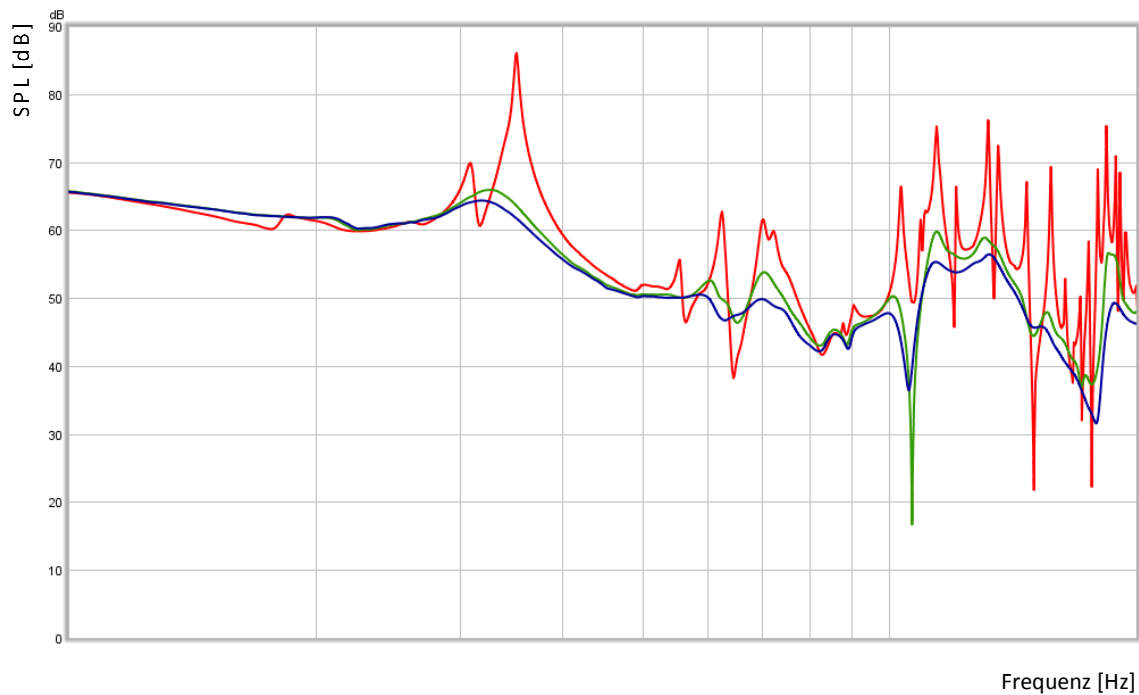


Abb. 6.2 Amplitudengang der Raumimpulsantwort der Druckkammer, ohne Glättung: ohne Dämmmaterial (rot), eine Dämmmatte(grün), zwei Dämmmatten (blau)

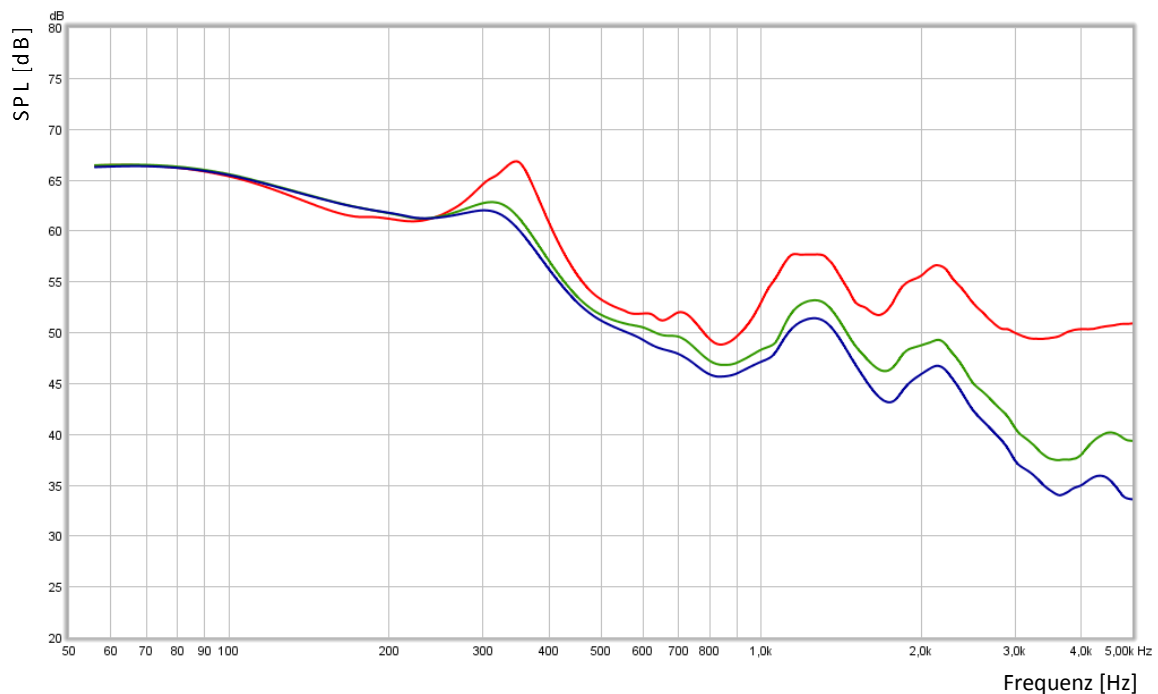


Abb. 6.3 Amplitudengang der Raumimpulsantwort der Druckkammer, 1/3 Oktav Glättung: ohne Dämmmaterial (rot), eine Dämmmatte(grün), zwei Dämmmatten (blau)

Schalldämmung von Umgebungsgeräuschen:

Zur Bestimmung der Schalldämmeigenschaften der Druckkammer gegenüber Störschall in der Messumgebung wurden zwei Frequenzgangmessungen durchgeführt: Die erste Messung erfolgte mit dem Messmikrofon an der Außenseite der Druckkammer, für die zweite Messung wurde das Mikrofon in die Druckkammer eingeschraubt. Das Sweep-Signal für die Messung wurde über einen Lautsprecher (Genelec 1030a) in einem Meter Abstand zur Druckkammer eingespielt. Aus der Differenz dieser beiden Frequenzgangmessungen lässt sich die Schalldämmung der Druckkammer ableiten. Sie beträgt im Messfrequenzbereich (50 Hz bis 5 kHz) 20-30 dB. (Abb. 6.4)

