

# **Kalibrierung von pv-Sonden**

## **Bachelorarbeit**

durchgeführt von

**Stefan Kaiser**

**Mathias Wutti**

Institut für Signalverarbeitung und Sprachkommunikation  
der Technischen Universität Graz

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

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

Graz, im Juni 2013

## Zusammenfassung

Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, einen Einblick in die Funktionsweise und den Gebrauch eines neues Messinstruments zur direkten Messung von Schalldruck und Schallschnelle, die pv-Sonde, zu vermitteln. Dabei wird zunächst auf den Aufbau sowie die Eigenschaften der Sonde eingegangen und das Funktionsprinzip des Schnellesensors erörtert. Weiters wird die Theorie zur Schallintensitätsmessung mit dieser Sonde ausgearbeitet und mit dem standardisierten Messverfahren mittels der pp-Sonde verglichen.

Der Hauptteil der Arbeit beschäftigt sich mit den drei gängigsten Verfahren zur Kalibrierung der Sonde, die einen wesentlich größeren Aufwand im Vergleich zu pp-Sonden erfordern und unbedingt durchgeführt werden müssen. Diese Verfahren wurden mittels Müller-BBM PAK Messsoftware implementiert und anschließend anhand einer Messung miteinander verglichen.

Anschließend folgt eine Anleitung zur kalibrierten Messung mit der pv-Sonde, die es ermöglicht, ohne langwierige Einarbeitung Messungen durchzuführen. Hierbei wird auch genauer auf das PAK-Messsystem von Müller-BBM und die dazugehörige Software eingegangen.

## Abstract

The aim of this bachelor thesis is to give an overview about the pu-probe, a new instrument for direct measurement of acoustic pressure and partical velocity. First we discuss the assembly and the properties of the probe and the operational principle of the particle velocity sensor. Furthermore, theoretical aspects of sound intensity measurements are given and compared to the standardized pp-probe.

The main part focuses on three common methods for probe calibration, which are more complex than calibration of pp-probes. The methods were implemented in the Müller-BBM PAK measuring software and compared with each other in a measurement situation.

The following chapter gives instructions how calibrated measurement with the pu-probe can be started and carried out fast. It also contains information about the Müller-BBM measurement system and the software.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>pv-Sonde</b>	<b>5</b>
1.1	Microflown Schnellesensor	6
1.1.1	Funktionsprinzip	7
1.1.2	Frequenzgang	9
1.1.3	Richtcharakteristik	11
1.2	Signalaufbereitung	12
1.3	Eigenrauschen & Maximalpegel	16
1.4	Einfluss des Gehäuses	17
1.5	Empfindlichkeit auf äußere Einflüsse	18
1.6	Schallintensitätsmessung mit der pv-Sonde	19
1.6.1	Phasenfehler	19
1.6.2	Stark reaktive Schallfelder	22
1.6.3	Schallfelder mit hohem pI-Index	22
1.6.4	Einfluss der Geometrie	23
1.6.5	Bandbreite	23
1.6.6	Vergleich mit pp-Sonde	24
<b>2</b>	<b>Kalibrierung</b>	<b>25</b>
2.1	Hardwarekalibrierung	25
2.2	Softwarekalibrierung (mathematisches Modell)	27
2.2.1	Formeln	28
2.2.2	Programmierung des Modells	29
2.3	Sphärenkalibrierung	31
2.3.1	Kalibrieraufbau für mittlere und höhere Frequenzen	34
2.3.2	Kalibrieraufbau für tiefe Frequenzen	35
2.3.3	Durchführung in Matlab und PAK	36
2.3.3.1	Erstellung der Funktionen $Z(f)$ und $\alpha(f)$ in Matlab	37
2.3.3.2	Datenverarbeitung in PAK	39
2.3.3.3	Zusammensetzen der Kalibrierfunktionen in Matlab	42
2.4	Vergleich der Kalibriermethoden	44

---

<b>3</b>	<b>Messablaufsteuerung in PAK</b>	<b>47</b>
3.1	Messaufbau .....	47
3.2	PAK-Messsystem .....	48
3.3	Messdefinitionen .....	49
3.4	Grafikdefinitionen .....	53
3.5	Datenbetrachtung .....	57
3.6	Signalgenerator .....	58
3.7	Sphärenkalibrierung .....	59
3.8	Durchführen der Messung.....	62
<b>4</b>	<b>Ausblick</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>67</b>

---

# 1 pv-Sonde

Für die vollständige Beschreibung des Schalls werden der Schalldruck und die Schallschnelle benötigt. In der Messtechnik hat sich ein Verfahren etabliert, diese beiden Größen mit einer pp-Sonde, die aus zwei Druckmikrofonen besteht, zu ermitteln. Die Schallschnelle wird hierbei durch die Schalldrücke der beiden Mikrofone sowie deren Abstand angenähert. Dieses Verfahren ist seit langem standardisiert und die Kalibrierung der Druckmikrofone gestaltet sich relativ einfach. Messungen mit pp-Sonden liefern also Ergebnisse hoher Genauigkeit und Verlässlichkeit.

Seit einiger Zeit gibt es jedoch auch einen Sensor, der die Schallschnelle direkt misst und somit auch eine neue pv-Sonde, bei der das Messverfahren noch nicht so genau standardisiert ist. Aufgrund der Möglichkeit der Direktmessung der Schallschnelle liegt es jedoch nahe, pv-Sonden zu verwenden, um z.B. Schalleistungsgrößen zu messen. Diese Sonden bestehen aus einem Schnellesensor, kombiniert mit einem Drucksensor.

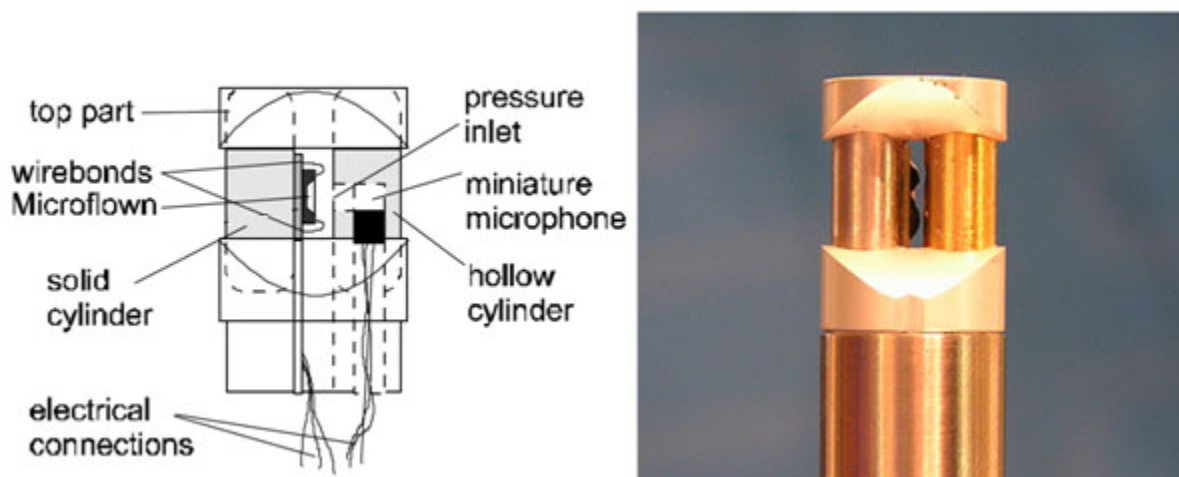


Abb. 1.1: Microflow 1/2"-pv-Sonde [MICROFLOWN 3, S. 21]

## 1.1 Microflown Schnellesensor

Der Microflown Schnellesensor wurde 1994 erfunden, als man bemerkte, dass Luftmassensensoren nach dem Prinzip eines Hitzedrahtanemometers auch die Schallschnelle im für das Hörempfinden relevanten Frequenzbereich messen können. 1998 wurde die Firma Microflown gegründet, die den gleichnamigen Schnellesensor und pv-Sonden bis heute weiterentwickelt.

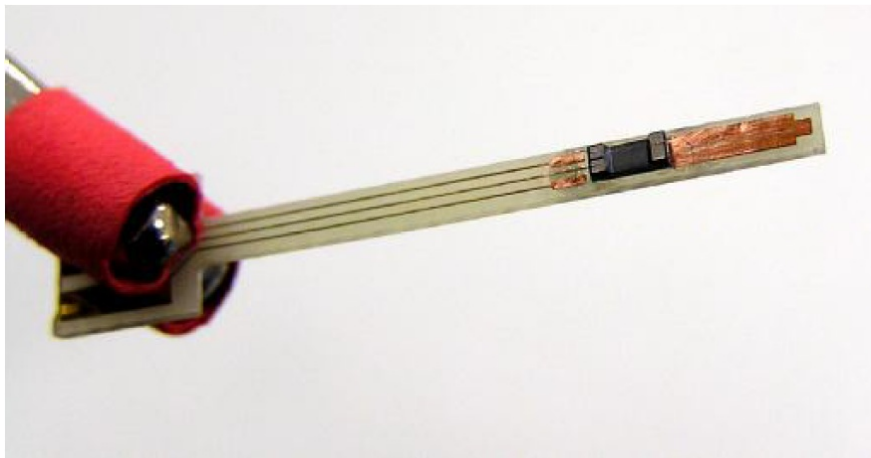


Abb. 1.2: Microflown Schnellesensor [MICROFLOWN 1, S. 5]

Der erste Schallschnellesensor hatte einen sehr schlechten Signal/Rauschabstand und eine sehr kleine Bandbreite, was jedoch über die Jahre der Forschung und Entwicklung verbessert wurde. Heutzutage ist der Signal/Rauschabstand mit dem eines hochwertigen Druckmikrofons vergleichbar. Moderne Microflown Schnellesensoren halten einem Schallschnellepegel von 128dB und spezielle Produkte sogar bis zu 170dB stand und sind auch von der Robustheit mit klassischen Mikrofonen vergleichbar.

### 1.1.1 Funktionsprinzip

Abb. 1.3 zeigt einen Bridge-type Schnellesensor. Die Legende links unten ( $200\mu\text{m}$ ) zeigt, wie klein die Abmessungen der Hitzedrähte sind. Der gesamte Sensor ist  $1\text{mm}$  breit,  $2\text{mm}$  lang und  $300\mu\text{m}$  dick. Die Drähte selbst sind  $200\text{nm}$  dünn und  $10\mu\text{m}$  breit, wodurch sich eine ovale Querschnittsform ergibt.

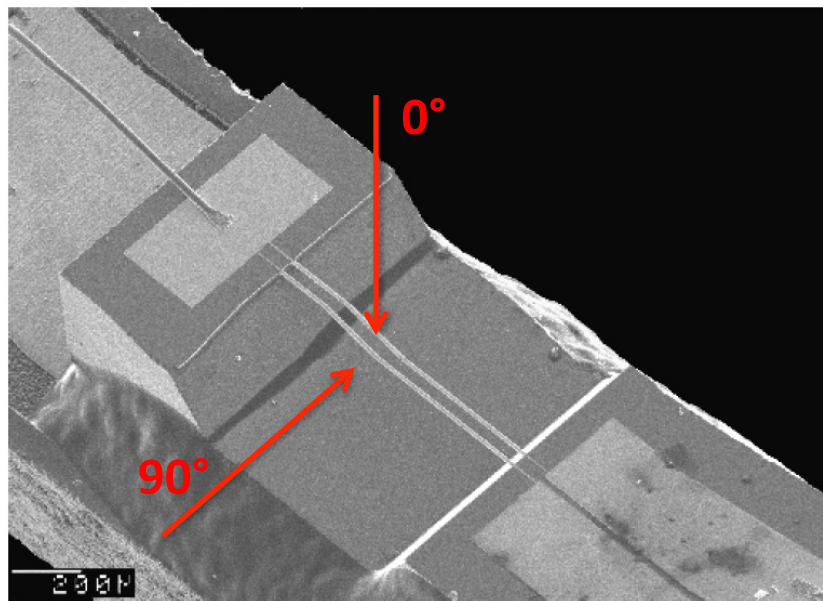


Abb. 1.3: Bridge-type Schnellesensor [MICROFLOWN 1, S. 4]

Der Schnellesensor ist ein akustischer Sensor, der anstatt des Schalldrucks die Schallschnelle misst. Die Arbeitsweise des Sensors ist analog zum klassischen Hitzedrahtanemometer, wobei hier die Schallschnelle mithilfe von zwei Hitzedrähten detektiert wird (beim klassischen Verfahren nur ein Draht pro Strömungsrichtung). Die zwei nahe aneinander liegenden, dünnen, auf circa  $200^\circ - 400^\circ$  Celsius erhitzten Titandrähte werden durch die Bewegung der Luftteilchen abgekühlt. Titan reagiert auf eine Temperaturänderung mit einer Änderung des elektrischen Widerstands. Bei aus  $90^\circ$ -Richtung einfallendem Schall (siehe Abb. 1.3) kühlt der Draht, den die Schallschnelle zuerst erreicht, stärker ab, als der zweite. Dadurch entsteht eine Widerstandsdifferenz, die proportional zur Schallschnelle ist.

Um den Einfluss der Schallschnelle auf die Temperaturänderung der Hitzedrähte zu verdeutlichen, betrachte man zuerst einen einzelnen Draht.

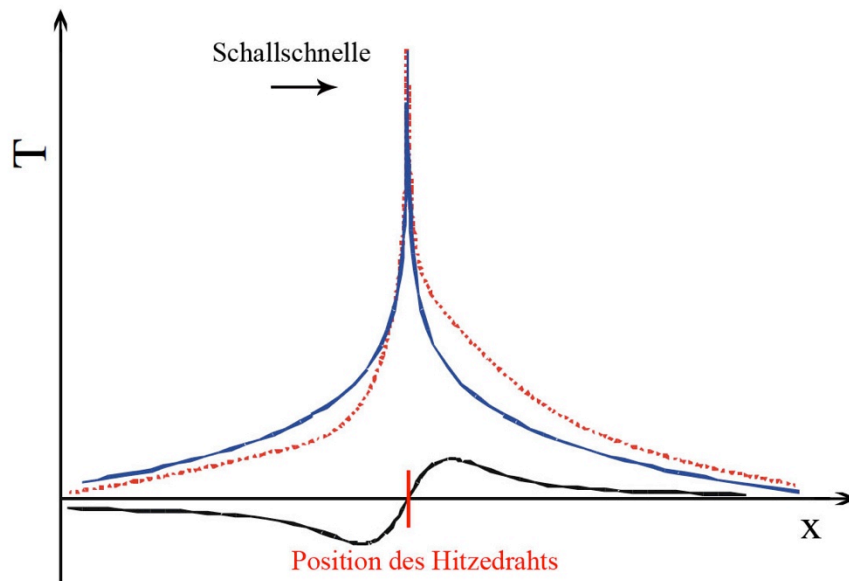


Abb. 1.4: Temperaturverlauf bei einem Hitzedraht [MICROFLOWN 3, S.5]

In Abb. 1.4 ist die Temperaturverteilung rund um einen Hitzedraht zu sehen. Die blaue Kurve zeigt die Verteilung ohne Schalleinfluss, die gepunktete rote Kurve jene bei Vorhandensein von Schall und die schwarze die Differenz der beiden. Man sieht, dass die Schallschnelle den Temperaturverlauf verzerrt und die Kurve nicht mehr symmetrisch um den Draht verläuft. Die Schallschnelle bewirkt, dass die bewegten Luftteilchen bis zur Position des Hitzedrahtes Wärme aufnehmen und diese in x-Richtung weitertragen, wodurch die gezeigte Hitzedifferenz im Bereich des Drahtes entsteht.

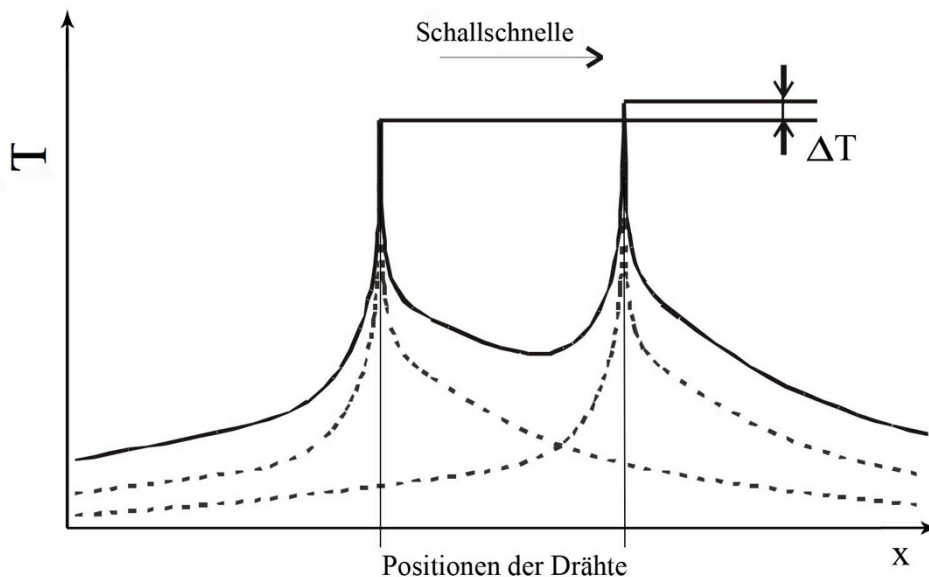


Abb. 1.5: Temperaturverlauf bei zwei Hitzedrähten [MICROFLOWN 3, S.6]

Abb. 1.5 zeigt die Hitzeverteilung rund um zwei Hitzedrähte bei vorhandener Schallschnelle. Die gepunkteten Kurven entsprechen den Temperaturverläufen der einzelnen Drähte



(vgl. Abb. 1.4) und die durchgezogene Kurve der Superposition der beiden. Der Schalleinfall erfolgt in diesem Fall aus  $90^\circ$ -Richtung (vgl. Abb. 1.3).

Wie man in dem Diagramm erkennen kann, ergibt sich eine Temperaturdifferenz  $\Delta T$  zwischen den beiden Hitzedrähten, die dadurch zustande kommt, dass die Luftteilchen beim ersten Draht Wärme aufnehmen und diesen dadurch abkühlen. Ein Teil der Wärme wird zum zweiten Draht mitgeführt, wodurch dieser weniger abgekühlt wird.

Es sind zwei Arten des Hitzetransports wesentlich:

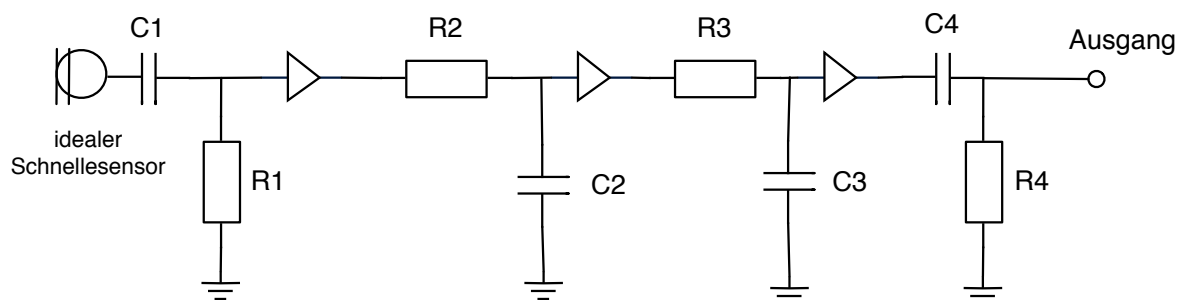
1. Konvektion (Mitführen der thermischen Energie durch eine Strömung)
2. Diffusion (ungerichtete Zufallsbewegung der Teilchen aufgrund der thermischen Energie)

Der Abstand der Drähte spielt eine große Rolle für die Funktionsweise des Sensors. Bei zu großem Abstand erreicht der Hitzeausaustausch durch Konvektion den zweiten Draht nicht, wodurch beide Drähte die selbe Temperatur aufweisen. Bei zu kleiner Wahl des Abstandes wird ebenso keine Temperaturdifferenz auftreten, da die Hitzediffusion dieser entgegenwirkt.