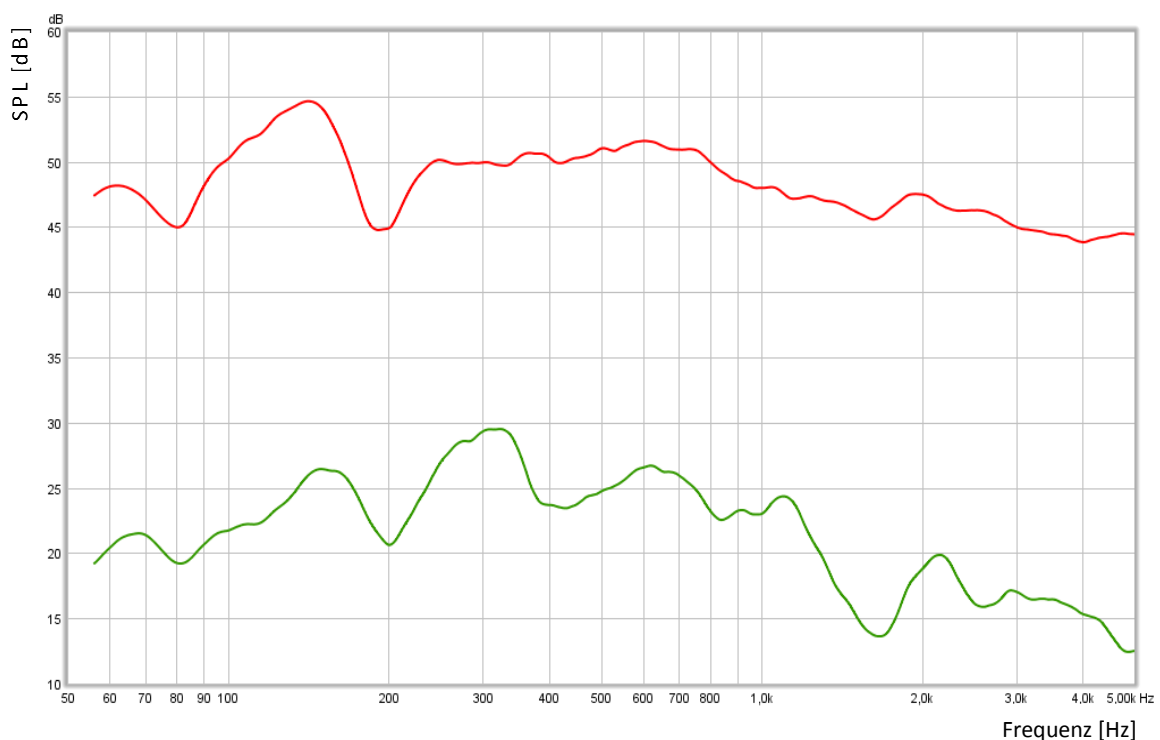


Abb. 6.4 Amplitudengang, Mikrofon außerhalb (rot) und innerhalb (grün) der Druckkammer positioniert

Die **untere Grenzfrequenz der Druckkammer** wird durch die tiefste Frequenz des Anregungssignals bestimmt, bei der die Rückwirkungen auf den Drucksensor durch den Schalldruck die Druckmessung nicht mehr störend beeinflusst. Für die Messung wurde hochpassgefiltertes Rosa Rauschen in die Druckkammer eingespielt. Die Grenzfrequenz des Hochpasses wurde so lange erhöht, bis die Ausgangsspannung des Drucksensors nur noch geringe Schwankungen zeigt. Die untere Grenzfrequenz der Druckkammer liegt bei 80 Hz.

6.2 Messung der Druckwerte

Für die Messungen der reproduzierbaren Über- und Unterdruck Maxima in der Kammer sowie die Druckänderungsraten und Dichtheit der Kammer wurde die Zylinderpumpe mit einer Sprungfunktion von Nullstellung auf den positiven, bzw. negativen Endwert gestellt. Die Sprungantwort (gemessener Differenzdruck in der Druckkammer) wurde im TDMS Format aufgezeichnet und mit DIAdem²⁶ ausgewertet.

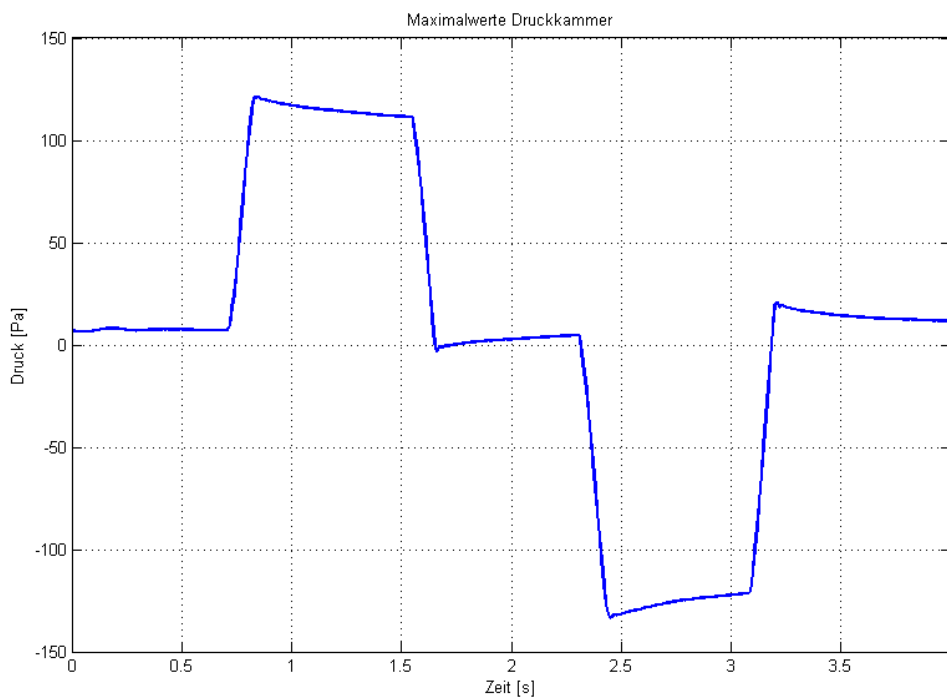


Abb. 6.5 Druck-Sprungantwort der Druckkammer

Die aus Abb. 6.5 ablesbaren maximalen Druckwerte und Druckänderungsraten betragen:

Überdruck: 113 Pa bei 470 Pa/s Druckänderungsrate

Unterdruck: -136 Pa bei -523 Pa/s Druckänderungsrate

²⁶DIAdem: Software zur Datenverwaltung und Datenauswertung, National Instruments

Druckverlust der Druckkammer:

Zur Messung des Druckverlustes der Druckkammer wurde ebenfalls eine Sprungfunktion verwendet. Der abklingende Über- bzw. Unterdruck wurde über einen Zeitraum von ca. 4 Minuten aufgezeichnet. In den ersten 20 s nach Anlegen der Sprungfunktion ist ein größerer Druckverlust beobachtbar. Dieser hängt mit dem Ausgleich der durch die Druckänderung entstandenen Temperaturdifferenz zusammen. (Übergang von adiabatischer zu isothermer Zustandsänderung, siehe Kapitel 2.1.2).

Ab der 20. Sekunde wurde durch eine Regression eine Exponentialfunktion der Form $p = p_0 \cdot e^{\frac{-t}{\tau}}$ an die Druckfunktion angenähert (Abb. 6.6 und Abb. 6.7).