## 1.1.2 Frequenzgang

Der Microflown Schnellesensor ist auf Schallschnellen mit der Frequenz von 50Hz-10kHz optimiert, jedoch ist der Frequenzgang nicht linear. Abb. 1.7 zeigt den Amplituden- und Phasengang des Schnellesensors. Zu tiefen Frequenzen nimmt die Empfindlichkeit um 6dB/Oktave ab, was auf das Verhalten der thermalen Grenzschicht der Drähte (die Schicht, an der der Hitzeausaustausch zwischen der Oberfläche der Drähte und der Luft vollzogen wird) zurückgeführt wird. Bei ca. 250Hz besitzt die Empfindlichkeit ein Maximum. Ab dieser Frequenz nimmt sie um 6dB/Oktave ab, was auf Hitzediffusion zurückgeführt wird, die vom Abstand der beiden Drähte zueinander abhängt. Ab ca. 8kHz nimmt die Empfindlichkeit des Schnellesensors wegen der nicht zu vernachlässigbaren Hitzekapazität der Drähte um zusätzliche 6dB/Oktave ab.

Das Verhalten des Sensors im Frequenzbereich kann man durch ein elektrisches Netzwerk folgendermaßen abbilden:



**Abb. 1.6:** elektrisches Modell des frequenzabhängigen Verhaltens des Schnellesensors

Das erste RC-Glied stellt einen Hochpass dar und repräsentiert das Verhalten der thermalen Grenzschicht der Drähte, mit einer 3dB-Grenzfrequenz von circa 100Hz ( $f_1$ ). Das zweite und dritte RC-Glied sind Tiefpässe erster Ordnung. Das zweite Glied stellt die Hitzediffusion, und das dritte die Hitzekapazität dar. Die Grenzfrequenz liegt hier für das zweite Glied bei circa 1kHz ( $f_2$ ). Für das dritte Glied ( $f_3$ ) können sich je nach Sonde stark unterschiedliche Werte

ergeben (laut Microflown 8-20kHz, bei der für die Arbeit verwendeten Sonde 100kHz laut Datenblatt). Das vierte Glied berücksichtigt ein Windschutzgitter (bei einigen pv-Sonden integriert) und ist als Hochpass erster Ordnung mit einer Grenzfrequenz von ca. 70Hz ausgeführt ( $f_4$ ).

Das Frequenzverhalten kann nun wie folgt beschrieben werden:

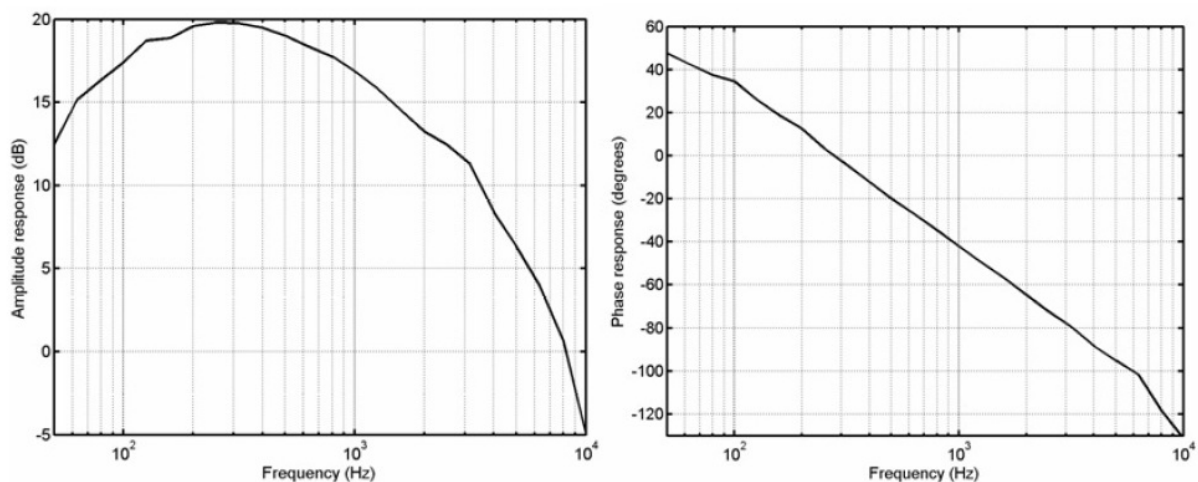
$$magnitudo = \frac{LFS}{\sqrt{1 + \frac{f_1^2}{f^2}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{f_2^2}} \sqrt{1 + \frac{f^2}{f_3^2}} \sqrt{1 + \frac{f_4^2}{f^2}}}$$

$$phase = \arctan \frac{C_1}{f} - \arctan \frac{f}{C_2} - \arctan \frac{f}{C_3} + \arctan \frac{C_4}{f}$$

LFS (Low frequency sensitivity) ist die Empfindlichkeit des Schnellesensors bei 250Hz. Diese Frequenz wird aus praktischen Gründen gewählt, da die Empfindlichkeit des Sensors, wie oben beschrieben, zu tieferen sowie höheren Frequenzen abfällt. In der Literatur wird die Empfindlichkeit des Schnellesensors häufig (anstatt mV/(m/s)) in mV/Pa\* angegeben, wobei

$$1Pa^* \triangleq \frac{1Pa}{\rho c}$$

Die Grenzfrequenzen für den Amplitudengang ( $f_1, f_2, f_3, f_4$ ) und den Phasengang ( $C_1, C_2, C_3, C_4$ ) sind Konstanten und werden bei der Kalibrierung festgelegt (siehe Kapitel 2).



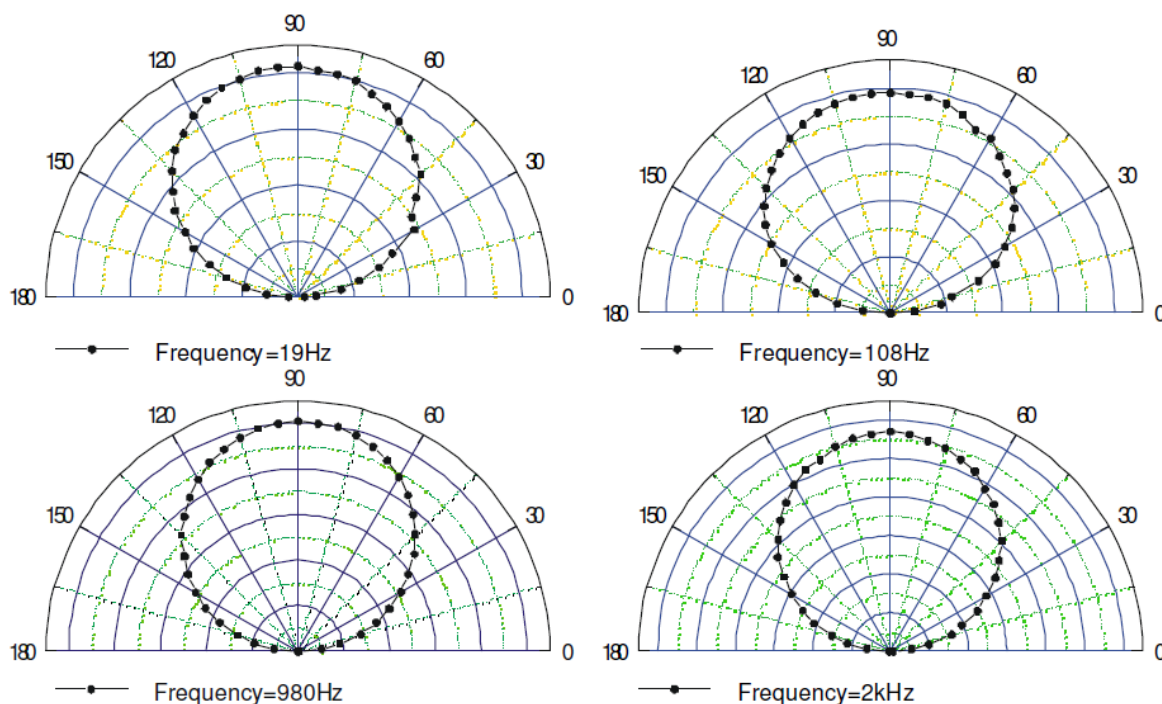
**Abb. 1.7:** Gemessener Frequenzgang eines 1/2“ Microflown Schnellesensors [MICROFLOWN 3, S. 13]

### 1.1.3 Richtcharakteristik

Wie in Kapitel 0 beschrieben, misst der Schnellesensor die Widerstandsdifferenz zweier Titandrähte, die durch Temperaturunterschiede der Drähte zustande kommt. Die Temperaturdifferenz der Drähte ist richtungsabhängig, da für das Funktionsprinzip die Wärmeströmung (Konvektion) zwischen den Drähten auftreten muss: Trifft die Schallschnelle in 90°-Richtung (vgl. Abb. 1.3) auf beide Drähte auf, ist die Differenz maximal, da die Luftteilchen dem ersten Draht Wärme entziehen und die Wärme zum zweiten Draht transportieren, der sich dadurch weniger abkühlt als der erste. Eine Veränderung der Schalleinfallrichtung bewirkt gleichzeitig eine Änderung der Richtung der Wärmeströmung, die dadurch nicht mehr ausschließlich zwischen den Drähten verläuft.

In 0°-Richtung kommt es zu keiner Temperaturdifferenz, da der Schall beide Drähte gleichzeitig erreicht und somit das beschriebene Funktionsprinzip nicht mehr wirksam ist (keine Konvektion zwischen den Drähten!).

Der Schnellesensor besitzt also die Richtcharakteristik einer Acht. Diese bleibt für alle Frequenzen annähernd gleich und der Schallschnellepegel wird in 0°-Richtung um bis zu 50dB unterdrückt. Folgende Abbildung veranschaulicht die Richtcharakteristik des Schnellesensors:



**Abb. 1.8:** Richtcharakteristik des Schnellesensors bei verschiedenen Frequenzen [MICROFLOWN 3, S. 17]

## 1.2 Signalaufbereitung



Abb. 1.9: Signalaufbereiter MFSC-2

Zu jeder Microflow Technologies Schnellesonde wird ein zugehöriger Signalaufbereiter mitgeliefert, der mehrere Funktionen erfüllt:

- Spannungsversorgung für den Schnellesensor (18V DC)
- Vorverstärkung der Signale (High/Low-Gain Modi)
- Möglichkeit zum Ausgleich des Frequenzgangs zur Messung ohne zusätzlichen Kalibrieraufwand (EQ)

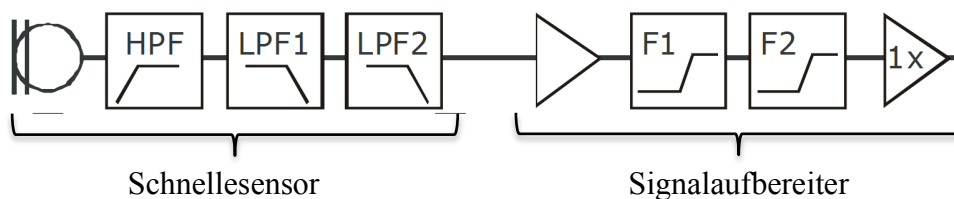


Abb. 1.10: Blockschaltbild des Schnellesensors mit Signalaufbereiter [MICROFLOWN 3, S.10]

### Das Blockschaltbild in

Abb. 1.10 zeigt die Funktion des Signalaufbereiters, der aus einem Vorverstärker, einem dem Frequenzgang des Schnellesensors inversen Filter (F1 & F2) und einem Ausgang mit niedriger Impedanz besteht. Der Einfluss des Windschutzgitters wurde hierbei nicht berücksichtigt.

## Entzerrung des Frequenzganges

Die im Signalaufbereiter integrierte Equalizer-Schaltung bietet die einfachste Möglichkeit der kalibrierten Messung. Dazu wurden die inversen Filter von der Firma Microflown bestimmt und damit und damit der EQ des Signalaufbereiters entsprechend auf die zugehörige pv-Sonde abgestimmt. Der abgestimmte. Der entzerrte Frequenzgang des Schnellesensors ist trotzdem nicht komplett linear, da dem linear, da dem Hochpassfilter in

Abb. 1.10 kein inverses Filter nachgeschaltet wird. Microflown gibt dazu an, dass dieser Effekt gewollt ist, um die Empfindlichkeit auf Wind und ähnliche ungewollte tieffrequente Einstreuungen nicht zu erhöhen.

Das Signal des Drucksensors wird vom Signalaufbereiter nicht beeinflusst, es ergibt sich somit eine Phasendifferenz zwischen den beiden Kanälen, was die Messgenauigkeit verschlechtern kann. Darauf wird näher in Kapitel 1.6.1 eingegangen.

Der Amplitudengang des Schnellesensors nach der Signalaufbereitung ist

$$magnitude = \frac{LFS}{\sqrt{1 + \frac{f_1^2}{f^2}}}$$

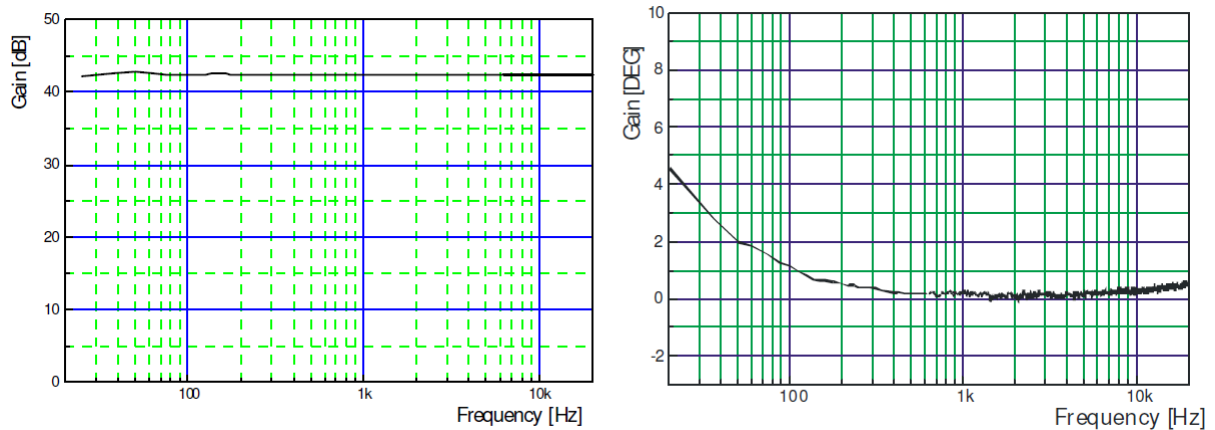
und der Phasengang

$$phase = \arctan \frac{C_1}{f_1} .$$

Falls es die Möglichkeit zur Software-Kalibrierung gibt (vgl. Kapitel 2), kann die Funktion durch den EQ-Schalter deaktiviert werden. Durch diese Kalibrierungs-Form kann der Frequenzgang komplett linearisiert werden.

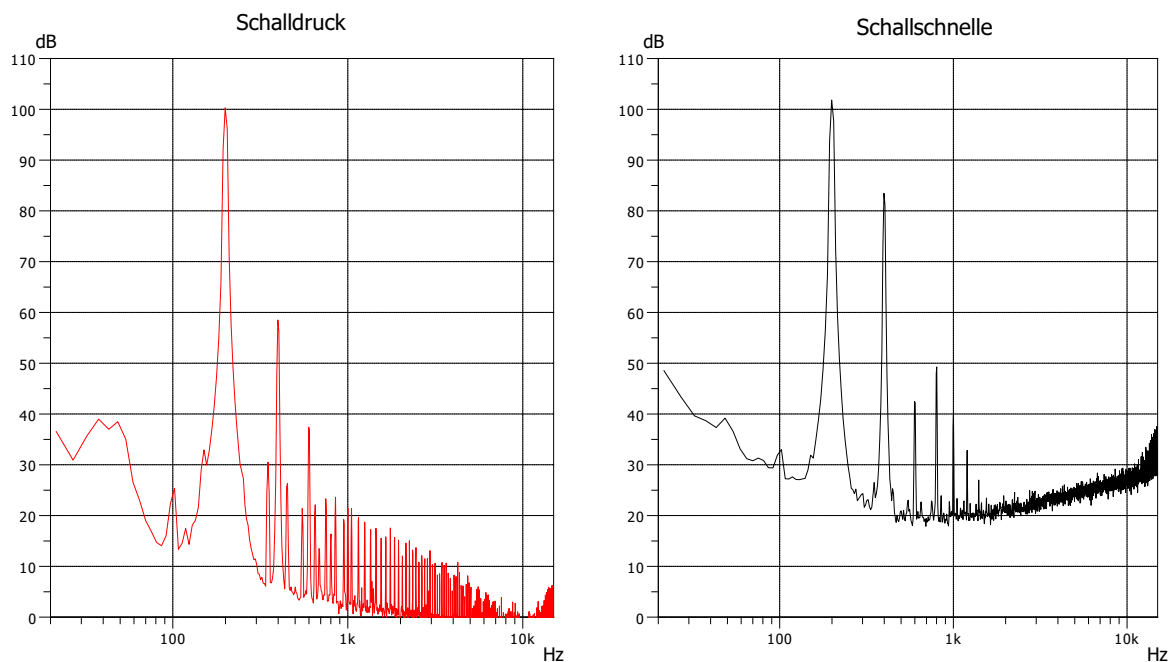
## Vorverstärkung

Der Signalaufbereiter bietet die Wahl von zwei verschiedenen Verstärkungsstufen. Die standardmäßige Einstellung "High" verstärkt das Schnelle-Signal um +42dB über den gesamten Frequenzbereich (siehe Abb. 1.11).



**Abb. 1.11:** Verstärkung des Signalaufbereiters bei Schalterstellung "High"  
[MICROFLOWN 3, S. 12]

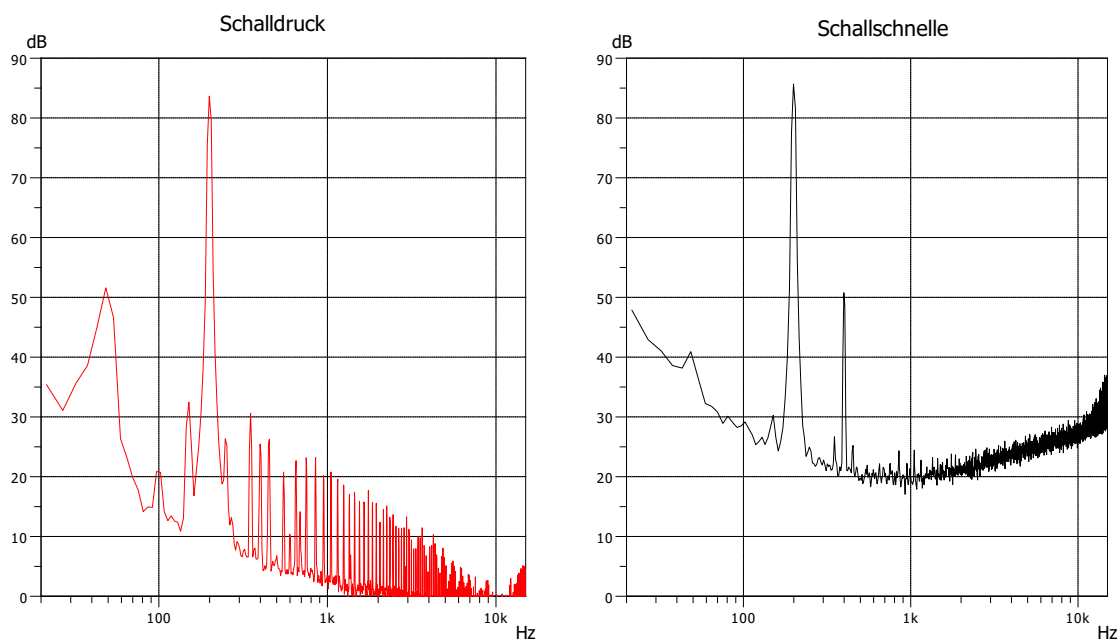
Die Einstellung "Low" ist für Messsignale mit hohem Pegel gedacht, laut Microflown soll sie verwendet werden, wenn die Overload-LED neben dem Signalausgang aufleuchtet. Um dies zu quantifizieren, wurden einige Messungen getätigt, ab welchen Pegeln dies eintritt. Als Schallquelle wurde hierfür ein Genelec 1030a Studiolautsprecher gewählt und die Sonde im Abstand von 15cm aufgestellt. Als Eingangssignal wurde ein 200Hz-Sinuston verwendet.