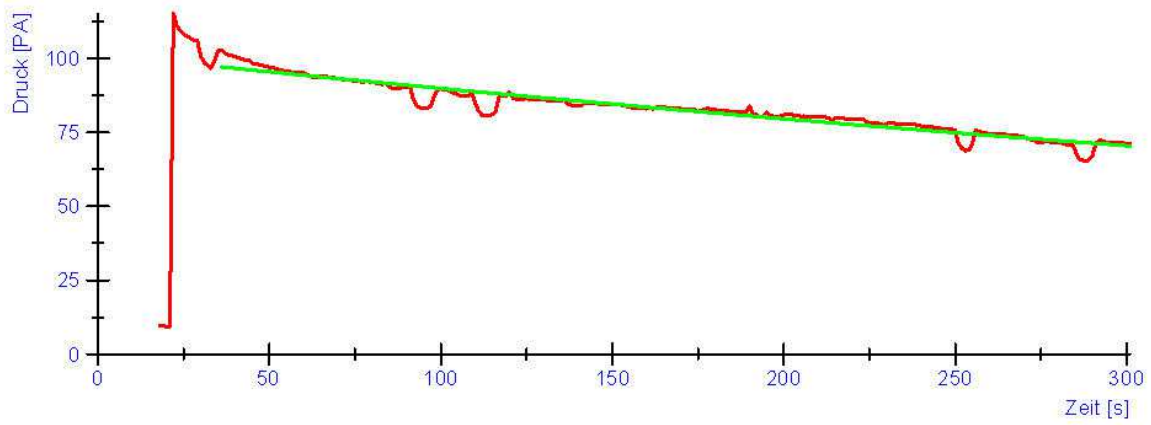
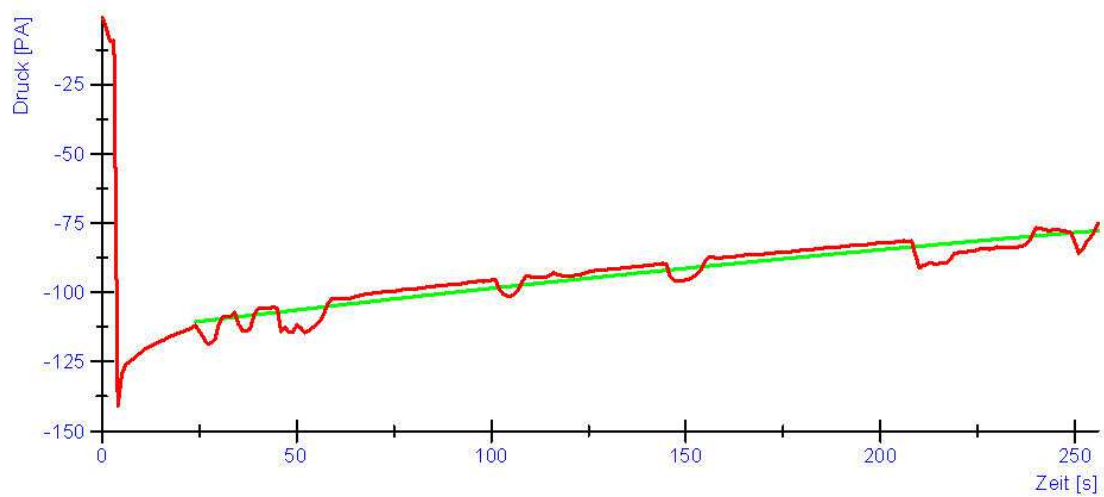
Die kurzen Einbrüche im Druckverlauf sind auf Schwankungen des Umgebungsdrucks zurückzuführen.

Die Zeitkonstanten τ der Druckkammer sind:

τ Überdruck: 823 s

τ Unterdruck: 657 s

Die Halbwertszeit, also die Zeit in der ein Ausgangsdruck auf die Hälfte abfällt, liegt bei $\tau \cdot \ln(2) \approx 8$ min. (bei Unterdruck).

**Abb. 6.6** Druckverlust bei Überdruck**Abb. 6.7** Druckverlust bei Unterdruck

7 Anwendung des Druckprüfstandes

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse zweier mit dem Druckprüfstand getesteter Mikrofone analysiert. Die Mikrofone wurden dabei jeweils einem trapezförmigen Druckverlauf (Druckänderungsraten: 100, 250, 294, 357, 384, 500 Pa/s, Amplitude ± 100 Pa) und einem gemessenen realen Druckverlauf ausgesetzt.

In den oberen Plots der folgenden Abbildungen werden der Soll-Druckverlauf und der in der Druckkammer reproduzierte Druckverlauf dargestellt, die unteren Plots zeigen die dazugehörigen Pegel einbrüche zweier ausgewählter Analysebänder bei 384 Hz und 1280 Hz (Bandbreite je 100 Hz).

Mikrofon 1: ROGA MI-17

¼“ Messmikrofon, Druckempfänger

Empfindlichkeit: 101 mV/Pa (1kHz)

Frequenzgang: 30 Hz – 4 kHz ($\pm 0,5$ dB), 4 Hz – 15 kHz ($\pm 1,5$ dB)

Äquivalenzrauschen max. 30 dB lin (20 Hz – 20 kHz), 26dB (A-gewichtet)

Max SPL Spitze: (5% THD) 124 dB

ICP Speisung und Vorverstärkung mit einem ICP-Adapter der Fa. GRABAU

Analyse der Messergebnisse (Abb. 7.1 und Abb. 7.2):

Die Pegel einbrüche beim ROGA Messmikrofon reichen von 1,5 dB bei 100 Pa/s Druckänderungsrate bis zu 4 dB bei 500 Pa/s. Die Pegel einbrüche sind bei positiven Druckänderungen stärker als bei negativen. Bei der Messung mit dem realen Druckverlauf sind die Pegel einbrüche nicht größer als 0,5 dB. Die Einbrüche sind von kurzer Dauer und der Pegel kehrt innerhalb kurzer Zeit auf den Ausgangswert zurück. (= kleine Zeitkonstante der Kapillare)