**Abb. 1.12:** Maximalpegel von Druck (links) und Schnelle (rechts) bei Schalterstellung "High"

Abb. 1.12 zeigt den Maximalpegel bei hoher Verstärkung (Schalterstellung "High"), der ohne Aufleuchten der Overload-LED erreicht wurde. Hier erkennt man deutlich vor allem bei der Schallschnelle, die schon sehr stark ausgeprägten harmonischen Verzerrungen, die auf Übersteuern hindeuten.

Senkt man den Eingangspegel aber rund 15dB ab, nehmen die harmonischen Verzerrungen stark ab, was in folgender Abbildung zu sehen ist:



**Abb. 1.13:** Druck (links) und Schnelle (rechts) bei Schalterstellung "High" und geringerem Schalldruckpegel

Die selben Messungen wurden auch mit Schalterstellung "Low" durchgeführt, es konnten jedoch keinerlei Unterschiede festgestellt werden. Daher sind wir der Annahme, dass der Gain-Schalter unseres Signalaufbereiters keine Funktion besitzt.

Aufgrund dieser Messergebnisse und Erkenntnisse schlagen wir vor, immer die Gain-Einstellung "High" einzustellen und die pv-Sonde generell nur für Pegel bis ca. 90dB zu verwenden.

### 1.3 Eigenrauschen & Maximalpegel

Abb. 1.14 vergleicht das Eigenrauschen der pv-Sonde mit dem einer B&K pp-Sonde mit 12mm Abstandhalter. Die durchgezogene schwarze und die grüne Kurve entsprechen dem v- und p-Kanal der pv-Sonde. Die strichlierte rote und die punktierte hellrote Kurve sind beinahe identisch und entsprechen den zwei Drucksensoren der pp-Sonde. Die daraus berechnete Schallschnelle wird in der strichlierten schwarzen Kurve dargestellt.

Man sieht, dass das Eigenrauschen des Schnellesensors und auch jenes des Microflowm Drucksensors stärker ausgeprägt ist, als das der einzelnen B&K Drucksensoren. Das Eigenrauschen der aus den B&K pp-Kanälen berechneten Schallschnelle ist jedoch bei Frequenzen unter 2kHz deutlich höher als das des Microflowm Schnellesensors.

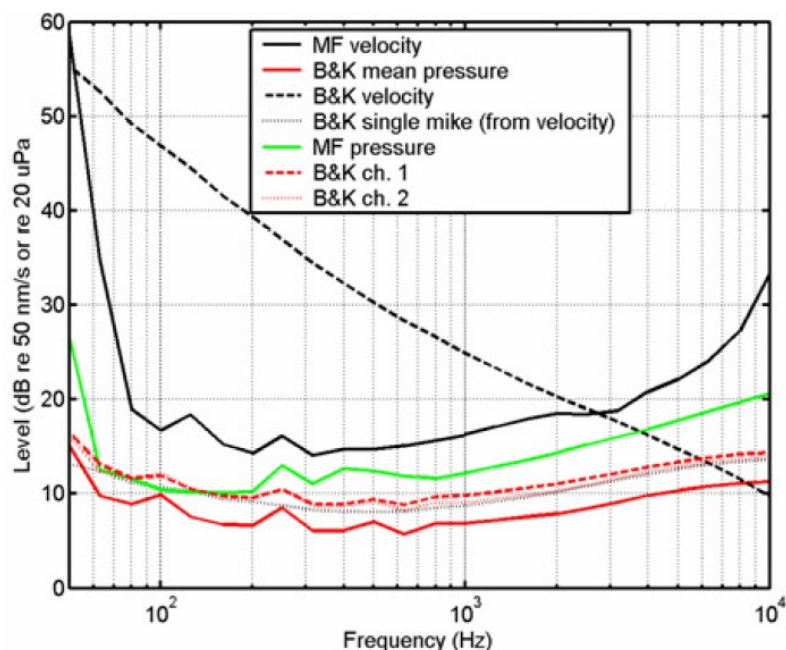
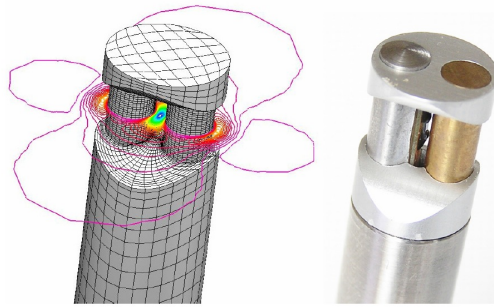


Abb. 1.14: Eigenrauschen der pv-Sonde und der B&K 4181 pp-Sonde [MICROFLOWN 3, S. 19]

Der Maximalpegel einer Microflowm pv-Sonde wurde in einem Messrohr ermittelt. Bei einem Pegel von 128dB wurde ein Klirrfaktor von 10% gemessen. Da das Gehäuse eine Verstärkung des Schnellepegels um ca. 10dB (siehe Kapitel 1.4) bewirkt, wird von der Firma Microflowm angenommen, dass der Schnellesensor bei einem Pegel von 138dB einen Klirrfaktor von 10% besitzt.

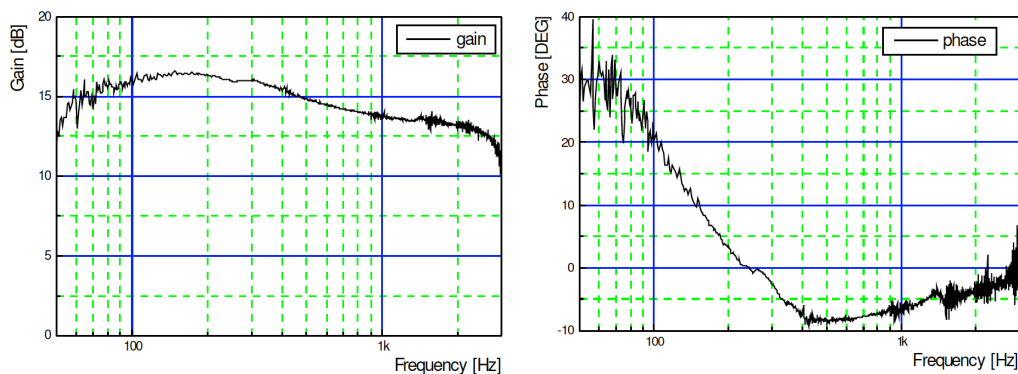


## 1.4 Einfluss des Gehäuses



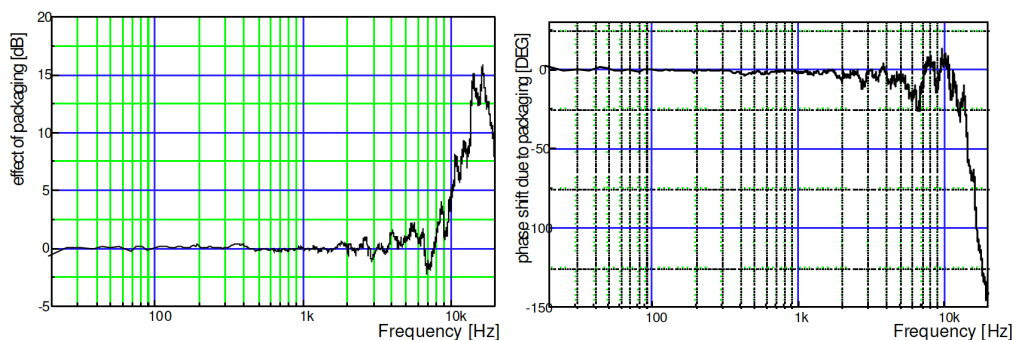
**Abb. 1.15:** Einfluss des Gehäuses [MICROFLOWN 3, S. 21]

In Kapitel 0 zeigt Abb. 1.3 die winzigen, ohne Mikroskop nicht mehr sichtbaren Abmessungen der Hitzedrähte des Schnellesensors. Dementsprechend sensibel sind die Drähte auch, müssen vor Beschädigungen geschützt und in ein Gehäuse eingebaut werden. Dieses Gehäuse bewirkt aber auch eine Verstärkung der Schallschnelle. Dies wird darauf zurückgeführt, dass das Gehäuse wie ein einengender Kanal wirkt, in den die Schallschnelle hineingezwungen wird. Die Verstärkung beträgt frequenzabhängig zwischen +10dB und +17dB.



**Abb. 1.16:** Einfluss des Gehäuses auf den Schnellesensor über der Frequenz [MICROFLOWN 3, S. 21]

Das Gehäuse beeinflusst auch den Drucksensor, jedoch nur bei Frequenzen ab ca. 10kHz (siehe Abb. 1.17). Bei diesen wirkt es als reflektierende Oberfläche und daher kann es auch hier zu einer Verstärkung von +15dB kommen. Für tiefe Frequenzen des Schalldrucks hat das Gehäuse keinen Einfluss.

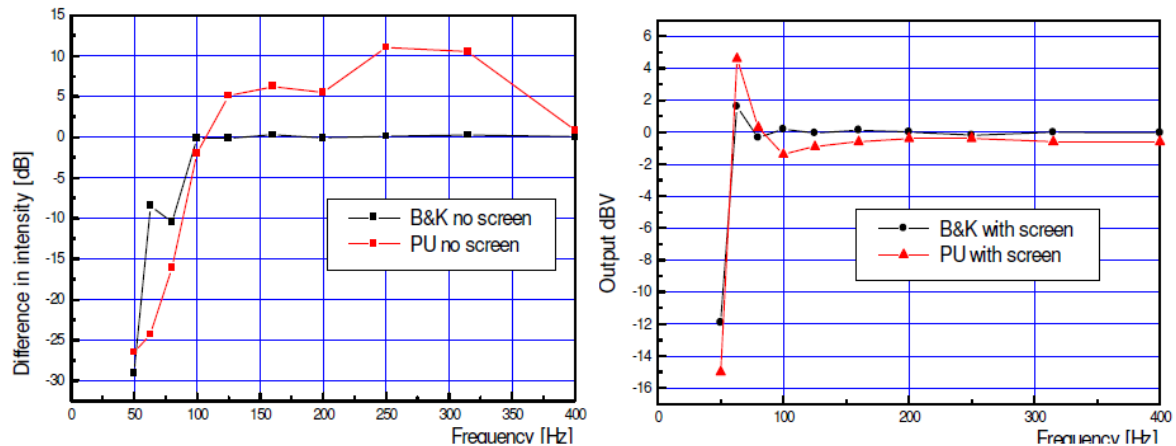


**Abb. 1.17:** Einfluss des Gehäuses auf den Drucksensor über der Frequenz [MICROFLOWN 3, S. 22]

## 1.5 Empfindlichkeit auf äußere Einflüsse

Die Firma Microflown hat Messungen zur Bestimmung der Empfindlichkeit der pv-Sonde auf äußere Einflüsse gemacht. Die Messungen wurden dabei jeweils im Kundtschen Rohr vollzogen. Die Ergebnisse der Messungen werden in den folgenden Graphen veranschaulicht.

### Einfluss von Wind



**Abb. 1.18:** Messung der Schallintensität mit einer Microflown pv-Sonde und einer B&K pp-Sonde bei Einfluss von Wind (3,4m/s), mit und ohne Windschutzkappe [MICROFLOWN 15, S. 12]

Wie man Abb. 1.18 (links) entnehmen kann, ist der Einfluss von Wind auf die pv-Sonde nicht vernachlässigbar. Dem kann man entgegenwirken, indem man eine Windschutzkappe verwendet (rechts). Bei Windstärken bis 2m/s reicht das bei einigen pv-Sonden-Typen integrierte Windschutzgitter, bei höheren Windstärken können übliche für Druckmikrofone gebräuliche Ausführungen verwendet werden.

### Einfluss von Temperaturänderungen

Der Einfluss von Temperaturänderungen auf Druck- und Schnellesensor der pv-Sonde bei Frequenzen von 20Hz bis 4kHz ist mit einer Änderung der Empfindlichkeit von 0.02dB/K gering. Die Messungen wurden dabei im Messrohr bei Temperaturen von 25°C-73°C durchgeführt.

### Einfluss von Gleichdruckänderungen

Die Empfindlichkeit der pv-Sonde ändert sich bei Gleichdruckänderungen (von 0.82-1.1bar) im Frequenzbereich von 20Hz bis 4kHz um weniger als 0,5dB.

### Einfluss von Luftfeuchtigkeitsänderungen

Bei Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit (von 20%-90%) ändert sich die Empfindlichkeit des Drucksensors um weniger als 3,5dB und die des Schnellesensors um weniger als 0,2dB.

## 1.6 Schallintensitätsmessung mit der pv-Sonde

Die pv-Sonde stellt eine Kombination eines Drucksensors und eines Schnellesensors dar. Diese beiden von Grund auf verschiedenen Sensoren in einem Gehäuse verbaut, erlauben es, den Schalldruck und die Schallschnelle am selben Ort zu messen. Da mit diesen beiden Größen der Schall als physikalisches Ereignis vollständig beschrieben ist, ist es möglich, alle anderen Schallgrößen an diesem Ort (z.B. die Schallfeldimpedanz oder die Intensität) daraus abzuleiten.

Ein großes Gebiet in der akustischen Messtechnik stellt die Leistungs- und Intensitätsmessung dar. Hier bietet die pv-Sonde eine Alternative zur klassischen und bewährten Methode mit der pp-Sonde. Die relativ neue Messsonde von Microflown besitzt markante Eigenschaften, die sie von pp-Sonden unterscheidet, sowie eine Reihe von Vor- und Nachteilen im Vergleich zur klassischen Methode, die hier diskutiert werden.

### 1.6.1 Phasenfehler

Zunächst wird das Verhalten der Sonde diskutiert, das sie bei Auftreten von Phasendifferenzen aufweist. Diese können auf zwei verschiedene Arten in Erscheinung treten:

- Durch einen Phasenfehler in der Elektronik zwischen den beiden Messkanälen von  $p$  und  $v \rightarrow \varphi_{error}$
- Durch Phasendifferenz zwischen Druck und Schnelle im zu messenden Schallfeld  $\rightarrow \varphi_{field}$

Da die Phasendifferenz zwischen Druck und Schnelle im Fernfeld gegen Null geht, hat  $\varphi_{field}$  nur im Nahfeld einen Einfluss.

Um den Einfluss der Phasendifferenzen zeigen zu können, wird zuerst die Schallintensität mathematisch genauer behandelt. Diese berechnet sich aus dem Produkt der Momentanwerte von Schalldruck und Schallschnelle, die zeitlich gemittelt werden.  $v_r(t)$  beschreibt dabei die Richtungskomponente der Schallschnelle, die von der pv-Sonde gemessen wird.

$$I_r = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} p(t) \cdot v_r(t) dt \quad (1.1)$$

Nimmt man nun an, dass  $p(t) = \hat{p} \cdot \cos(\omega t)$  und  $v_r(t) = \hat{v} \cdot \cos(\omega t + \varphi_{field})$ , folgt daraus:

$$\begin{aligned} I_r &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} \hat{p} \cdot \hat{v} \cdot \cos(\omega t) \cdot \cos(\omega t + \varphi_{field}) dt \\ I_r &= \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\hat{p} \cdot \hat{v}}{2T} \int_{-T/2}^{T/2} [\cos \varphi_{field} + \cos(2\omega t + \varphi_{field})] dt \\ I_r &= \frac{1}{2} \hat{p} \cdot \hat{v} \cdot \cos \varphi_{field} + \underbrace{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{\hat{p} \cdot \hat{v}}{2T} \int_{-T/2}^{T/2} \cos(2\omega t + \varphi_{field}) dt}_0 \end{aligned}$$

$$I_r = \frac{1}{2} \hat{p} \cdot \hat{v} \cdot \cos \varphi_{field} \quad (1.2)$$

Aus Formel (1.2) ist ersichtlich, dass die (Wirk-)Intensität  $I_r$  bei  $\varphi_{field} = 0$  ein Maximum besitzt, mit steigendem  $\varphi_{field} < 90^\circ$  sinkt  $I_r$ , obwohl die Amplituden von Schalldruck und Schallschnelle gleich bleiben. Bei  $\varphi_{field} = 90^\circ$  wird  $I_r$  zu 0. Da Druck und Schnelle aber ungleich 0 sind, wird eine Blindintensität  $J_r$  eingeführt, um das Schallfeld zur Gänze beschreiben zu können.

$$J_r = \frac{1}{2} \hat{p} \cdot \hat{v} \cdot \sin \varphi_{field} \quad (1.3)$$

Diese hat ihr Maximum bei  $\varphi_{field} = 90^\circ$  und wird bei  $\varphi_{field} = 0^\circ$  zu Null.

Die komplexe Darstellung der Intensität wird demnach beschrieben durch:

$$\underline{I} = I_r + j J_r = \operatorname{Re}\{\underline{p} \cdot \underline{v}^*\} + j \operatorname{Im}\{\underline{p} \cdot \underline{v}^*\} \quad (1.4)$$

Außerdem kommt es bei der Messung mit der pv-Sonde zu einem Phasenfehler  $\varphi_{error}$  (unterschiedliche Sensortypen, Messwege...), wodurch die gemessene Intensität  $I_{meas}$  von der tatsächlichen Wirkintensität  $I_r$  abweicht. Im folgenden Zeigerdiagramm ist der eben beschriebene Zusammenhang bildlich dargestellt.

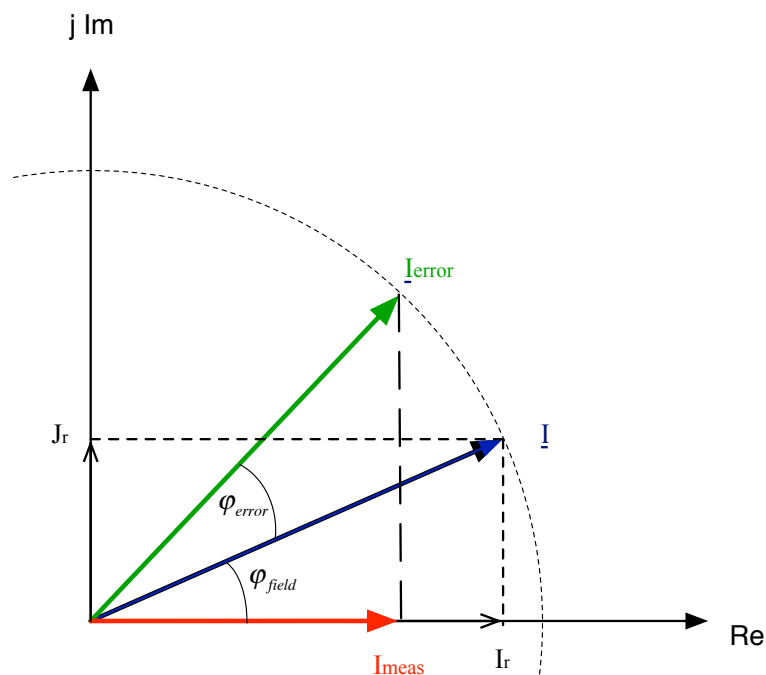


Abb. 1.19: Zeigerdiagramm für Intensitäten

Mathematisch besteht zwischen  $\underline{I}$  und  $\underline{I}_{error}$  folgender Zusammenhang:

$$\underline{I}_{error} = \underline{I} \cdot e^{j\varphi_{error}} \quad (1.5)$$

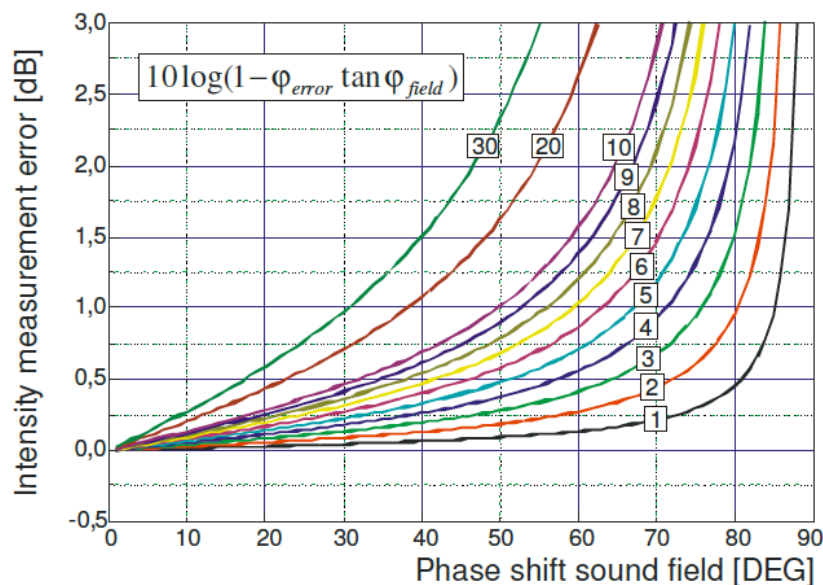
Die von der pv-Sonde gemessene Intensität  $I_{meas}$  ist letztendlich der Realteil davon:

$$\begin{aligned}
 I_{meas} &= \operatorname{Re}\{ \underline{I}_{error} \} \\
 I_{meas} &= \operatorname{Re}\{ \underline{I} \cdot e^{j\varphi_{error}} \} = \operatorname{Re}\{ (I_r + jJ_r)(\cos\varphi_{error} + j\sin\varphi_{error}) \} \\
 I_{meas} &= \operatorname{Re}\{ I_r \cos\varphi_{error} - J_r \sin\varphi_{error} + j(I_r \sin\varphi_{error} + J_r \cos\varphi_{error}) \} \\
 I_{meas} &= I_r \cos\varphi_{error} - J_r \sin\varphi_{error}
 \end{aligned} \tag{1.6}$$

Für kleine Winkel  $\varphi_{error}$  gilt:

$$I_{meas} \cong I_r \left( \underbrace{\cos\varphi_{error}}_1 - \frac{J_r}{I_r} \underbrace{\sin\varphi_{error}}_{\varphi_{error}} \right) = I_r \left( 1 - \varphi_{error} \frac{J_r}{I_r} \right) = I_r (1 - \varphi_{error} \tan\varphi_{field}) \tag{1.7}$$

Hiermit ist ein klarer Zusammenhang zwischen der tatsächlichen Wirkintensität  $I_r$  und der gemessenen fehlerbehafteten Intensität  $I_{meas}$  über die beiden Phasendifferenzen  $\varphi_{field}$  und  $\varphi_{error}$  hergestellt.



**Abb. 1.20:** Einfluss von  $\varphi_{error}$  (Parameter) und  $\varphi_{field}$  auf den Messfehler [MICROFLOWN 5, S.14]

Abb. 1.20 zeigt den gesamten Messfehler für verschiedene Werte von  $\varphi_{error}$  in Abhängigkeit auch von  $\varphi_{field}$ . Eine wichtige Erkenntnis dabei ist, dass für kleine  $\varphi_{field}$  der Messfehler für große Werte von  $\varphi_{error}$  klein bleibt. Da im Fernfeld nur kleine  $\varphi_{field}$  auftreten, hat die pv-Sonde in diesem Bereich ihre Stärke und ist dort unkritisch bezüglich einer schlechten Kalibrierung (Phasenabgleich) verwendbar. Im reaktiven Nahfeld dagegen ( $\varphi_{field}$  nahe bei  $90^\circ$ ) muss für eine gute Messgenauigkeit (Messfehler unter 0,5dB) der Phasenfehler  $\varphi_{error}$  auf ca.  $1^\circ$  reduziert werden, was nur mit sehr genauen Kalibriermethoden erreichbar ist.

## 1.6.2 Stark reaktive Schallfelder

Ob man sich im Nah- oder Fernfeld (Kugelwellentheorie) befindet, ist von der Frequenz abhängig. Abb. 1.21 zeigt eine Messung der Phasendifferenz zwischen Druck und Schnelle in einem Abstand von 2m. Für tiefe Frequenzen ist das Messinstrument eher im Nahfeld der Schallquelle, was sich durch ein großes  $\varphi_{field}$  bemerkbar macht.

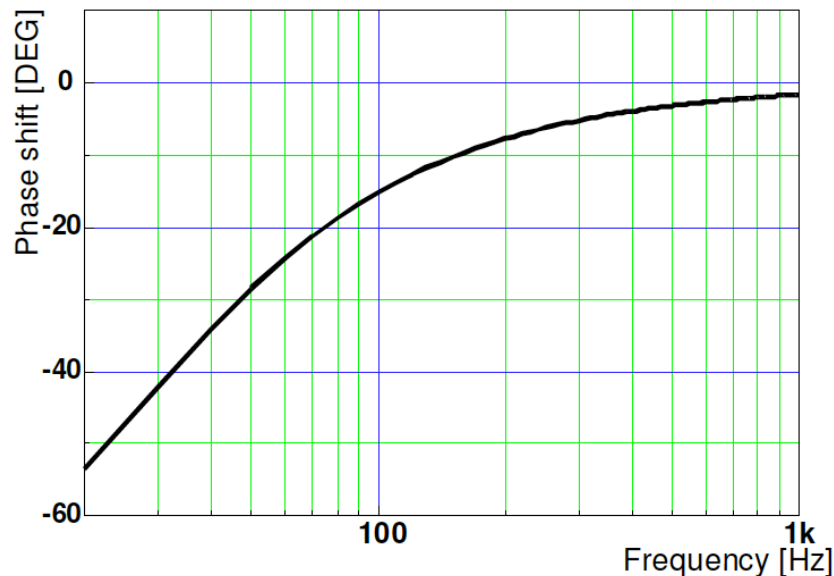


Abb. 1.21: Phasendifferenz  $\varphi_{field}$  in Abhängigkeit der Frequenz [MICROFLOWN 5, S.20]

## 1.6.3 Schallfelder mit hohem pI-Index

In Schallfeldern mit hohem pI-Index, wie es z.B. in einem diffusen Schallfeld der Fall ist, breitet sich Schall in alle Richtungen gleichförmig aus, wodurch die Schallintensität sehr gering (im Idealfall 0) ist, der Schalldruck im Gegensatz dazu aber nicht. Das Auslöschung der Schallintensität kann man sich so vorstellen, dass jede Schallwelle einer bestimmten Richtung ( $W_a$ ) durch eine Schallwelle in genau entgegengesetzter Richtung ( $W_b$ ) ausgelöscht wird.

Damit haben klassische pp-Sonden einige Probleme. Besteht eine Phasendifferenz zwischen den beiden Druckempfängern (kleiner pRI-Index), ändert sich der Einfallswinkel, bei dem die Sonde keine Schallintensität misst (line of zero sensitivity, siehe Abb. 1.22). Dadurch ändert sich die Richtcharakteristik der Sonde, entgegengesetzte Schallwellen löschen sich nicht vollständig aus und es kommt zu einer gemessenen Intensität, die physikalisch gar nicht vorhanden ist.

Bei pv-Sonden kommt wegen den komplett anderen Grundprinzips diese Problematik nicht zum tragen. Der Druckempfänger ist omni-direktional, das heißt er misst den Schalldruck aus allen Richtungen gleich, und der Schallschnelle-Sensor weist wie gewünscht eine Achtercharakteristik auf. Aus den beschriebenen Gründen ist bei Schallfeldern mit hohem PI-Index eine pv-Sonde überlegen.

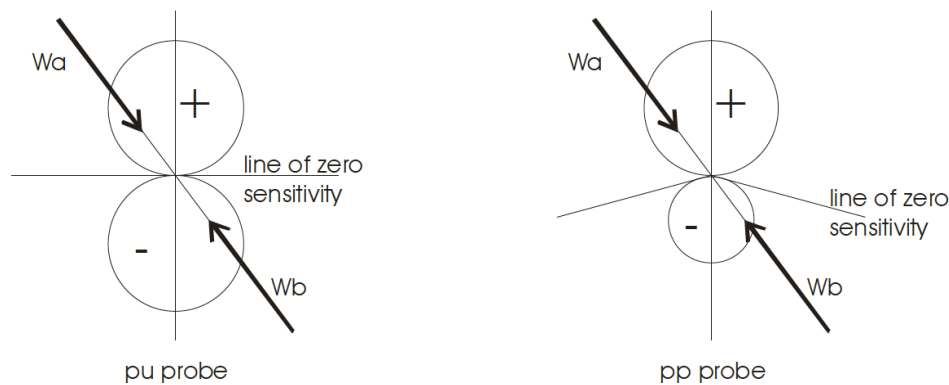


Abb. 1.22: Polardiagramm von pu- und pp-Sonde [MICROFLOWN 5, S.19]

## 1.6.4 Einfluss der Geometrie

pv-Sonden können erheblich kleiner produziert werden und haben in folgenden Anwendungen ihre Vorzüge:

- **Messplatz ist sehr klein:**  
Überall, wo sehr wenig Platz oder die Messposition nicht leicht erreichbar ist, sind kleine Sonden leichter unterzubringen und können genauer positioniert werden.
- **Kleine Objekte:**  
Um kleine Objekte/Schallquellen genug hoch auflösend messen zu können, benötigt man auch entsprechend kleine Sonden.

## 1.6.5 Bandbreite

Ein weiterer wichtiger Punkt ist die Bandbreite einer Messung, die mit einer entsprechenden Sonde durchgeführt werden kann. Bei pp-Sonden ist diese aufgrund des Abstandes der Druckempfänger stark begrenzt. Will man einen größeren Frequenzbereich abdecken, muss der Abstandhalter gewechselt werden. Bei der pv-Sonde befinden sich die Sensoren an selber Stelle und somit sind theoretisch Messungen über den gesamten Hörbereich möglich.

Im folgenden Diagramm ist eine Beispielmessung der Schallintensität mit einer pv-Sonde und 2 pp-Sonden zu sehen.

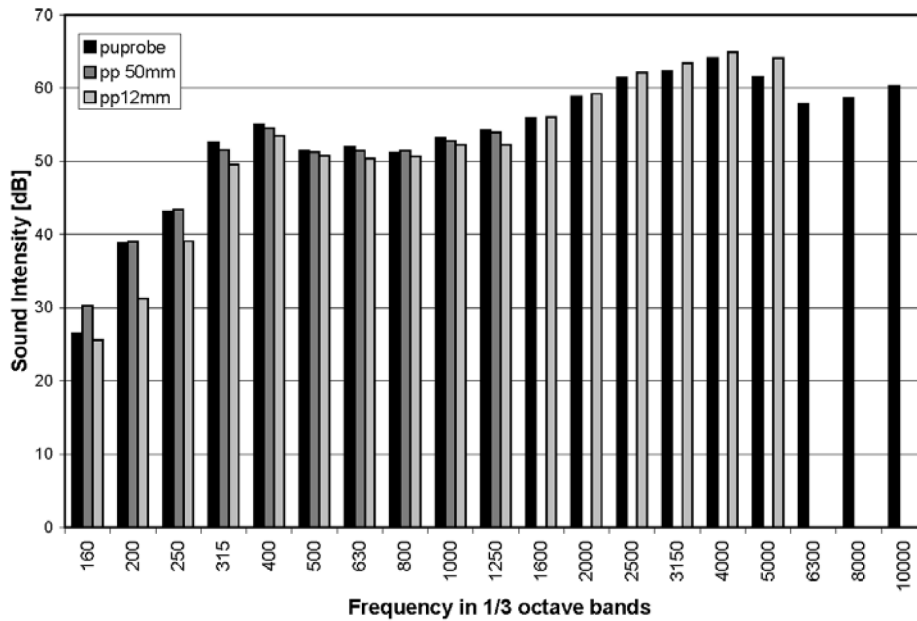


Abb. 1.23: Beispielmessung mit pv- und pp-Sonden [RAANGS, S.155]

Bei tiefen Frequenzen (bis ca. 250Hz) liefert die 12mm-pp-Sonde keine genauen Messergebnisse mehr, dadurch muss zum 50mm-Abstandhalter gewechselt werden. Dieser ergab im Vergleich zur pv-Sonde sehr ähnliche Ergebnisse, nur bei 160Hz tritt eine etwas größere Abweichung auf. Ab 5kHz war es nur noch möglich, mit der pv-Sonde zu messen.

## 1.6.6 Vergleich mit pp-Sonde

Aus den vorangegangenen Kapiteln ergeben sich nun folgende Vor- und Nachteile der pv-Sonde im Vergleich zur pp-Sonde:

- pv-Sonden sind unempfindlich auf den pI-Index, pp-Sonden haben bei Messungen in Räumen mit großem pI-Index Probleme
- pv-Sonden haben Probleme beim Messen von Schallfeldern mit hoher Reaktanz, pp-Sonden sind darauf unempfindlich
- pv-Sonden sind wesentlich kleiner als pp-Sonden
- pv-Sonden haben eine höhere Bandbreite als pp-Sonden
- Für pv-Sonden gibt es noch keine definierten Standards, pp-Sonden sind standardisiert und die Messungen sind gut reproduzierbar
- pv-Sonden besitzen einen durch die unterschiedlichen Sensortypen verursachten Phasenfehler  $\varphi_{error}$ , bei Klasse 1 pp-Sonden ist der Phasenfehler vernachlässigbar klein



## 2 Kalibrierung

Der Zweck der Kalibrierung ist es, zu erfahren, wie viel Ausgangsspannung ein akustischer Sensor bei einem bestimmten Eingangswert besitzt. Bei der pv-Sonde muss in Erfahrung gebracht werden, wieviel Volt pro Pascal Schalldruck am Eingang des Drucksensors, und wieviel Volt pro  $m/s$  Schallschnelle am Eingang des Schnellesensors, ausgegeben werden. Hierbei sind der Amplituden- und Phasengang zu ermitteln. Da bei der pv-Sonde zwei total unterschiedliche Sensoren im Einsatz sind, kommt es unweigerlich zu einer Phasendifferenz zwischen den Sonden und somit zu einem Phasenfehler, der durch eine genaue Kalibrierung niedrig gehalten werden soll.

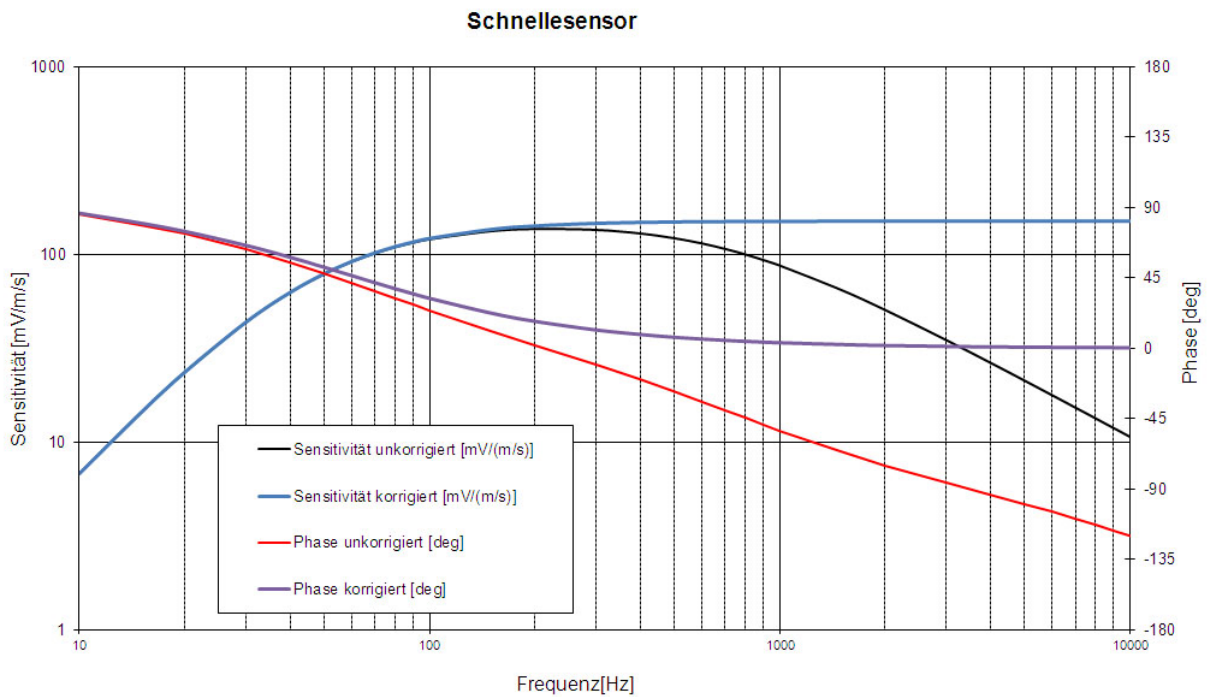
Für die Schnellesonde gibt es noch kein Referenzgerät, mit dessen Hilfe man die Kalibrierung durchführen könnte. Seit einigen Jahren gibt es jedoch einige Arten der Kalibrierung, die gute Ergebnisse erzielen und deren Durchführung gut reproduzierbar ist:

- Hardwarekalibrierung (Filter im Signalaufbereiter)
- Softwarekalibrierung (mathematisches Modell)
- Sphärenkalibrierung (Messung mit sphärischem Lautsprecher)

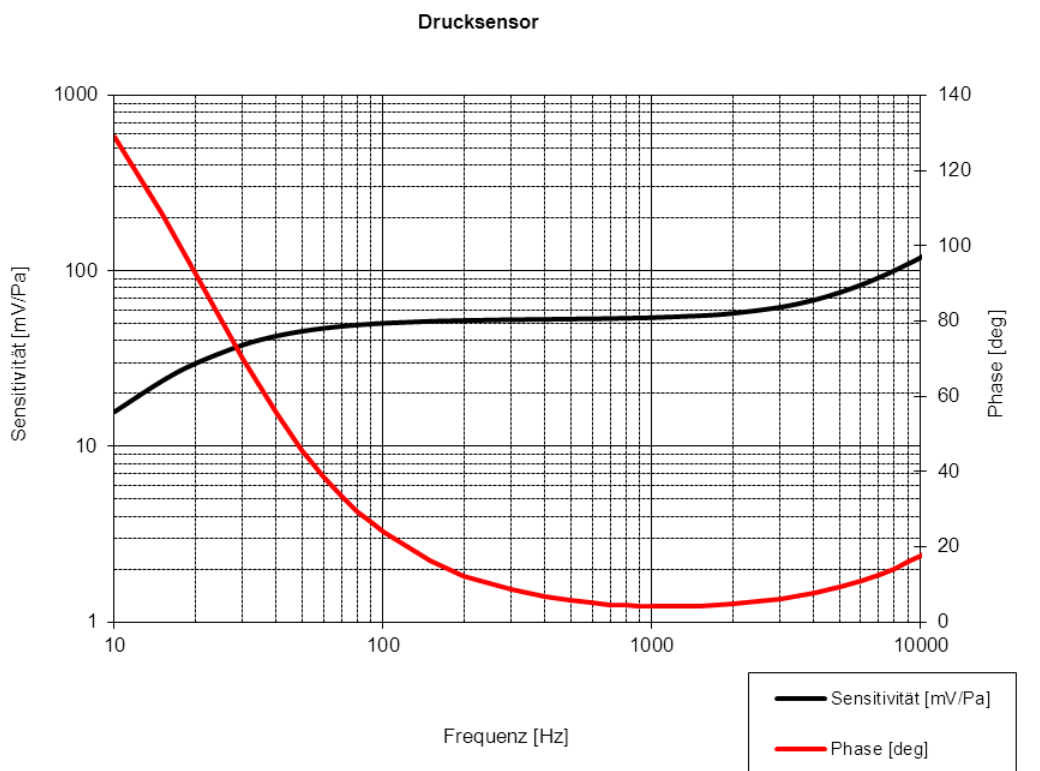
### 2.1 Hardwarekalibrierung

Wie bereits in Kapitel 1.2 angesprochen, liefert die Firma Microflown zur pv-Sonde einen Signalaufbereiter mit, der bereits auf den zugehörigen Schnellesensor abgestimmt ist und den Frequenzbereich über 250Hz linearisiert (Abb. 2.1). Laut Microflown wird der Frequenzbereich unter 250Hz nicht ausgeglichen, um tieffrequente Störung nicht zu verstärken. Die Vermutung liegt nahe, dass es bei einem Ausgleich zu analogen Verzerrungen im Signalaufbereiter kommen kann. Man muss weiters beachten, dass der Frequenzgang des Drucksensor ebenfalls nicht komplett linear ist (siehe Abb. 2.2), der Signalaufbereiter dies jedoch nicht ausgleicht, was bei der Messung berücksichtigt werden muss. Wieso dies nicht integriert wurde, konnte nicht geklärt werden.