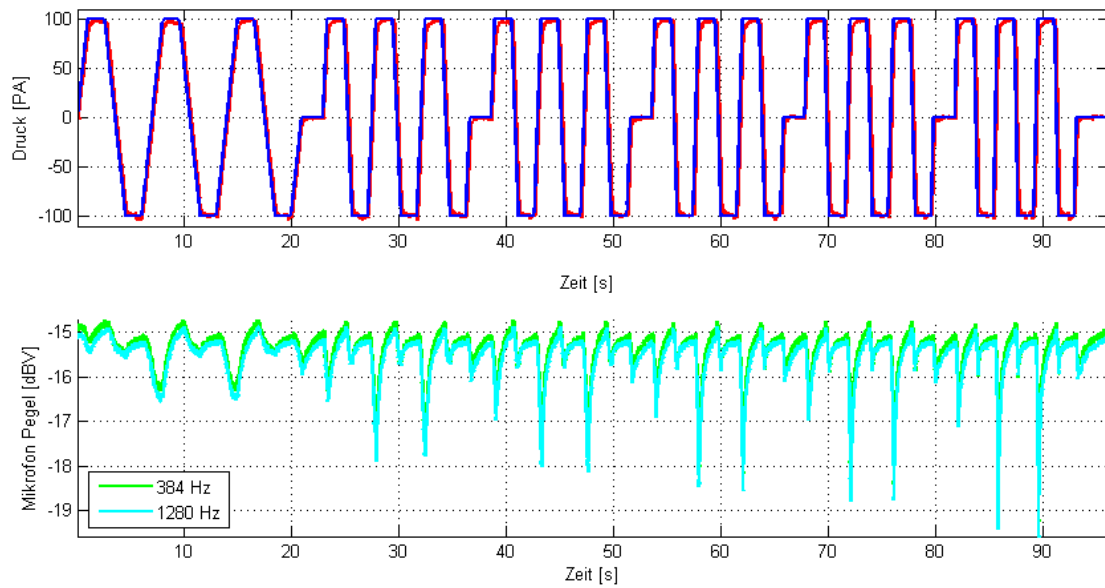


Abb. 7.1 ROGA MI-17 bei trapezförmigem Druckverlauf

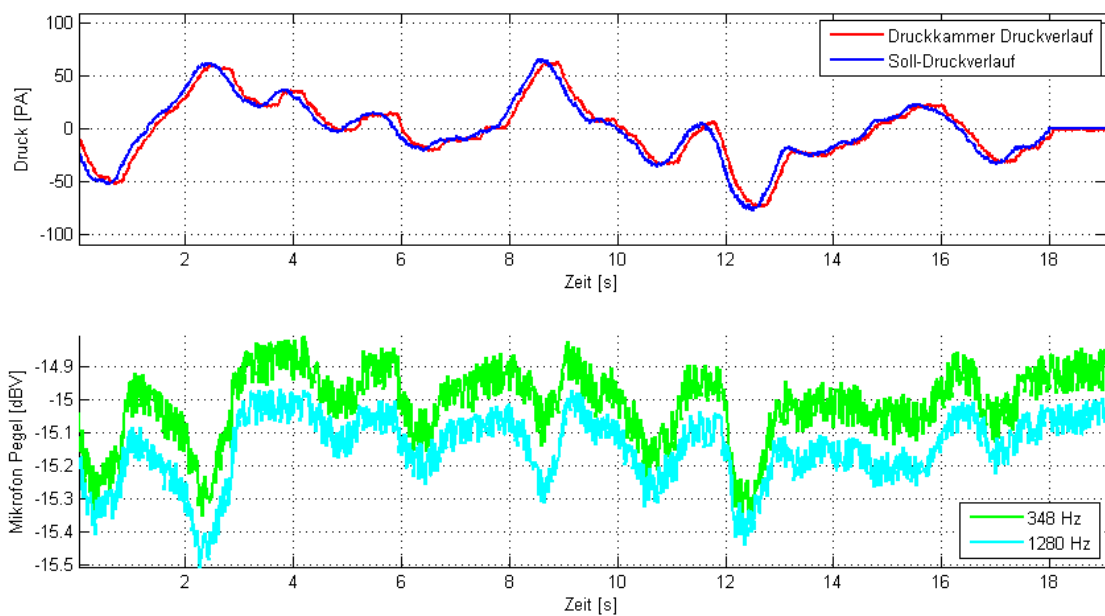


Abb. 7.2 ROGA MI-17 bei realem Druckverlauf

Mikrofon 2: Behringer B-5

18mm Mikrofon, Druckempfänger

Empfindlichkeit: 10mV/Pa

Äquivalenzrauschen: 18dB (A-gewichtet)

Max SPL Spitze: (1% THD) 140 dB

Phantomspannung über AKG B18 Phantomspannungsadapter

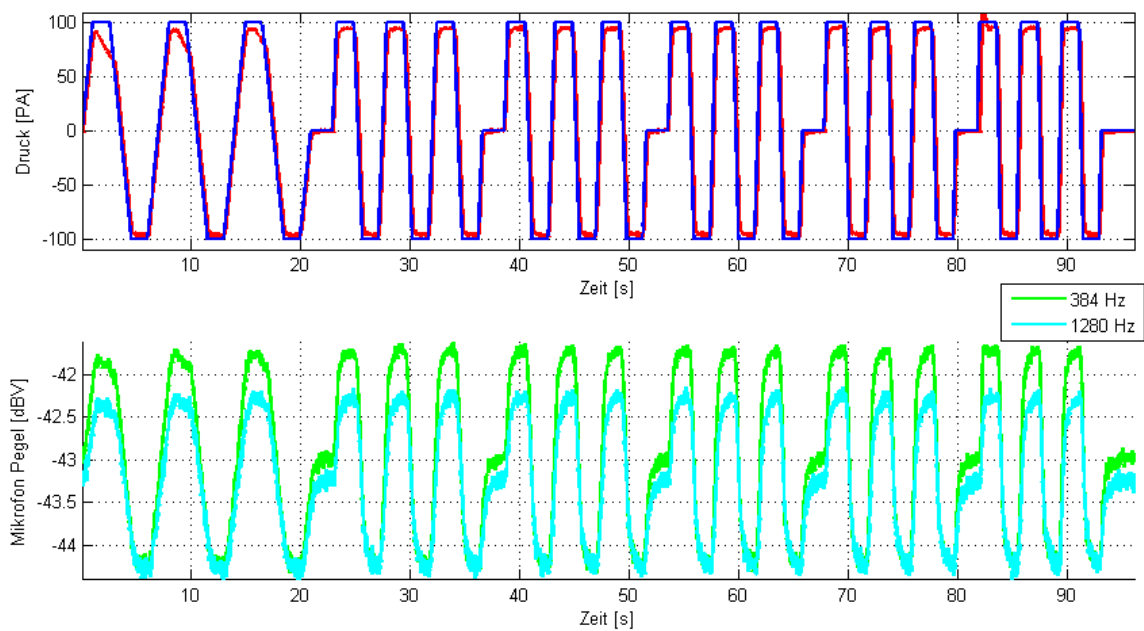


Abb. 7.3 Behringer B-5 bei trapezförmigem Druckverlauf

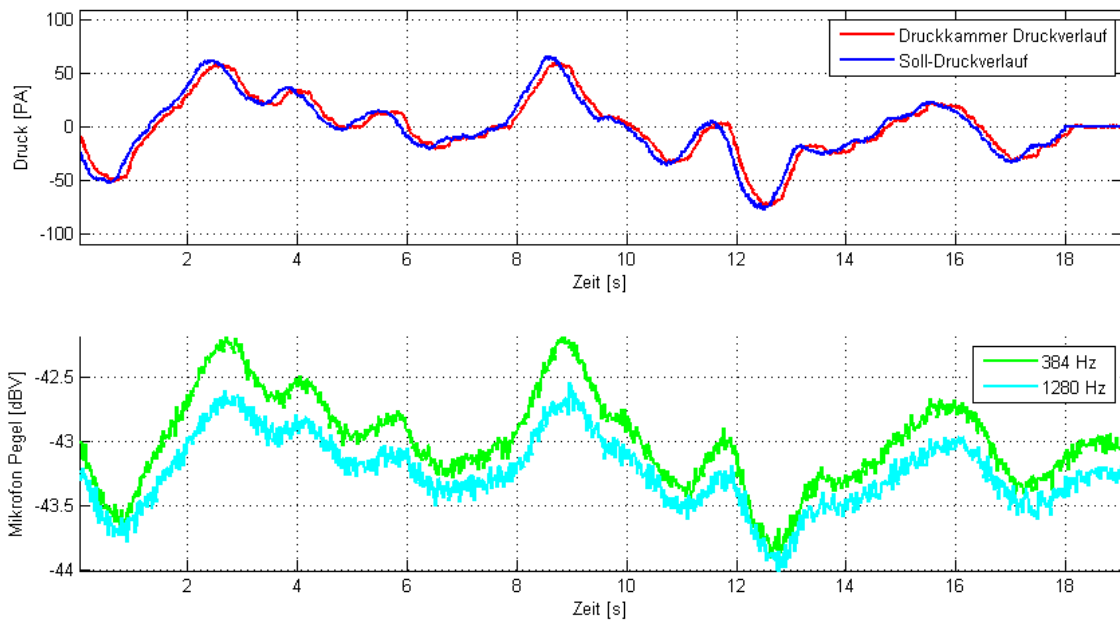


Abb. 7.4 Behringer B-5 bei realem Druckverlauf

Analyse der Messergebnisse (Abb. 7.3 und Abb. 7.4)