Man sieht, dass die Hardwarekalibrierung einen äußerst einfachen Fall der Kalibrierung darstellt. Wenn man die Kurven der Frequenzgänge des Schnellesensors und des Drucksensors bei aktivierter Kalibrierfunktion des Signalaufbereiters zusammen betrachtet, erkennt man einen linearen Frequenzgang der pv-Sonde nur zwischen 250Hz und 2kHz.



**Abb. 2.1:** Frequenzgang Schnellesensor (unkalibriert/Hardware-kalibriert)



**Abb. 2.2:** Frequenzgang Drucksensor (vom Signalaufbereiter nicht beeinflusst)

## 2.2 Softwarekalibrierung (mathematisches Modell)

Bei der Software-Kalibrierung mittels mathematischem Modell werden Druck- und Schnellesignal der pv-Sonde direkt in der Messsoftware modifiziert, sodass eine Linearisierung über den kompletten zu messenden Frequenzbereich erfolgen kann.

Ein großer Vorteil dieses Kalibrierverfahrens liegt darin, dass für Druck und Schnelle nur ein einziges Mal mathematische Modelle erstellt werden müssen und diese dann bei jeder Messung direkt mit eingerechnet werden können. Die notwendigen Grenzfrequenzen, die zur Erstellung der Modelle benötigt werden, werden für jede Sonde von Werk aus bestimmt und für den Anwender bereitgestellt. Für unsere pv-Sonde wurden folgende Grenzfrequenzen bestimmt:

Schnellesensor		Drucksensor	
Sensitivität @ 250Hz	150,4 mV/Pa*	Sensitivität @ 1kHz	53,3 mV/Pa
$f_{1u}$	35 Hz	$f_{1p}$	24 Hz
$f_{2u}$	716 Hz	$f_{2p}$	3 Hz
$f_{3u}$	100000 Hz	$f_{3p}$	5010 Hz
$f_{4u}$	60 Hz	$C_{1p}$	21 Hz
$C_{1u}$	1 Hz	$C_{2p}$	21 Hz
$C_{2u}$	773 Hz	$C_{3p}$	32194 Hz
$C_{3u}$	14549 Hz		
$C_{4u}$	61 Hz		

**Tabelle 1:** Werte für mathematisches Modell

## 2.2.1 Formeln

Aus dem Datenblatt der pv-Sonde sind folgende Amplituden- und Phasengänge gegeben, die die mathematischen Modelle der Sonde bestimmen:

### Schalldruck:

$$S_p [mV / Pa] = S_p @ 1kHz \frac{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{3p}}\right)^2}}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{1p}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{2p}}{f}\right)^2}}$$

$$\varphi_p [\text{deg}] = \arctan\left(\frac{C_{1p}}{f}\right) + \arctan\left(\frac{C_{2p}}{f}\right) + \arctan\left(\frac{f}{C_{3p}}\right)$$

### Schallschnelle:

$$S_u [mV / Pa^*] = \frac{S_u @ 250Hz}{\sqrt{1 + \left(\frac{f_{c1u}}{f}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{c2u}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_{c3u}}\right)^2} \sqrt{1 + \left(\frac{f_{c4u}}{f}\right)^2}}$$

$$\varphi_u [\text{deg}] = \arctan\left(\frac{C_{1u}}{f}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{2u}}\right) - \arctan\left(\frac{f}{C_{3u}}\right) + \arctan\left(\frac{C_{4u}}{f}\right)$$

Der Frequenzgang des Schellesensors ergibt sich aus den physikalischen Gegebenheiten, die bereits in Kapitel 1.1.2 genauer beschrieben wurden.

## 2.2.2 Programmierung des Modells

Die Umsetzung der Modelle wurde in Matlab implementiert und die Daten als File abgespeichert, um diese im PAK-Messsystem von Müller-BBM abrufen zu können. Im Folgenden wird der Matlab-Code beschrieben, der dazu nötig ist.

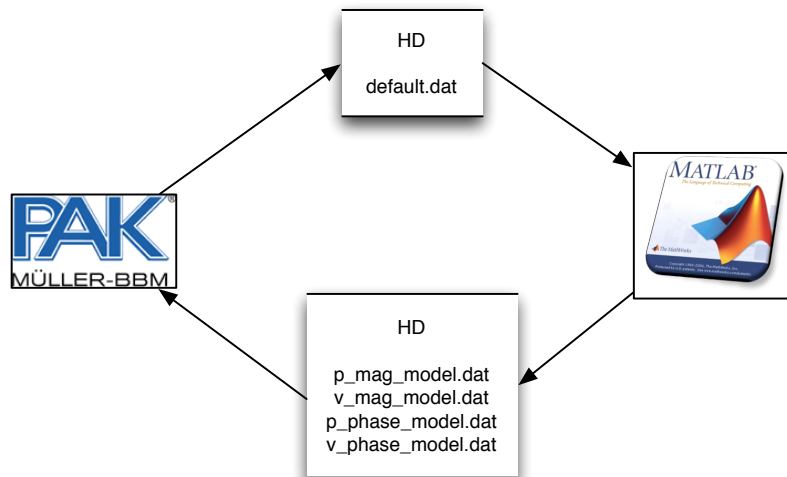


Abb. 2.3: Flussdiagramm zur Modell-Erstellung

Zunächst ist es wichtig, zu erfahren, welche Daten das PAK-System verarbeiten kann.

Dazu führt man zunächst eine Test-Messung durch (siehe Kapitel 3), bei welcher die gemessenen Daten nicht relevant sind, jedoch aber schon die FFT-Einstellungen gewählt werden müssen. Wichtig ist hierbei, dass die Software-Kalibrierung nur bei Messungen mit diesen Einstellungen möglich sind. Falls die FFT-Einstellungen geändert werden, muss auch ein neues Modell erstellt werden.

Die Messdaten aus der Test-Messung werden nun als Default-File abgespeichert und dieses beinhaltet für die Erstellung der Modelle benötigte Parameter. Das File kann nun in Matlab eingelesen und die Modelle im entsprechenden Datenformat erstellt werden. Somit ist es möglich, diese ins PAK zu integrieren und in die Messung einfließen zu lassen.

```

% Einlesen des Default-Files
[Header, lD, ~, f, ~, ~, ~ ]= pak52_binary_in('default.dat')
  
```

Im Default-File wird bereits die eingestellte Messpunkteanzahl für die FFT-Berechnung übergeben, die in den PAK-Messeinstellungen gewählt wird. Durch die gewählte Punkteanzahl von 3201 und einer höchsten FFT-Frequenz von 17226Hz (durch Samplingrate von 44,1kHz bestimmt) ergibt sich eine Frequenzauflösung von 5,3833Hz, die für akustische Messungen passend erscheint. Zusätzlich zur Punkteanzahl (lD) beinhaltet das eingelesene File einen Standard-Header (Header) und die Frequenzpunkte (f). Alle nicht benötigten Daten werden mit Tilde ignoriert. Die Funktion zum Einlesen "pak52\_binary\_in" und die zur Ausgabe benötigte Funktion "pak52\_binary\_out" wurden von Müller-BBM zur Verfügung gestellt.

```

% Sensitivitätsfaktoren
sp = 1; % bezogen auf 53.3mV/Pa bei 1kHz
sv = 1; % bezogen auf 150.4mV/Pa* bei 250Hz
  
```

```

korrektur_p = 1.0163227; % Abweichung bei 1kHz
korrektur_v = 0.909455061612021; % Abweichung bei 250Hz

% Korrigierte Sensitivitätsfaktoren
sp_korr = sp ./ korrektur_p;
sv_korr = sv ./ korrektur_v;

```

Die Sensitivität der Sensoren wird in PAK eingestellt, dadurch muss sie hier nicht berücksichtigt werden und es wird der Faktor 1 eingegeben. Jedoch ergeben sich bei den Modellen bei 1kHz (Druck) und 250Hz (Schnelle) Abweichungen zur gewünschten Sensitivität, wodurch die Modelle durch zusätzliche Korrekturfaktoren angepasst werden.

Der folgende Code zeigt die Erstellung der Modelle nach den oben genannten Formeln.

```

% Erstellung der Modelle
p_mag_model =
sp_korr.*((sqrt(1+(f./fc3p).^2))./((sqrt(1+(fc1p./f).^2).*(sqrt(1+fc2p./f).^2))));
p_phase_model=(atan(C1p./f)+atan(C2p./f)+atan(f./C3p))*180/pi;
v_mag_model=sv_korr ./ (sqrt(1+(fc1u./f).^2) .* sqrt(1+(f./fc2u).^2) .*
sqrt(1+(f./fc3u).^2) .* sqrt(1+(fc4u./f).^2));
v_phase_model=(atan(C1u./f)-atan(f./C2u)-atan(f./C3u)+atan(C4u./f))*180/pi;

```

In Abb. 2.1 und Abb. 2.2 sind die erstellten Modelle bereits veranschaulicht (Sensitivität unkorrigiert), wobei die Kurven beim Schnellesensor bei 250Hz und beim Drucksensor bei 1kHz auf 0dB normiert wurden, weil die Empfindlichkeit bei diesen Frequenzen in PAK eingegeben wird.

Zuletzt werden die erstellten Modelle mit der Funktion "pak52\_binary\_out" in dat-Files geschrieben, die dem PAK-Format entsprechen.

```

% Ausgabe in PAK-Datenformat

pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, p_mag_model, 'p_mag_model.dat');
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, p_phase_model, 'p_phase_model.dat');
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, v_mag_model, 'v_mag_model.dat');
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, v_phase_model, 'v_phase_model.dat');

```

In der PAK Arithmetik-Funktion können die Files nun importiert werden. Dazu müssen zusätzlich ein paar Parameter angegeben werden, die beschreiben, um welche Daten es sich handelt (siehe folgender Code). Um die Messung schlussendlich zu kalibrieren, müssen die Messwerte durch das jeweilige Modell dividiert (Amplitude) bzw. subtrahiert (Phase) werden.

```

p_mag_model = READ_52DATA_FILE("C:\...\p_mag_model.dat", 'FFT mag', 'El.
Spannung', 'Frequenz', 'Zeit')

RESULT = MAG(P) / p_mag_model

```

## 2.3 Sphärenkalibrierung

Die gängigsten Verfahren zur Software-Kalibrierung der pv-Sonde mittels Messung sollen hier angeführt werden (Reihung nach Genauigkeit und Aufwand):

- Schallleistungsverhältnismethode (Sound power ratio calibration)
- Sphärenkalibrierung (Piston in a sphere calibration)
- Kalibrierung im Kundt'schen Rohr

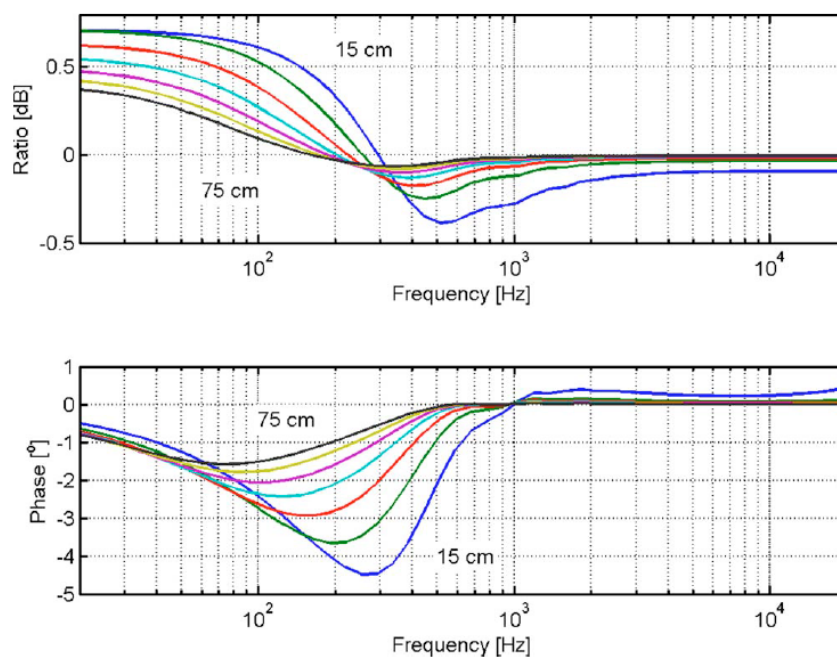
Im Sinne dieser Bachelorarbeit wird nur die Sphärenkalibrierung behandelt, da diese Methode eine Kalibrierung im gesamten Frequenzbereich im normalen Raum ermöglicht und somit sehr flexibel ist. Hierbei wird nicht im diffusen Fernfeld, sondern im Nahfeld kalibriert und der Raum verliert somit Einfluss auf die Kalibrierung.

Informationen und Kalibrier Aufbau zu den anderen Methoden findet man unter [MICROFLOWN 4].

Im Nahfeld einer Monopolschallquelle berechnet sich die Schallfeldimpedanz zu

$$Z(r) = \rho c \frac{jkr}{jkr + 1} \quad (2.1)$$

Die Firma Microflown hat einen Lautsprecher entwickelt, der näherungsweise das Verhalten einer Monopolschallquelle nachbildet. Der Lautsprecher wurde in eine kreisrunde Sphäre aus Hartplastik eingebaut und Experimente [BASTEN] zeigen, dass die Abweichung zur Kolbenmembran in unendlicher Schallwand relativ klein ist und nur bei tieferen Frequenzen vorkommt:



**Abb. 2.4:** Abweichung des Sphärenlautsprechers (Durchmesser 20,5cm, Membrandurchmesser 6,5cm) zur Monopolschallquelle in verschiedenen Abständen vom Lautsprecher in 10cm-Schritten [BASTEN, S. 265]

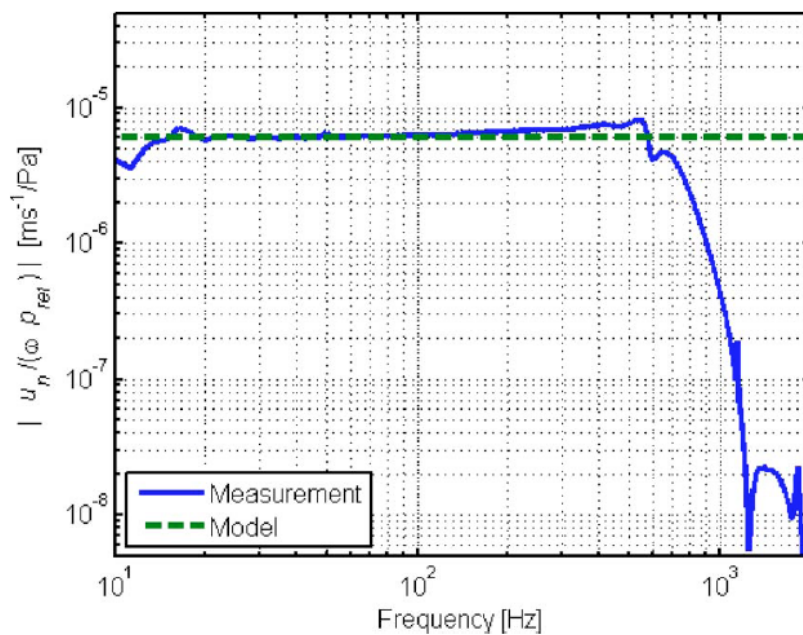
Die Abweichung wird noch kleiner, wenn man den Sphärendurchmesser verkleinert. Heutzutage werden fast nur noch kleinere Sphären mit Durchmesser 16cm und 10,1cm (am SPSC zur Verfügung) vertrieben.

Nachdem die Schallfeldimpedanz in einer bestimmten Entfernung vom Laustprecher bekannt ist, misst man an diesem Punkt den Schalldruck mit einem Referenzmikrofon und kann die Schallschnelle an diesem Ort berechnen:

$$v_{ref} = \frac{P_{ref}}{Z(f)} \quad (2.2)$$

Bei tiefen Frequenzen kann der Sphärenlautsprecher nur noch wenig Schalldruck abgeben und das SNR sinkt. Unter 100-200 Hz wird in normalen Räumen der gemessene Schalldruck komplett durch das Hintergrundrauschen verdeckt und die Kalibrierung wird verfälscht. Dieses Problem wird dadurch gelöst, dass man die Kalibrierung mit dem Sphärenkalibrator in zwei Messvorgänge teilt.

Zuerst misst man Schalldruck und Schallschnelle wie eben beschrieben für mittlere und hohe Frequenzen. Für tiefe Frequenzen (bis ca. 300Hz) gibt es eine andere Vorgehensweise: Der Schalldruck im Inneren der Sphäre ist bei diesen Frequenzen linear abhängig von der Schnelle der Membran, wie man Abb. 2.5 entnehmen kann. In dieser Abbildung ist auch zu sehen, dass dieser Zusammenhang nur für die tiefen Frequenzen gültig ist.



**Abb. 2.5:** Übertragungsfunktion zwischen Membranschnelle und Schalldruck im Inneren der Sphäre [BASTEN, S. 265]



Das Luftvolumen im Inneren der Sphäre wirkt als akustische Feder mit der Federsteifigkeit  $s_a = \frac{\rho c^2}{V_0}$  und  $c = \sqrt{\frac{\kappa p_0}{\rho}}$ . Das Verhältnis zwischen der Schnelle der Membran und dem Schalldruck im Inneren der Sphäre wird über die akustische Impedanz hergeleitet:

$$Z_a = \frac{s_a}{j\omega} = \frac{p_{ref}}{v_{ref} A_0}$$

Somit ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$v_{ref} = \frac{-j2\pi f V_0}{\underbrace{\kappa A_0 p_0}_{\alpha(f)}} p_{ref} \quad (2.3)$$

wobei  $V_0$  das Volumen im Inneren der Sphäre,  $A_0$  die Fläche der Kolbenmembran (des Lautsprechers),  $p_0$  der statische Luftdruck und  $\kappa$  der Adiabatenexponent (1,4 für Luft) ist.

Befindet sich die Sonde sehr nahe an der Membran, kann man zusätzlich annehmen, dass die Schnelle über den interessierenden Frequenzbereich (bis ca. 200Hz) bei Vergrößerung des Abstandes über alle Frequenzen konstant abnimmt, wie in folgender Abbildung zu sehen ist.

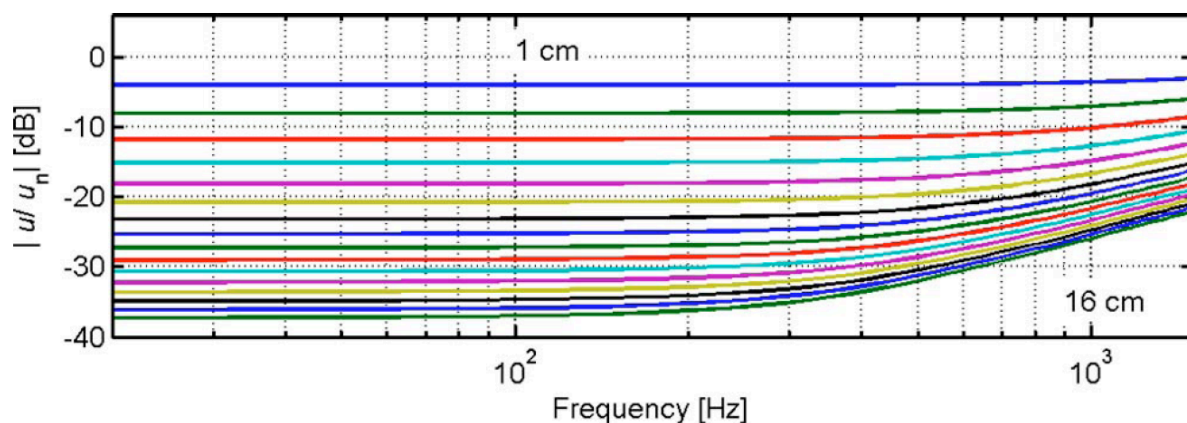


Abb. 2.6: Schallschnelle in Abhängigkeit der Frequenz nahe an der Membran in 1cm-Abständen

Der gemessene Pegel ist zwar geringer, als direkt an der Membran (Voraussetzung für Gleichung (2.3)), dies ist aber insofern nicht von Bedeutung, da im Kalibrierverfahren in einem späteren Schritt die Messkurven für tiefe Frequenzen an jene für mittlere und hohe Frequenzen angepasst werden.

Will man eine Kalibrierung über den gesamten Frequenzbereich durchführen, müssen also zwei Messungen mit verschiedenen Kalibrieraufbauten durchgeführt werden, die im nächsten Abschnitt genauer beschrieben werden.

### 2.3.1 Kalibrieraufbau für mittlere und höhere Frequenzen

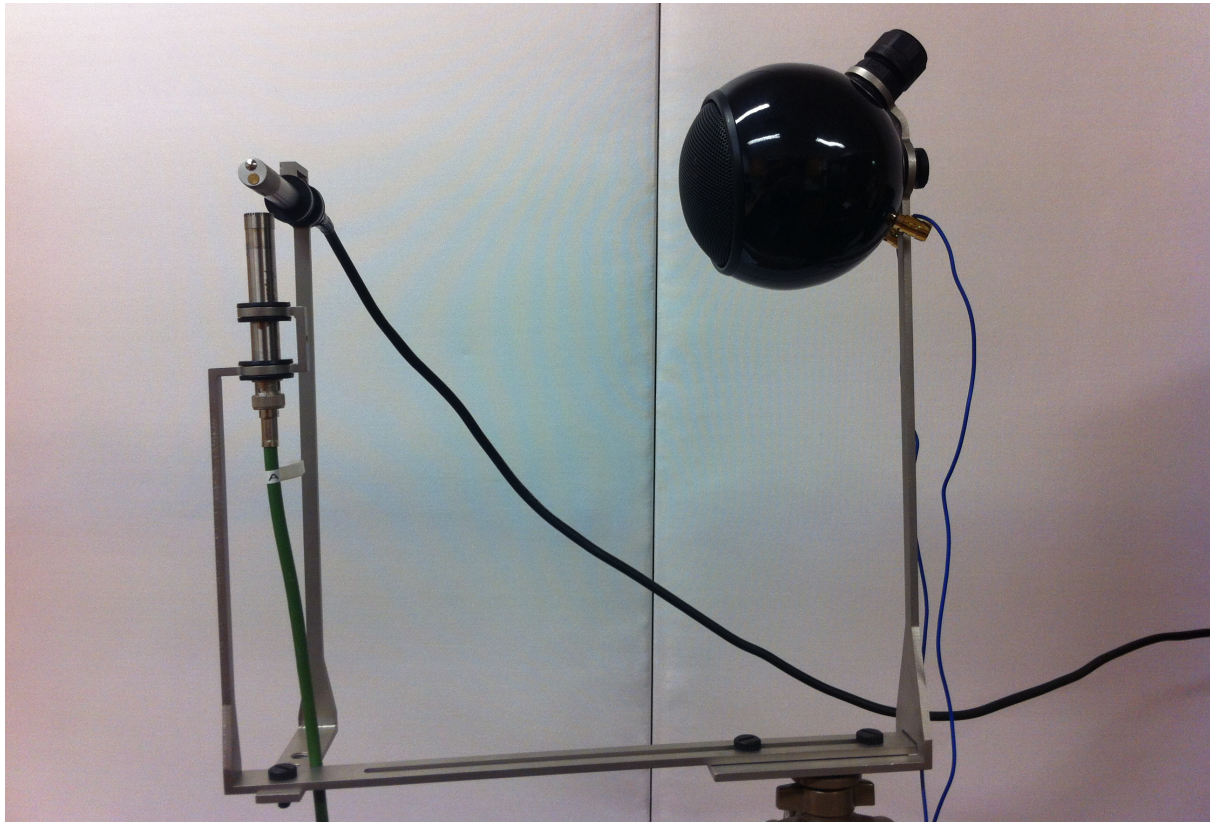
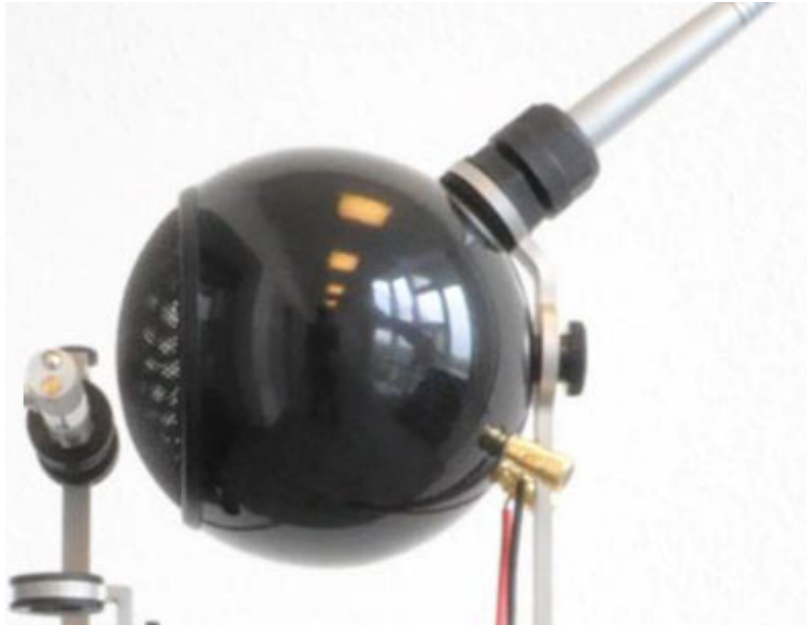


Abb. 2.7: Kalibrieraufbau für mittlere und höhere Frequenzen

Der beim Sphärenkalibrator mitgelieferte Haltearm wird auf Maximallänge ausgefahren (23cm), das Referenzmikrofon wird in die senkrechte Haltevorrichtung montiert und die pv-Sonde in die waagrechte Halterung. Die 90° Richtung der pv-Sonde (siehe Abb. 1.3) soll hierbei in Richtung des Lautsprechers zeigen.

Die pv-Sonde wird über den LEMO-Stecker mit dem Signalaufbereiter verbunden und die beiden Ausgangskanäle des Aufbereiters mit dem PAK-System. Der Equalizer des Signalaufbereiters muss bei der Kalibrierung ausgeschaltet sein (eingeschaltet wird der Equalizer nur, wenn es keine Möglichkeit für eine Softwarekalibrierung gibt). Der Signalaufbereiter soll im High-Gain Modus arbeiten. Nun werden die Amplituden- und Phasengänge aller Sensoren ( $p_{ref}$ ,  $p$  und  $v$ ) gemessen.

### 2.3.2 Kalibrieraufbau für tiefe Frequenzen



**Abb. 2.8:** Kalibrieraufbau für hohe Frequenzen [CMANUAL, S.48]

Bei dem Kalibrieraufbau für tiefe Frequenzen soll die pv-Sonde so nahe wie möglich an die Lautsprechermembran geführt werden, was einer Distanz von ca. 5cm entspricht. Die 90°-Richtung der Sonde (positiv sensitive Seite) soll zur Membran zeigen.

Das Referenz-Druckmikrofon wird nun direkt in der Sphäre positioniert, um ein größtmögliches SNR zu erhalten, das bei tiefen Frequenzen eine wichtige Rolle spielt. Ansonsten ist der restliche Messaufbau der selbe wie für mittlere und hohe Frequenzen (EQ aus, High-Gain-Modus).

Die benötigten Abmessungen des Lautsprechers sind:

Sphärendurchmesser  $d_{\text{Sphere}} = 10,1\text{cm}$

Membrandurchmesser  $d_{\text{Membran}} = 7,5\text{cm}$

Dadurch ergibt sich für Sphärenvolumen  $V_0$  und Membranfläche  $A_0$ :

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{d_{\text{Sphere}}}{2} \right)^3 = 5,394 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$A_0 = \pi \cdot \left( \frac{d_{\text{Membran}}}{2} \right)^2 = 4,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$$

Hat man nun die Frequenzgänge von  $p$ ,  $v$  und  $p_{\text{ref}}$  für beide Kalibrieraufbauten gemessen, kann die weitere Bearbeitung der Daten in Matlab und PAK erfolgen.

### 2.3.3 Durchführung in Matlab und PAK

Um die Sphärenkalibrierung umzusetzen, werden, wie bereits bei der Kalibrierung mittels mathematischem Modell, das PAK-Messsystem und Matlab verwendet.

Zuerst wird ebenso wie beim mathematischen Modell wieder auf das im PAK-System erstellte default-File in Matlab zugegriffen. Dann werden in Matlab die benötigten Funktionen  $Z(f)$  und  $\alpha(f)$  (siehe Gleichung (2.3)) erstellt und als dat-File auf der Festplatte abgelegt. Diese Schritte müssen für die Kalibrierprozedur nur ein einziges Mal ausgeführt werden, da dann die Funktionen als Dateien vorliegen und jederzeit von PAK eingelesen werden können.

Der nächste Schritt besteht darin, jeweils eine Messung mit dem Kalibrieraufbau für mittlere und hohe Frequenzen und eine für tiefe Frequenzen durchzuführen, so wie sie in den vorigen Kapiteln beschrieben sind. Aus den Messwerten von  $p$ ,  $v$  und  $p_{ref}$  von beiden Messungen und entsprechender Datenverarbeitung werden Kalibrierfunktionen erstellt, die in Matlab zusammengesetzt werden. Diese zusammengesetzten Kalibrierfunktionen werden schlussendlich als Files abgespeichert, sodass das PAK-System während einer Messung darauf zugreifen und die kalibrierten Ergebnisse berechnen kann.

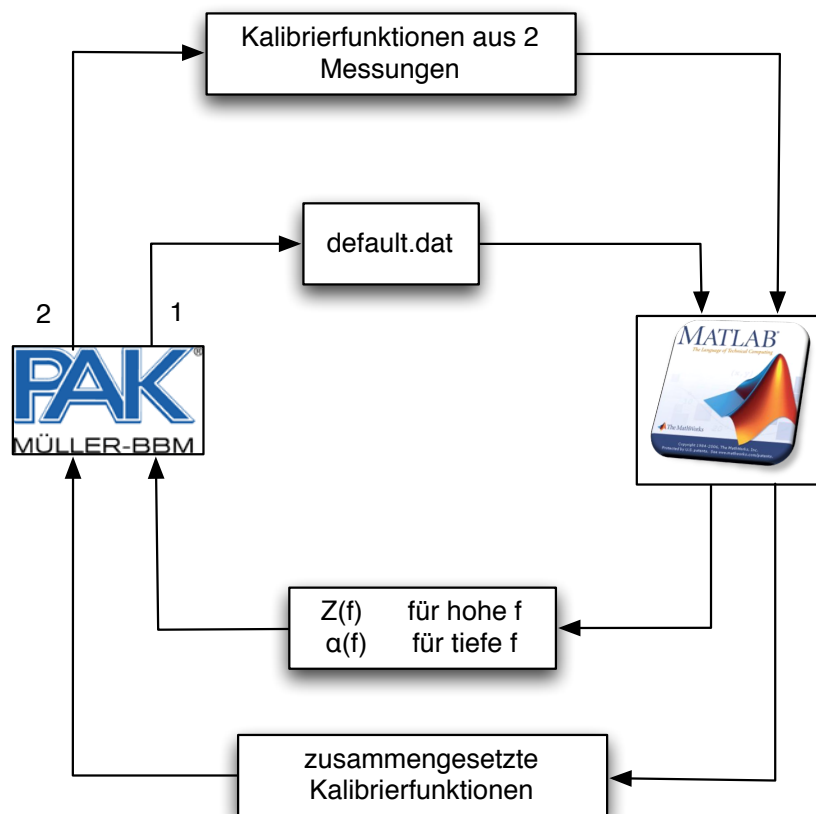


Abb. 2.9: Flussdiagramm Sphärenkalibrierung

### 2.3.3.1 Erstellung der Funktionen $Z(f)$ und $\alpha(f)$ in Matlab

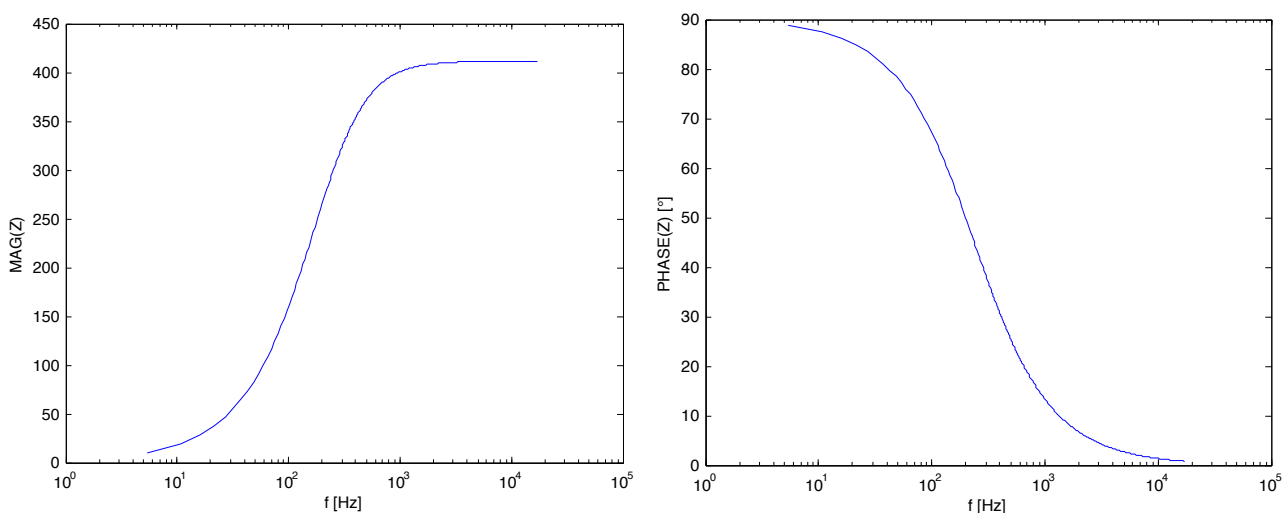
#### $Z(f)$ :

Die Schallfeldimpedanz-Funktion wird grundsätzlich nach Formel (2.1) implementiert, aber mit dem Unterschied, dass  $Z$  als Funktion der Frequenz bei einem fixen Abstand ( $r=23\text{cm}$ ) betrachtet wird. Sie berechnet sich wie folgt:

$$Z(f) = \rho c \frac{j \frac{2\pi f}{c} \cdot r}{j \frac{2\pi f}{c} \cdot r + 1}$$

Die Implementierung dieser Funktion in Matlab (siehe Anhang) gestaltet sich relativ einfach. Das Einlesen und Abspeichern der Daten funktioniert genauso wie beim mathematischen Modell, ansonsten wird nur die Funktion  $Z(f)$  erstellt und Betrag und Phase davon gebildet.

In Abb. 2.10 ist Betrag und Phase der normierten Schallfeldimpedanz dargestellt. Im Betragsspektrum kann man erkennen, dass sich ab einer Frequenz von ca. 1kHz die Schallfeldimpedanz  $Z$  der Schallkennimpedanz  $Z_0$  annähert, d.h. dort befindet man sich im Fernfeld der Schallquelle. Weiters ist im Phasenspektrum zu sehen, dass die Phase bei tiefen Frequenzen gegen  $90^\circ$  geht, wie es üblicherweise im Nahfeld vorkommt.