Die Pegelabweichungen beim Behringer Mikrofon betragen bei ± 100 Pa etwa 2 dB, unabhängig von der Druckänderungsrate. Der Ausgangspegel dieses Mikrofons folgt dem Differenzdruck, ohne merkliche Rückführung zum Pegel vor der Druckänderung. Dies kann daran liegen, dass die Kapillare zum Druckausgleich in der Kapsel bei diesem Mikrofon einen sehr geringen Durchmesser hat (=eine sehr hohe Zeitkonstante), oder blockiert ist. Auch die Messung mit dem realen Druckverlauf zeigt dieses Verhalten.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Das Verhalten von Druckmikrofonen bei veränderlichem Umgebungsdruck wird in den Datenblättern der Mikrofonhersteller kaum beschrieben. Die Reaktion auf unnatürlich schnelle und hohe Druckänderungen ist daher unvorhersehbar und führt im schlechtesten Fall zu Fehlfunktionen von akustischen Messsystemen.

Mithilfe des in dieser Arbeit entwickelten Druckprüfstandes ist es nun möglich, mit sehr geringem Zeitaufwand verschiedene Mikrofontypen auf ihr Verhalten bei Druckschwankungen hin zu überprüfen. Wie anhand der Messergebnisse zweier Mikrofone in Kapitel 7 gezeigt wurde, kann das Verhalten verschiedener Mikrofone durchaus sehr unterschiedlich ausfallen. Für akustische Sicherheitssysteme, die sehr empfindlich auf Pegelschwankungen reagieren, kann nun vorab eine Auswahl geeigneter Mikrofontypen erfolgen. Auch eine Validitätsprüfung von Mikrofonen vor dem Einbau in ein System ist wegen der kurzen Messdauer mit dem Druckprüfstand möglich.

Literaturverzeichnis

[AST10] Autor unbekannt, *Funktionsgeneratoren*, Laborskriptum für *Analoge Schaltungstechnik LU*, Institut für Elektronik, TU Graz, 2010

[B&K96] Brüel&Kjær: *Microphone Handbook Volume 1*, Nærum Dänemark, 1996

[CHR52] CHIEN, K.L.; HRONES, J.R.; RESWICK, J.B.: On the Automatic Control of Generalized Passive Systems, *Trans. ASME* 74, Cambridge, 1952

[CON11] Produktkatalog der Fa. CONRAD Electronic SE, Modellbau, Hirschau 2011/2012

[DIC93] DICKASON, Vancem Lautsprecherbau, Elektor-Verlag, Aachen, 1993

[FAR00] FARINA Angelo: *Simultaneous Measurement of Impulse Response and Distortion with a Swept-Sine Technique*, 108. AES Convention, Paris, 2000

[GÖR08] GÖRNE Thomas: *Tontechnik*, Hanser, München, 2008

[GW04] GRABER Gerhard, WESELAK Werner: *Skriptum zu VO Elektroakustik, Version 8*, IBK TU Graz, 2004

[Hoff02] HOFFMANN Jörg: Taschenbuch der Messtechnik, Fachbuchverlag Leipzig, 2002

[MEO96] SACHS, J.; THOMÄ, R.: *Vergleichende Untersuchungen zum Einsatz ausgewählter Testsignale in der akustischen Meßtechnik*, MEODAT Sonderdruck, Techn. Univ. Ilmenau, 1996

[MÖS10] MÖSER Michael: *Messtechnik der Akustik*, SpringerVerlag, Berlin/Heidelberg, 2010

[ORL07] ORLOWSKI P.F.: *Praktische Regelungstechnik*, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 2007

[STR94] C. J. Struck, *Simulated free field measurements AES*, 42(6):467–482, June 1994.

[VIS11] Website der Fa. Visaton
http://www.visaton.de/de/chassis_zubehoer/tiefmittelton/w100s_4.html
aufgerufen im Dez 2011

Anhang A: Spezifikationen des Druckprüfstandes

Abmessungen außen: 590 x 320 x 200 mm

Innenvolumen: 30 Liter

Gewicht: 12 kg

Klemmdurchmesser für Mikrofone: ¼", ½", 1", 20 mm

Drucksensor: GEMS Typ 5266 250 LB AC, Messbereich: +-250 Pascal

Druckzylinder: Durchmesser 32 mm, Hub 100 mm

Messfrequenzbereich: 80 Hz bis 5 kHz

Schalldämmung von Umgebungsschall: min 20 dB (50-5000 Hz), 25 dB bei 1 kHz

Luftdichtheit (Druckabfall) der Druckkammer: Zeitkonstante τ : 650 s

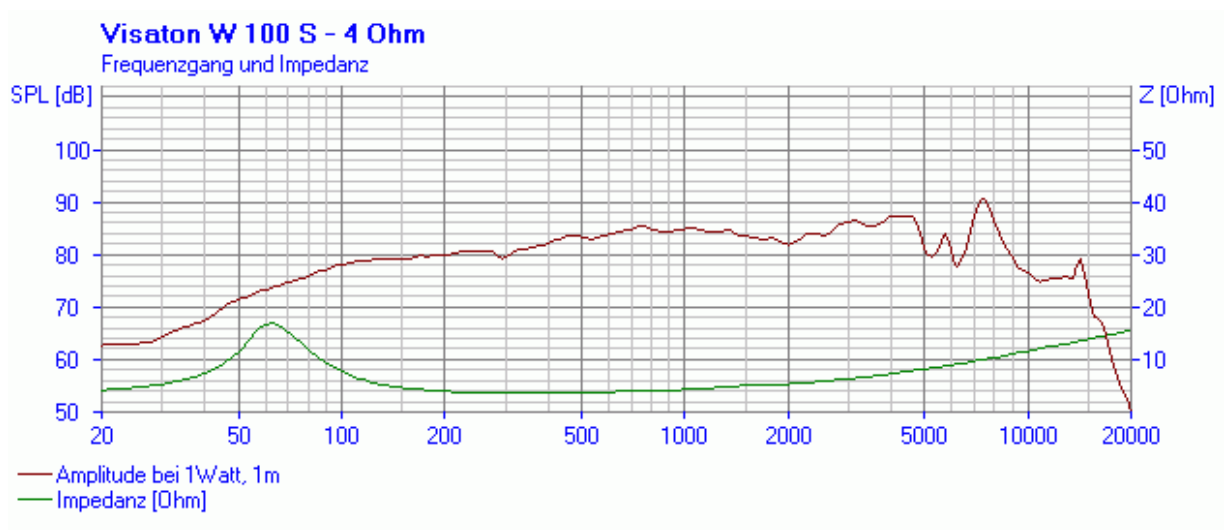
Maximal reproduzierbarer Überdruck/Unterdruck: 113 Pa / -136 Pa