**Abb. 2.10:** Betrag und Phase der Schallfeldimpedanz  $Z(f)$  mit  $r=23\text{cm}$

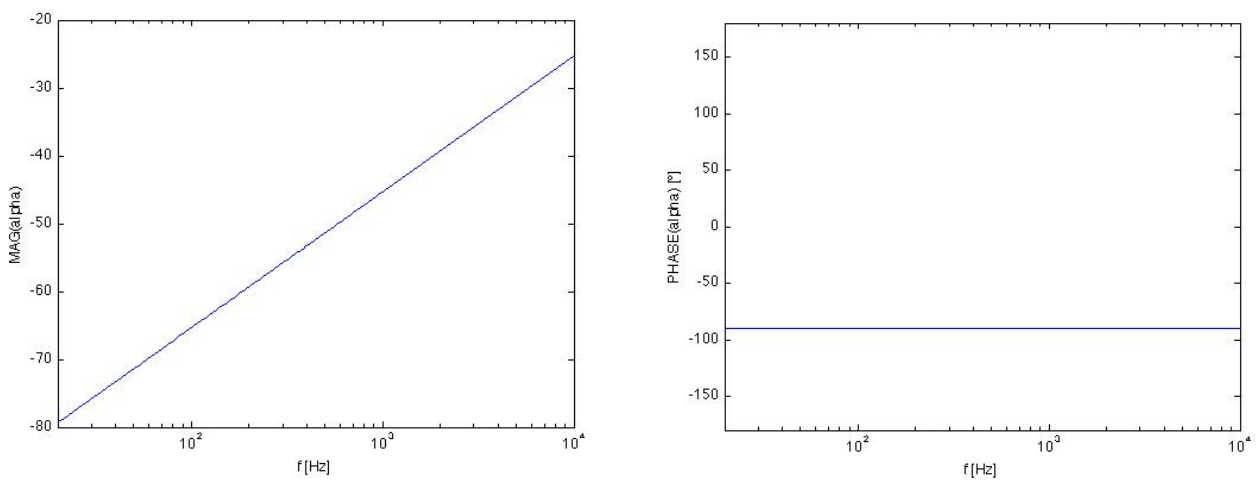
**$\alpha(f)$ :**

Als zweite Funktion über der Frequenz wird  $\alpha(f)$  benötigt, das aus Formel (2.3) entnommen werden kann.

$$\alpha(f) = \frac{-j2\pi fV_0}{\kappa A_0 p_0}$$

Der Betrag steigt linear mit der Frequenz an und die Phase bleibt wegen der Multiplikation mit -j auf  $-90^\circ$  über der Frequenz konstant.

Die Funktion wurde in Matlab programmiert (siehe Anhang).



**Abb. 2.11:** Betrag und Phase von  $\alpha(f)$

### 2.3.3.2 Datenverarbeitung in PAK

Sind die benötigten Funktionen  $Z(f)$  und  $\alpha(f)$  erstellt und als Dateien auf der Harddisk abgespeichert, kann die Messung und Datenverarbeitung im PAK-System erfolgen. Ziel der folgenden Arbeitsschritte ist es, Dateien mit Kalibrierfunktionen zu erstellen (siehe Gleichungen (2.4), (2.5), (2.6)), die zur Zusammensetzung an Matlab weitergereicht werden können. Dazu müssen je eine Messung für mittlere und hohe Frequenzen und eine für tiefe Frequenzen durchgeführt werden.

Dieses Kapitel behandelt die prinzipielle Vorgangsweise der Datenverarbeitung im PAK, die genauen Arbeitsschritte, Einstellungen und Anmerkungen sind in Kapitel 3 nachzulesen.

#### Mittlere und hohe Frequenzen:

Der Kalibrieraufbau für mittlere und hohe Frequenzen ist in Kapitel 0 beschrieben. In folgender Abbildung ist das grundsätzliche Schema zur Erstellung der Kalibrierfunktionen zu sehen. Ab hier werden für die Spektren von Schalldruck und Schallschnelle Großbuchstaben verwendet.

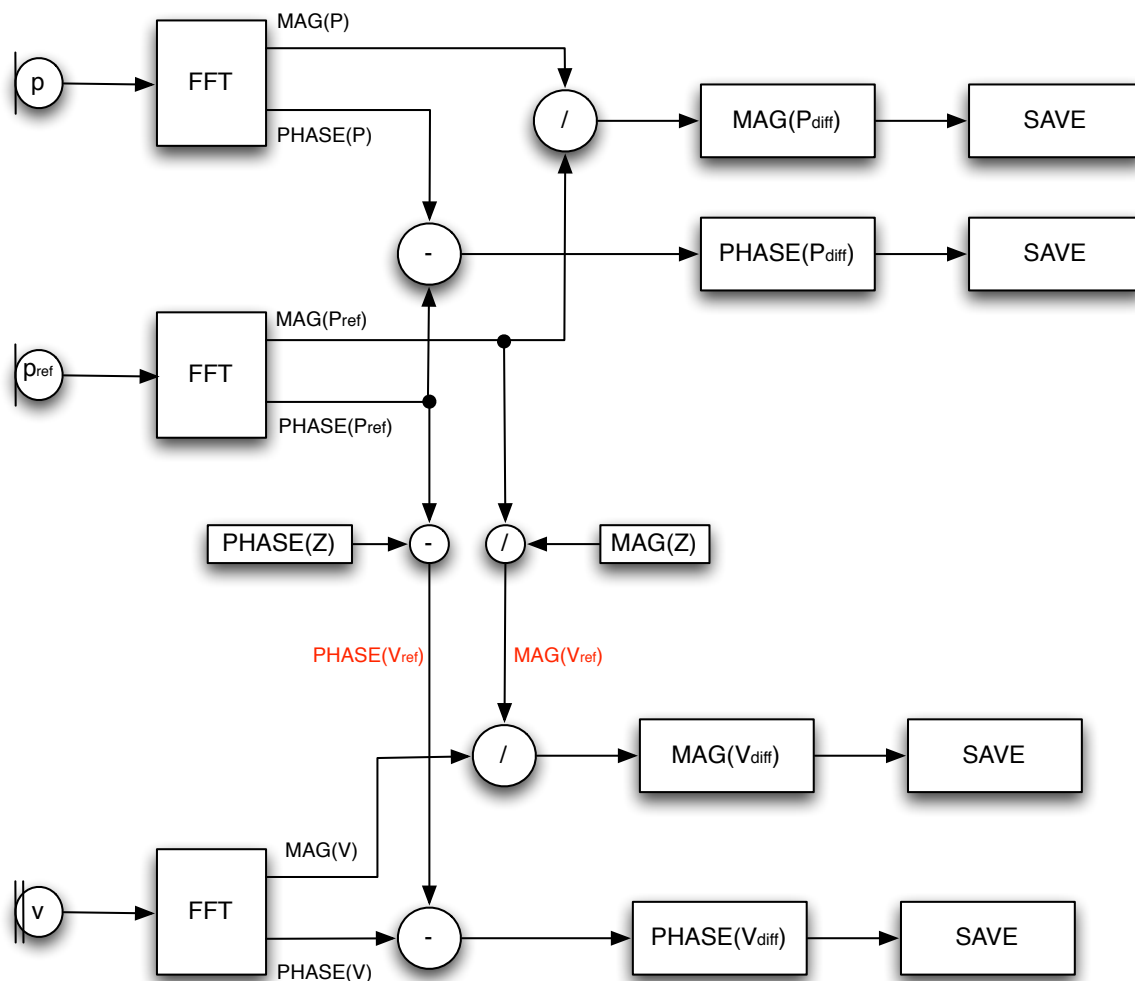


Abb. 2.12: Datenverarbeitung und Erstellung der Kalibrierkurven in PAK für mittlere und hohe Frequenzen

Nach erfolgter Messung der drei Eingangsgrößen  $p$ ,  $p_{ref}$  und  $v$ , die bei entsprechender Einstellung in PAK direkt durch FFT-Berechnung im Frequenzbereich darstellbar sind, kann die Weiterverarbeitung erfolgen. Diese beruht darauf, dass das Referenzmikrofon richtige Werte liefert, mit  $p$  und  $v$  (über  $Z$ ) verglichen wird und der Unterschied die Kalibrierfunktion ergibt. Am Beispiel des Drucksensors verglichen mit dem Referenzmikrofon lautet dies:

$$\underline{P}_{diff} = \frac{|\underline{P}| \cdot e^{j\varphi_p}}{|\underline{P}_{ref}| \cdot e^{j\varphi_{p_{ref}}}} = \frac{|\underline{P}|}{|\underline{P}_{ref}|} \cdot e^{j(\varphi_p - \varphi_{p_{ref}})} = |\underline{P}_{diff}| e^{j\varphi_{diff}}$$

Man sieht, dass die Beträge dividiert und die Phasen subtrahiert werden. In Diagramm Abb. 2.12 und ab jetzt im Text werden Betrag und Phase als  $MAG()$  bzw.  $PHASE()$  dargestellt, da dies den korrespondierenden Befehlen in PAK entspricht. Demnach gilt für die Kalibrierfunktionen des Drucksensors:

$$\boxed{\begin{aligned} MAG(P_{diff}) &= \frac{MAG(P)}{MAG(P_{ref})} \\ PHASE(P_{diff}) &= PHASE(P) - PHASE(P_{ref}) \end{aligned}} \quad (2.4)$$

Diese beiden Kalibrierfunktionen werden nun gespeichert und bei einer Messung zur Kalibrierung des Drucksensors **über den gesamten Frequenzbereich** verwendet. Nur die Kalibrierfunktionen des Schnellesensors werden aus zwei Messungen zusammengesetzt!

Um die Kalibrierfunktionen des Schnellesensors bei mittleren und hohen Frequenzen zu erhalten, muss zunächst über die Impedanzfunktion  $Z$  eine Referenzschallschnelle berechnet werden.

$$\begin{aligned} MAG(V_{ref}) &= \frac{MAG(P_{ref})}{MAG(Z)} \\ PHASE(V_{ref}) &= PHASE(P_{ref}) - PHASE(Z) \end{aligned}$$

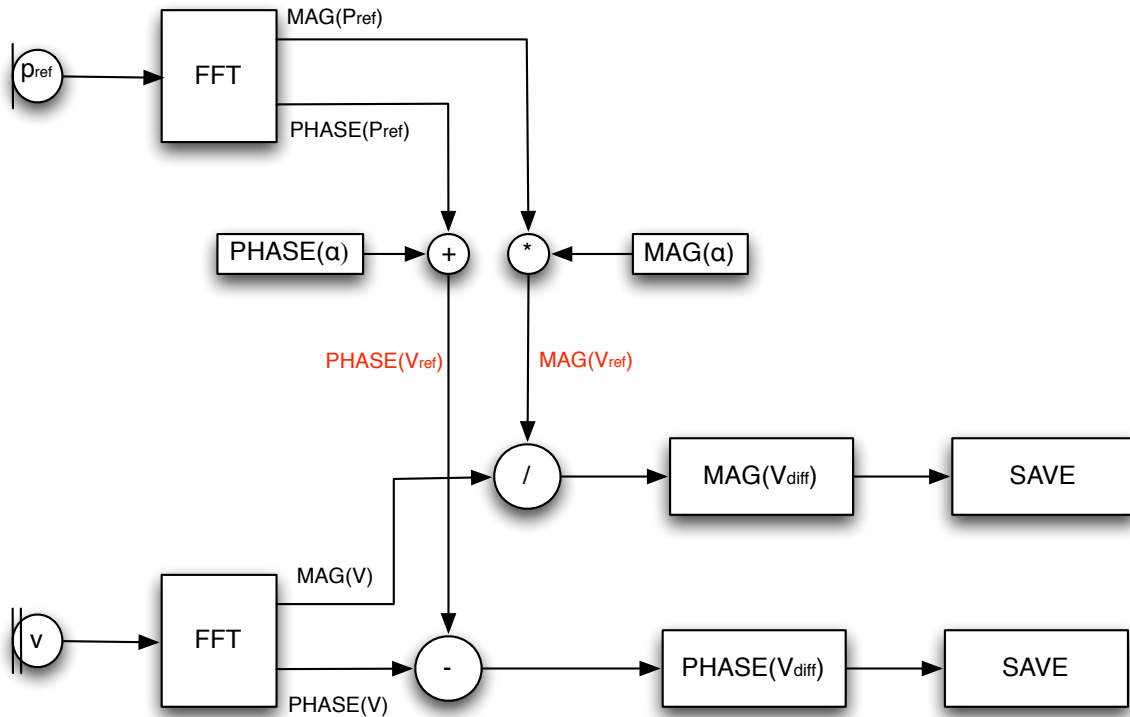
Diese Referenzschallschnelle kann nun mit dem Signal des Schnellesensors verglichen werden.

$$\boxed{\begin{aligned} MAG(V_{diff}) &= \frac{MAG(V)}{MAG(V_{ref})} = \frac{MAG(V) \cdot MAG(Z)}{MAG(P_{ref})} \\ PHASE(V_{diff}) &= PHASE(V) - PHASE(V_{ref}) = PHASE(V) - PHASE(P_{ref}) + PHASE(Z) \end{aligned}} \quad (2.5)$$



### Tiefe Frequenzen:

Für tiefe Frequenzen ist die Datenverarbeitung beinahe identisch, aber mit dem Unterschied, dass nur mehr der Schnellesensor kalibriert werden muss und die Berechnung der Referenzschallschnelle nicht durch  $Z(f)$ , sondern über  $\alpha(f)$  erfolgt.



**Abb. 2.13:** Datenverarbeitung und Erstellung der Kalibrierkurven in PAK für tiefe Frequenzen

Betrag und Phase der Referenzschallschnelle werden berechnet durch (siehe Gleichung (2.3)):

$$MAG(V_{ref}) = MAG(P_{ref}) \cdot MAG(\alpha)$$

$$PHASE(V_{ref}) = PHASE(P_{ref}) + PHASE(\alpha)$$

Dadurch ergibt sich für die Kalibrierfunktionen des Schnellesensors bei tiefen Frequenzen:

$$\boxed{\begin{aligned} MAG(V_{diff}) &= \frac{MAG(V)}{MAG(V_{ref})} = \frac{MAG(V)}{MAG(P_{ref}) \cdot MAG(\alpha)} \\ PHASE(V_{diff}) &= PHASE(V) - PHASE(V_{ref}) = PHASE(V) - PHASE(P_{ref}) - PHASE(\alpha) \end{aligned}} \quad (2.6)$$

### 2.3.3.3 Zusammensetzen der Kalibrierfunktionen in Matlab

Nach erfolgter Messung sind nun 6 Kalibrierfunktionen gespeichert, die im nächsten Schritt zusammengefasst werden. Aus der Messung für mittlere und hohe Frequenzen kann man die Kalibrierfunktionen für den Drucksensor für den kompletten Frequenzbereich übernehmen, für den Schnellesensor müssen die Kalibrierfunktionen jedoch zusammengesetzt werden.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass dieser Schritt nur für die Amplitudengänge durchgeführt werden konnte, da leider die Messung der Phasengänge keine verwertbaren Ergebnisse lieferte. Bis zu diesem Punkt sind alle Schritte sehrwohl auch für die Phasengänge durchgeführt worden.

Beim Zusammensetzen der beiden Kurven geht man prinzipiell davon aus, dass die Kalibrierfunktion für mittlere und hohe Frequenzen die richtigen Absolutwerte aufweist, demnach wird die Kurve für tiefe Frequenzen dieser angepasst (verschoben).

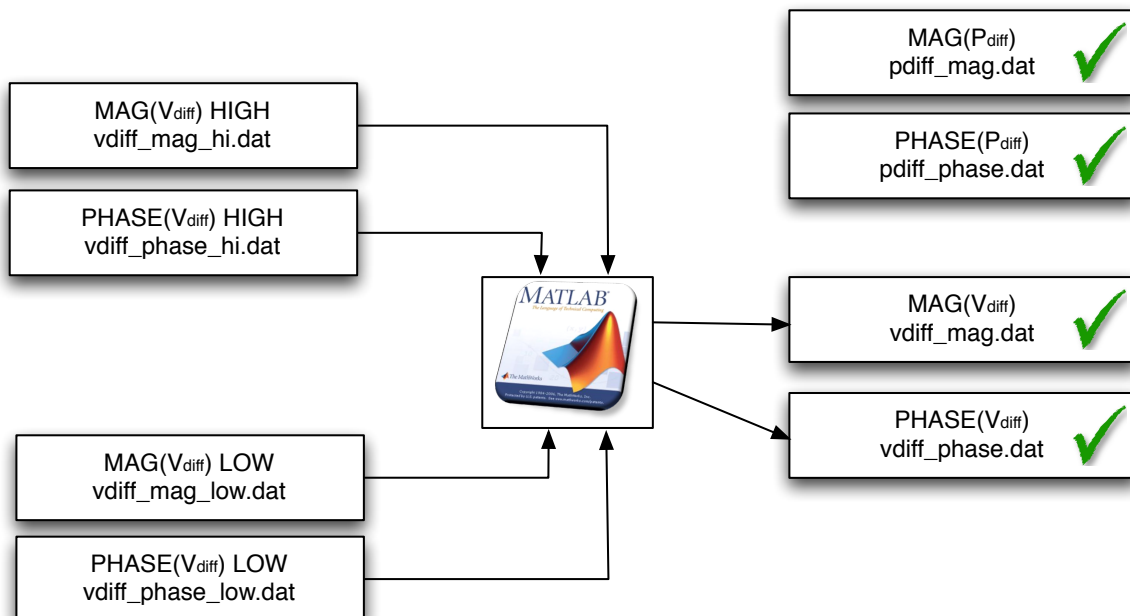
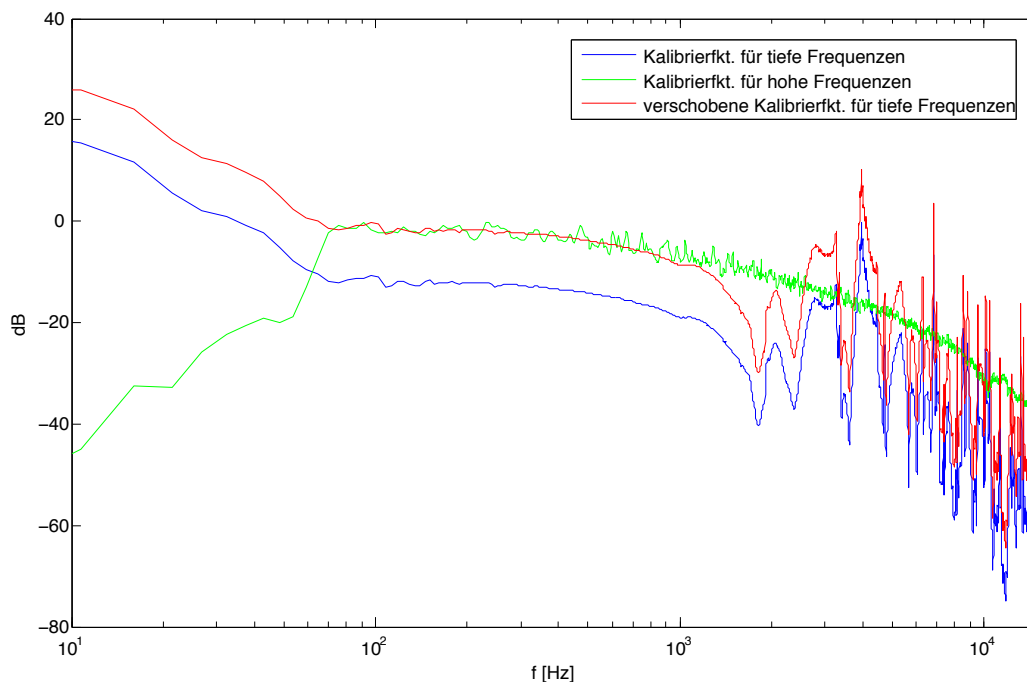


Abb. 2.14: Zusammenfassen der Kalibrierfunktionen

In Abb. 2.14 sind die Kalibrierfunktionen und ihre zugehörigen File-Namen dargestellt. pdiff\_mag.dat und pdiff\_phase.dat sind schon fertige Kalibrierfunktionen, der Rest muss noch zusammengesetzt werden.

Zuerst muss die Kalibrierfunktion für tiefe Frequenzen derjenigen für mittlere und hohe angepasst werden. Aus Kapitel 2.3 ist bekannt, dass die Kalibrierfunktion für tiefe Frequenzen bis ca. 300Hz und jene für mittlere und hohe Frequenzen ab ca. 150Hz verwendet werden kann. Im Bereich dazwischen haben beide Messungen ihre Gültigkeit.