Maximale Druckänderungsrate: 470 Pa/s

Anhang B: Datenblätter und Konstruktionspläne

Lautsprecher:

Visaton W 100 S, 4Ohm



Technische Daten:

Nennbelastbarkeit	30 W
Musikbelastbarkeit	50 W
Nennimpedanz Z	4 Ohm
Übertragungsbereich (-10 dB) (fu: untere Grenzfrequenz abhängig vom Gehäuse)	fu–15000 Hz
Mittlerer Schalldruckpegel	86 dB (1 W/1 m)
Abstrahlwinkel (-6 dB)	86°/4000 Hz
Grenzauslenkung	+/-4 mm
Resonanzfrequenz fs	65 Hz
Magnetische Induktion	1 T
Magnetischer Fluss	250 µWb
Obere Polplattenhöhe	4 mm
Schwingspulendurchmesser	20 mm
Wickelhöhe	8 mm
Schallwandöffnung	94 mm

Gewicht netto	0,49 kg
Gleichstromwiderstand Rdc	3,4 Ohm
Mechanischer Q-Faktor Qms	3,04
Elektrischer Q-Faktor Qes	0,54
Gesamt-Q-Faktor Qts	0,46
Äquivalentes Luftnachgiebigkeitsvolumen Vas	4,49 l
Effektive Membranfläche Sd	53 cm ²
Dynamische bewegte Masse Mms	5,3 g
Antriebsfaktor Bxl	3,7 Tm
Schwingspuleninduktivität L	0,5 mH

Drucksensor:

GEMS Differenzdrucksensor Typ 5266 250 LB AC, Messbereich: ±250 Pa -> 0-10 V

Specifications	
Input	
Pressure Range	Unidirectional 0-100 Pascals to 0 to 5000 Pascals Bi-directional ± 50 Pascals to ±2500 Pascals
Proof Pressure	100 and 250kPa range 14kPa 500 Pascal range 35kPa 1000 to 5000 Pascal range 69kPa
Line Pressure	69kPa max.
Performance	
Long Term Drift	0.5%/a
Accuracy	±1% F.S.
Thermal Error	±5% F.S.
Compensated Temperature	-18 to 65°C
Operable Temperature	-18 to 65°C
Zero Tolerance	±1% F.S. (10V output ±0.5%)
Span Tolerance	±1% F.S. (10V output ±0.5%)
Mechanical Construction	
Pressure Ports	6.2mm
Wetted Parts	Compatible with air or non-conductive gases
Electrical Connection	Via terminal strip
Enclosure	
Housing	Fire retardant glass filled polyester
Approvals	CE
Weight	150grams
Individual Specifications	
Voltage Output units	
Supply Voltage	5V output 9 to 30 Vdc/a.c 10V output 12 to 30Vdc/a.c
Output	0 to 5Vdc, 0 to 10Vdc For bi-directional ranges output at zero pressure 2.5V and 5Vdc respectively
Output Impedance	1000 ohms
Current Output Unit	
Supply Voltage (Vs)	24Vdc
Output	4-20mA two wire for bi-directional ranges output at 0 pressure 12mA
Loop Resistance	(Vs-9) x 50 ohms

Pneumatik Zylinder:

Norgren RT/57232/M/100

Betriebsmedium:	Gefilterte, geölte oder ungeölte Druckluft
Wirkungsweise:	Doppeltwirkend mit Endlagenpuffer
Betriebsdruck:	1 bis 10 bar
Gerätetemperatur:	-10°C* bis +80°C max. *Bei Temperaturen unter 2°C bitte Luftbeschaffenheit beachten
Zylinderdurchmesser:	32 mm
Hublänge:	100mm
Material:	
Zylinderrohr:	Edelstahl rostfrei (austenitisch)
Enddeckel:	Aluminium eloxiert
Kolbenstange:	Edelstahl rostfrei (austenitisch)
Abstreifer:	Polyurethan
Dichtungen:	Nitrilkautschuk

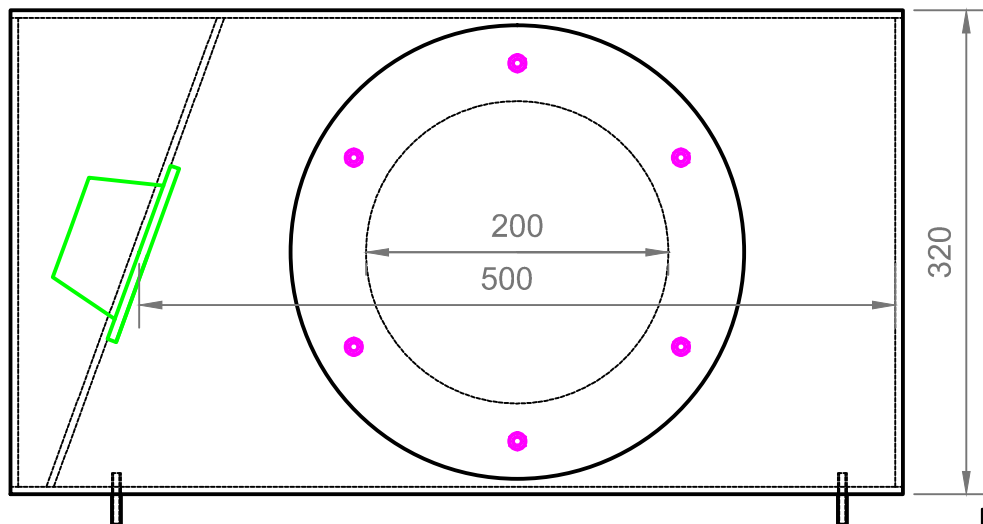
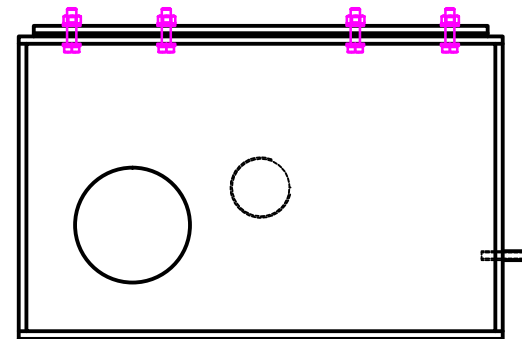
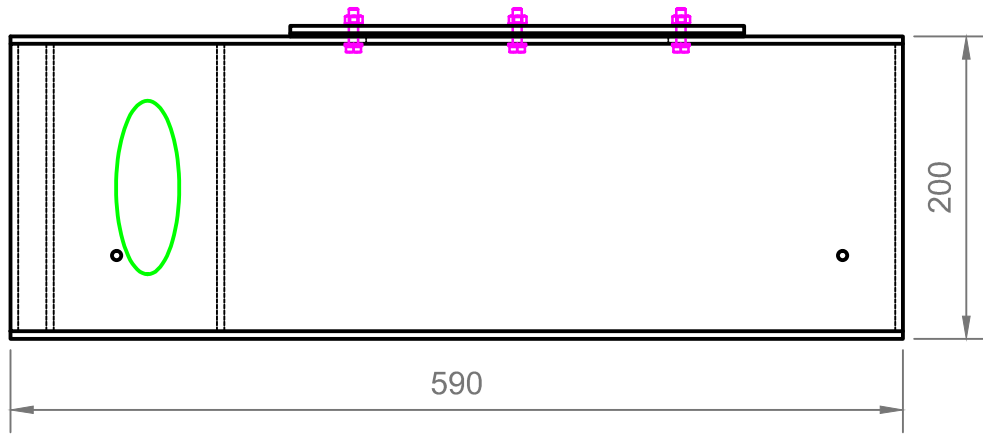
Servomotor:

MULTIPLEX *Rhino Digi 4*

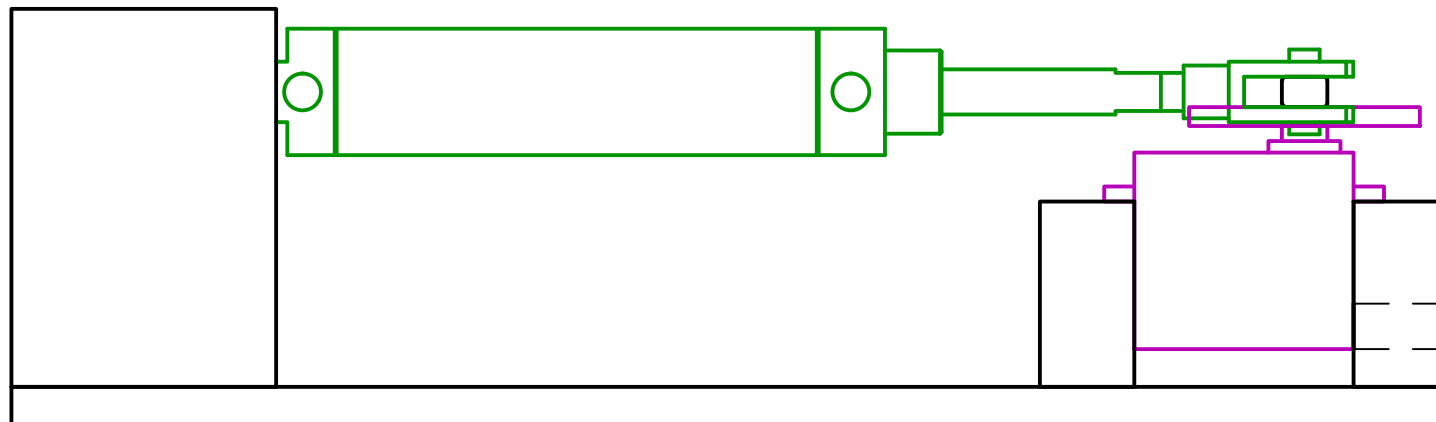
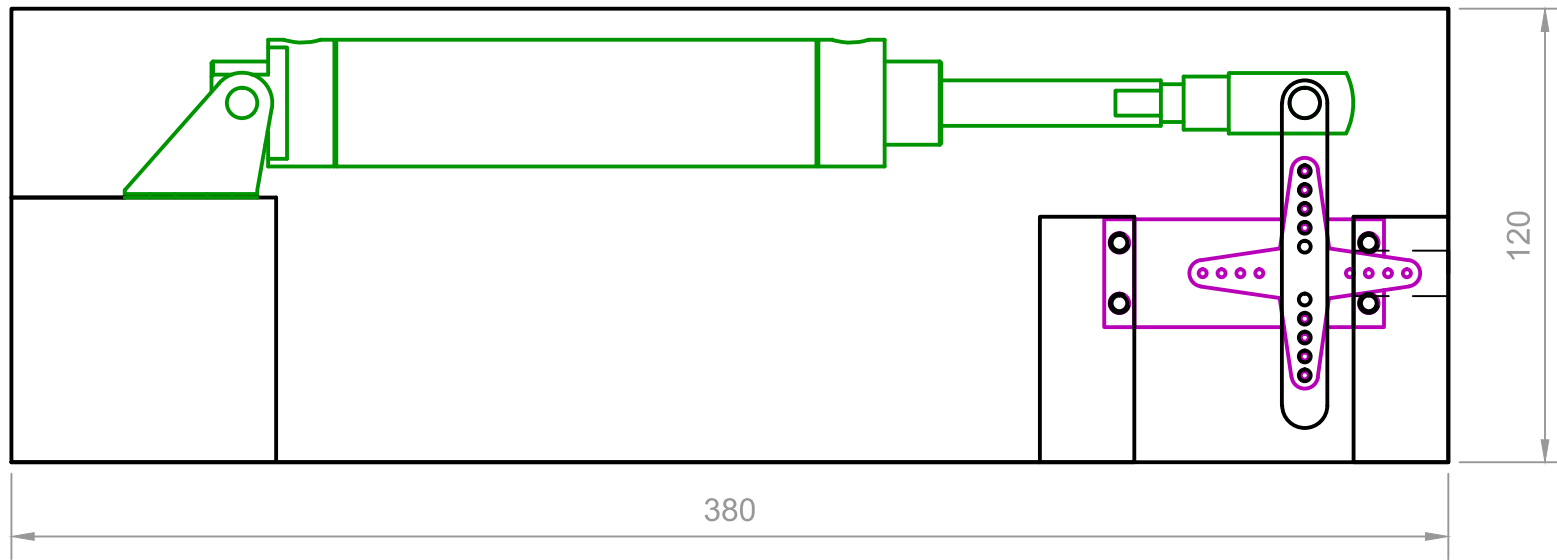
Abmessungen (LxBxH):	59 x 29 x 55 mm
Gewicht:	ca. 175 g
Getriebe:	Metall
Kugellager:	3
Mehrfachschleifer-Poti:	ja
Indirect-Drive-Poti:	ja
Drehmoment @ 4/5-Zellen*:	200/250 Ncm
Haltekraft @ 4/5-Zellen* **:	180/225 Ncm
Stellzeit für 40° @ 4/5-Zellen*:	0,12/0,10 s

* 4 bzw. 5-Zellen-Betrieb NiCd/NiMH. Daten bei 4,8/6,0 V stabilisiert

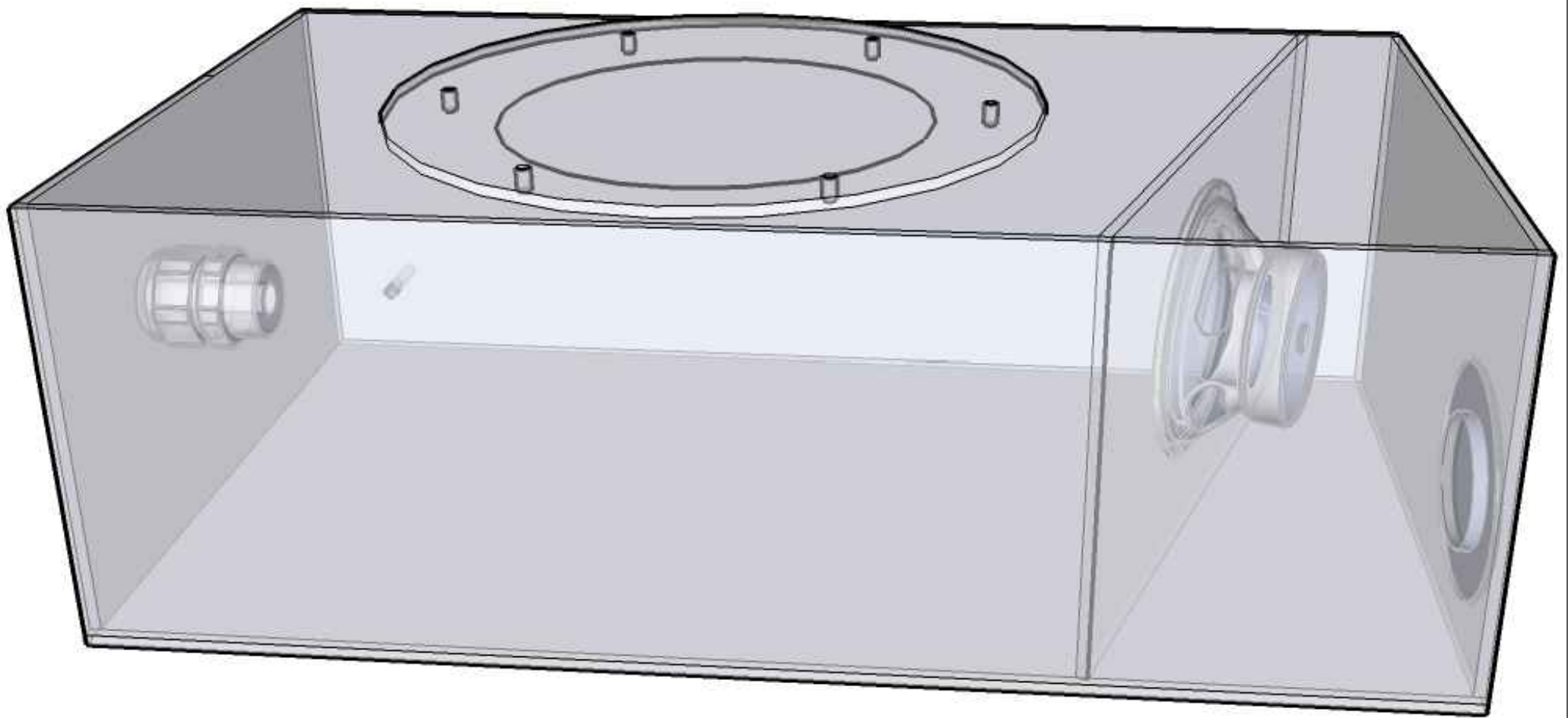
** Fehlwinkel < 5°



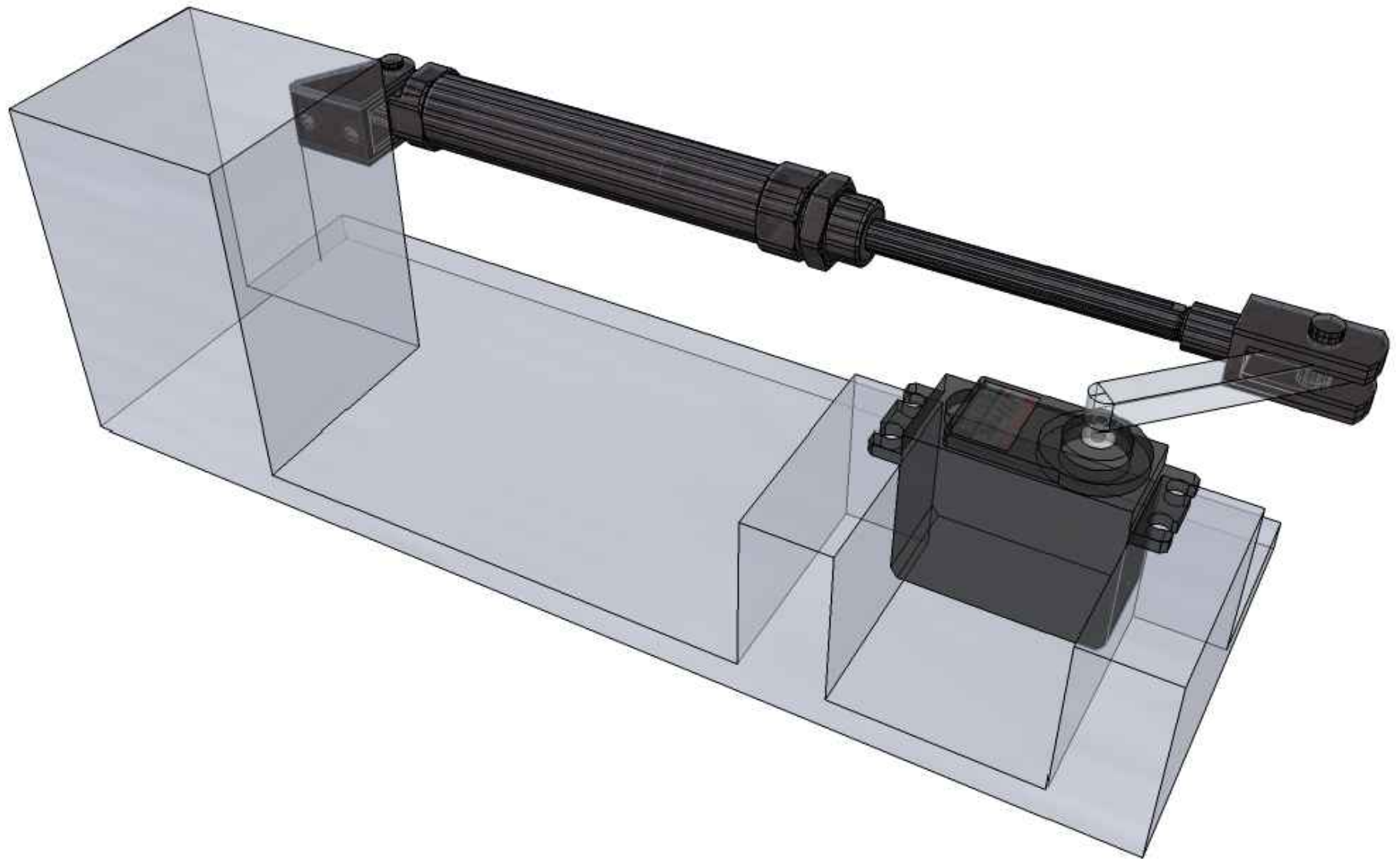
		Material: 5mm Aluminium Blech			
M. Rohmoser				Datum: 15.09.2011	M: 1:5
Joanneum Research, Graz 2011			Druckkammer 2D Zusammenstellung		
			Blatt 1/4		



	Material: Aluminium			
M. Rohmoser			Datum: 15.09.2011	M: 1:2
Joanneum Research, Graz 2011		Servopumpe 2D Zusammenstellung		
				Blatt 2/4



		Material: 5mm Aluminium Blech	
M. Rohmoser			Datum: 15.09.2011
Joanneum Research, Graz 2011	Druckkammer 3D		
			Blatt 3/4



	Material: Aluminium		
M. Rohrmoser			Datum: 15.09.2011
Joanneum Research, Graz 2011	Servopumpe 3D		
			Blatt 4/4