Um die Kalibrierfunktion für tiefe Frequenzen zu verschieben, wurden daher die Messwerte 30-40 im PAK, die den Frequenzen 160-215Hz entsprechen, gewählt. Von jeder Kalibrierfunktion werden diese Werte gemittelt und dann die Differenz aus den beiden Mittelwerten gebildet, um welche die Kurve für tiefe Frequenzen verschoben wird.



**Abb. 2.15:** Verschieben der Kalibrierfunktion für tiefe Frequenzen

Nun werden die Funktionen zusammengesetzt. Von den Werten 0-30 (ca. 0 - 160Hz) wird die Kalibrierfunktion für tiefe Frequenzen gewählt, im Übergangsbereich (Werte 31-70, ca. 160Hz - 370Hz) werden für jeden Frequenzpunkt die Werte beider Kurven gemittelt und ab Wert 71 wird die Kurve für mittlere und hohe Frequenzen verwendet (siehe Abb. 2.16). Das zugehörige Matlab-Skript befindet sich im Anhang.

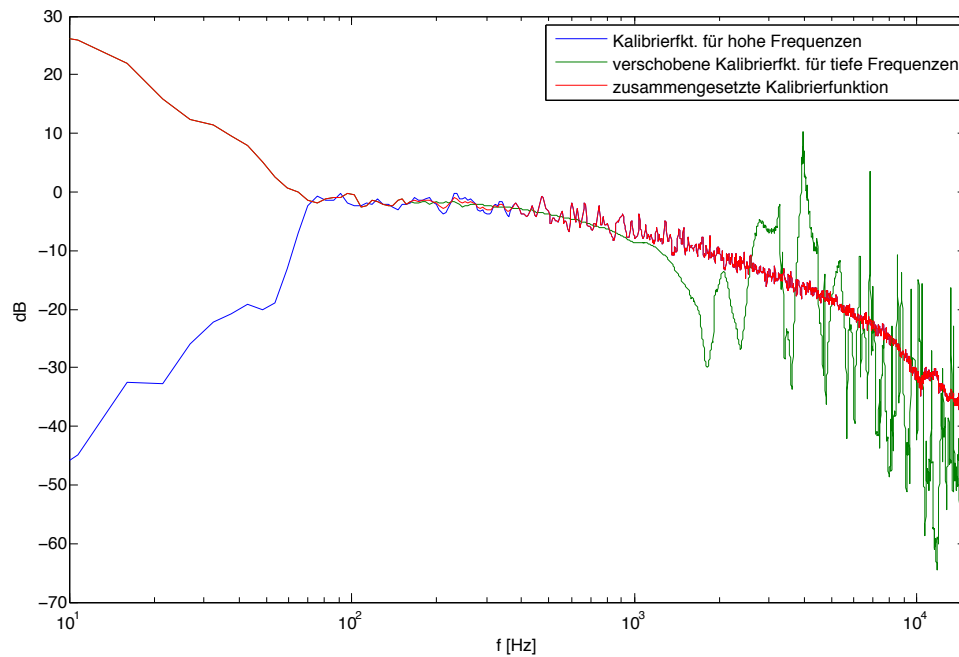


Abb. 2.16: Zusammengesetzte Kalibrierfunktion

## 2.4 Vergleich der Kalibriermethoden

Nachdem nun drei verschiedene Kalibriermethoden behandelt wurden, stellen sich Fragen wie etwa, welches Verfahren vorrangig verwendet werden soll, wo Unterschiede bestehen und in welchen Bereichen man wirklich genau messen kann.

Dazu wurde eine Test-Messung mit einem Genelec 1030a-Studiomonitor in einem Abstand von 15cm durchgeführt. Der geringe Abstand wurde einerseits gewählt, um bei geringeren Pegeln messen zu können und andererseits, weil hier der Nahbesprechungseffekt bei tiefen Frequenzen der Schallschnelle sehr schön sichtbar wird. In Abb. 2.17 ist der Messaufbau zu sehen.



Abb. 2.17: Messaufbau Genelec

Abb. 2.18 zeigt den Frequenzgang des verwendeten Genelec-Studiomonitors.

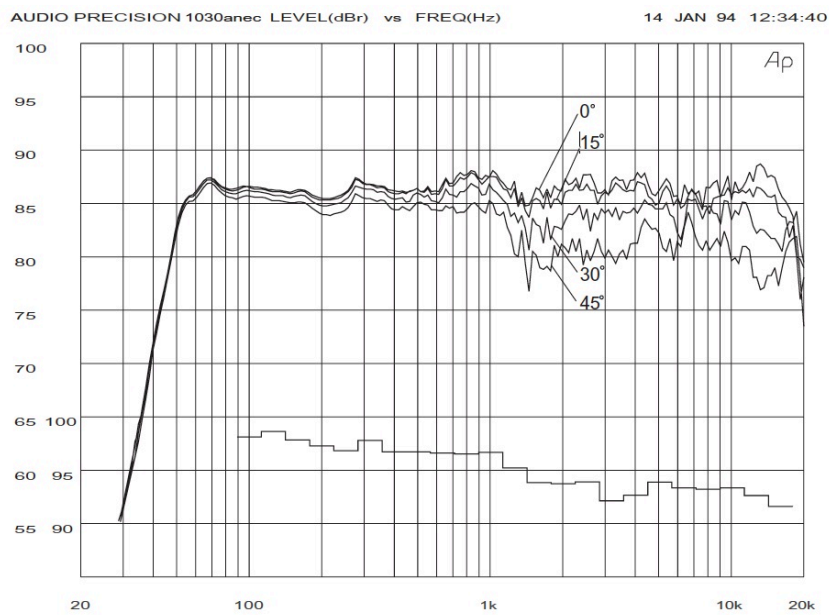


Abb. 2.18: Frequenzgang Genelec 1030a [GEN, S.4]

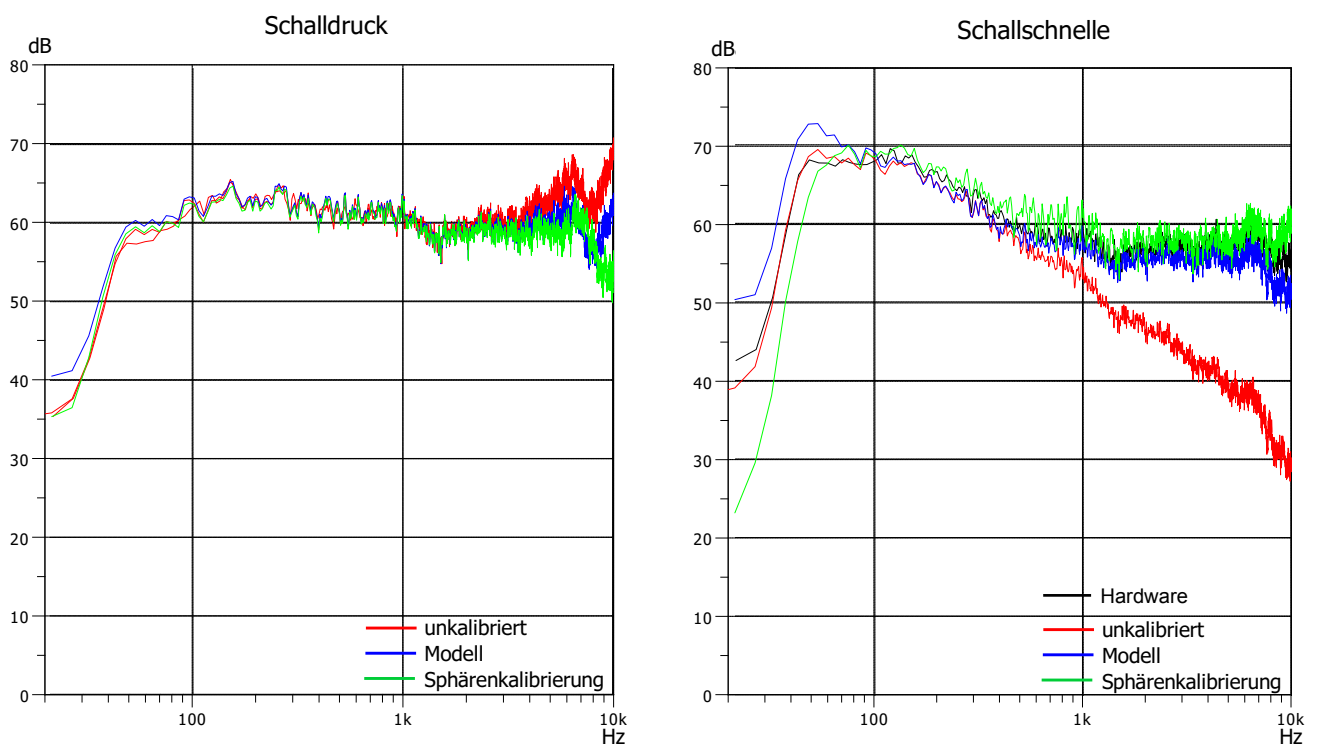


Abb. 2.19: Ergebnisse der Testmessung mit verschiedenen Kalibriervarianten

Abb. 2.19 zeigt die Amplitudengänge von Schalldruck und Schallschnelle bei der Testmessung mit dem Genelec-Studiomonitor unter Berücksichtigung verschiedener Kalibriermethoden. Zu sehen ist der Vergleich der unkalibrierten Signale (rot), der Software-Kalibrierung mittels mathematischem Modell (blau) und der Sphärenkalibrierung (grün) zu sehen und Hardware-Kalibrierung (Schwarz). Die rote Kurve des Schalldrucks entspricht ebenso der Hardware-Kalibrierung, da der Drucksensor nicht vom Signalaufbereiter beeinflusst wird.

Allgemein entsprechen die Messergebnisse des Schalldrucks ungefähr dem im Datenblatt des Lautsprechers angegebenen Frequenzgang. Die untere Grenzfrequenz, bei der der Pegel stark abfällt, liegt in allen Fällen ca. bei 50Hz. Leichte Abweichungen erkennt man daran, dass der Pegel im Datenblatt rund um 1kHz höher als bei ca. 200Hz ist, bei der Messung mit der pv-Sonde ist dies aber umgekehrt. Vergleicht man die verschiedenen Kalibrierungsarten miteinander, erkennt man zwischen 100Hz - 2kHz eine absolute Übereinstimmung. Bei tieferen und höheren Frequenzen kommt es zu leichten Abweichungen (siehe unten). Unkalibriert ist der Schalldruckpegel ab ca. 3kHz eindeutig zu hoch, was aber durch die Kalibrierung ausgeglichen wird. Die Kalibrierverfahren mit Modell und Sphärenkalibrierung liefern bis ca. 8kHz annähernd gleiche Ergebnisse, danach sind die Werte der Sphärenkalibrierung allerdings zu gering, wenn man es mit dem Frequenzgang aus dem Datenblatt vergleicht. Wird die Hardware-Kalibrierung verwendet, entsprechen die Messwerte ziemlich genau den unkalibrierten, was erwartet wurde, nachdem der Drucksensor vom Signalaufbereiter nicht beeinflusst wird.

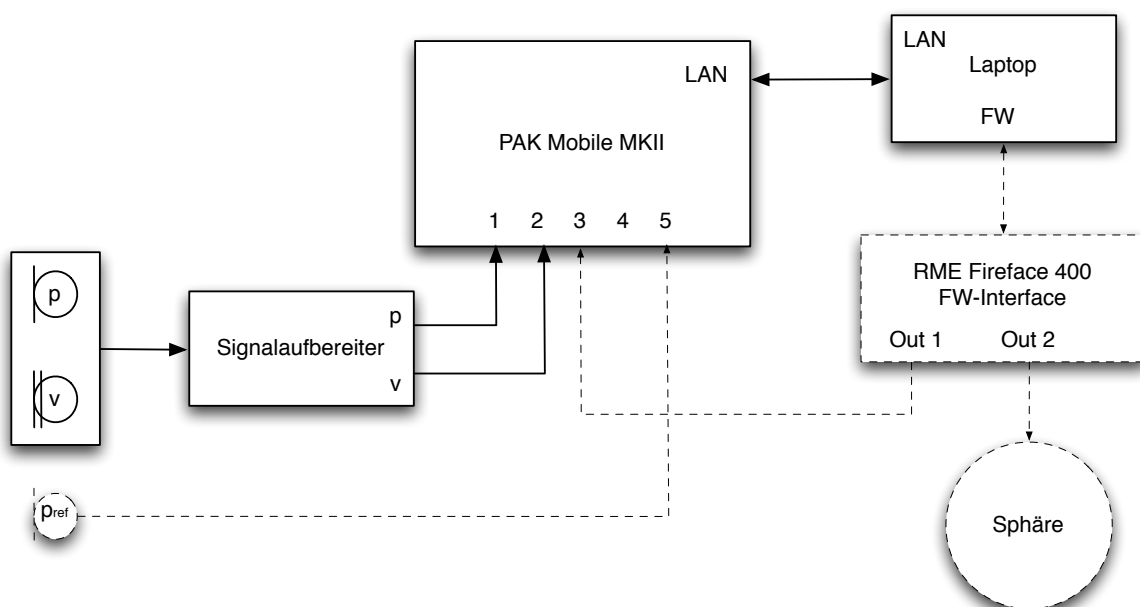
Die Ergebnisse der Schallschnelle sind noch um einiges interessanter. Zunächst erkennt man in allen Kurven einen Pegelanstieg bei tiefen Frequenzen (bis zur Grenzfrequenz, wo der Pegel wieder stark abfällt). Dies ist auf den geringen Abstand der Sonde zum Lautsprecher und demnach der Ausprägung des Nahbesprechungseffekts zurückzuführen. Bei sehr tiefen Frequenzen gibt es eine große Differenz zwischen den Kalibrierungsmethoden, wobei besonders auffällig ist, dass mit Verwendung des Modells der Schnellepegel höher und bei Verwendung der Sphärenkalibrierung der Pegel niedriger wird. Das könnte darauf zurückzuführen sein, dass bei der Sphärenkalibrierung das Hintergrundrauschen mitgemessen und zusätzlich berücksichtigt wird, hingegen bei Verwendung des Modells nicht. Auffällig ist weiters, dass beide Kalibriervarianten über den mittleren und höheren Frequenzbereich ähnliche Ergebnisse liefern, jedoch konstant um ein paar dB versetzt. Die Kurve mit Hardware-Kalibrierung entspricht bei tiefen Frequenzen der unkalibrierten Messung und bei höheren der mit Modell-Kalibrierung, was ebenfalls wieder den Erwartungen entspricht, da bei der Hardware-Kalibrierung nur hohe Frequenzen ausgeglichen werden.

Schlussendlich muss man aber sagen, dass der Vergleich mit einer kalibrierten pp-Sonde notwendig wäre, um wirklich verlässliche Aussagen treffen zu können und zu entscheiden, welche Kalibriermethode die genaueste ist.

## 3 Messablaufsteuerung in PAK

Dieses Kapitel behandelt den genauen Ablauf einer Messung mit der pv-Sonde und zusätzlich die Durchführung der Sphärenkalibrierung, falls diese gewünscht ist. Dabei wird zunächst auf den Messaufbau und die benötigten Komponenten eingegangen, dann ausführlich das PAK-Messsystem und schlussendlich die Messung beschrieben.

### 3.1 Messaufbau



**Abb. 3.1:** Messaufbau (strichliert: Sphärenkalibrierung)

Der Messaufbau für eine einfache Messung ohne Sphärenkalibrierung ist sehr einfach gehalten: Die pv-Sonde wird mittels LEMO-Stecker mit dem Signalaufbereiter verbunden. Die einzeln ausgeführten Signalausgänge für p und v werden über BNC-Kabel und zusätzliche Adapterkabel (bei PAK inkludiert) an die Eingänge 1 & 2 angeschlossen. Das PAK-System wird über ein Ethernetkabel mit dem Laptop verbunden, auf dem die PAK-Software installiert ist.

Plant man zusätzlich eine Sphärenkalibrierung, sind noch ein paar zusätzliche Elemente notwendig: Ein Referenzmikrofon (G.R.A.S. 40AD), ein Audio-Interface (RME Fireface 400) und der Sphärenlautsprecher.

## 3.2 PAK-Messsystem

Das von uns verwendete Messsystem ist das PAK Mobile MKII von Müller-BBM. Es handelt sich um ein mehrkanaliges Messinterface mit 12 ICP-Eingängen, welches über LAN mit dem Computer und der entsprechenden Messsoftware (PAK 5.7) verbunden wird.



Abb. 3.2: PAK Mobile MKII - Messsystem

Im Folgenden werden die grundlegend erforderlichen Einstellungen beschrieben.

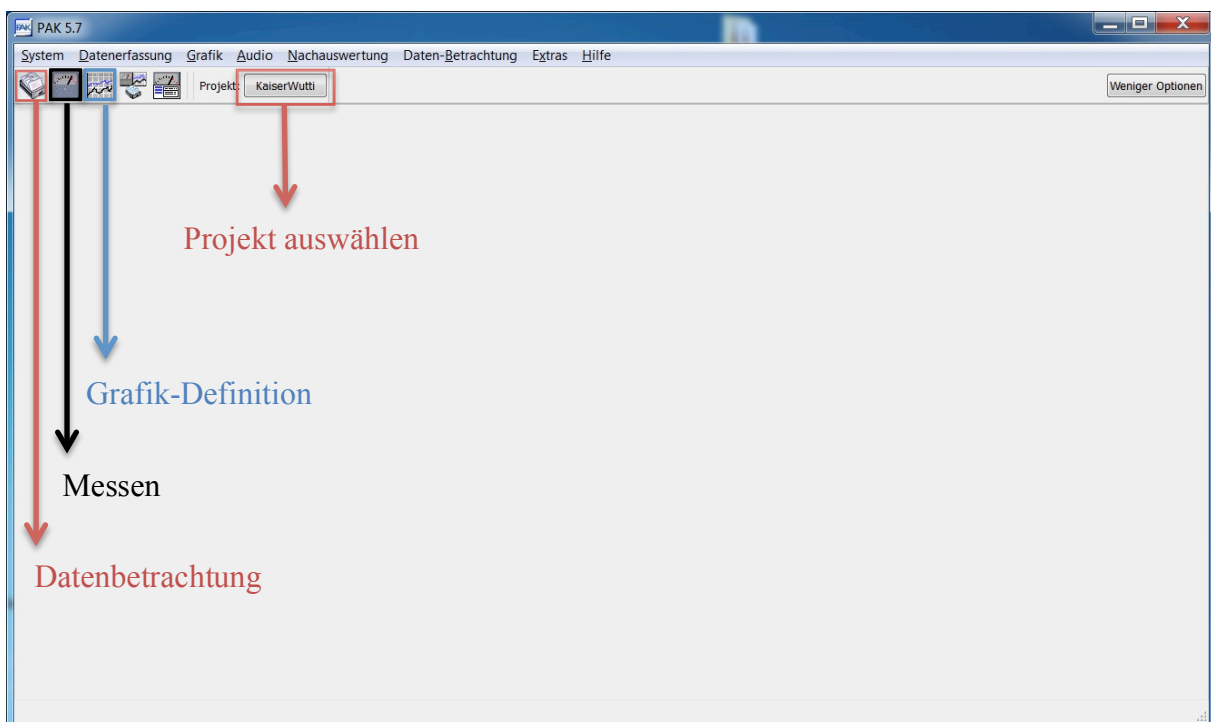


Abb. 3.3: PAK-Hauptfenster



Wird die PAK 5.7 Software gestartet, erscheint das in Abb. 3.3 dargestellte Hauptfenster. Als allererstes muss entweder ein neues Projekt erstellt, oder ein vorhandenes ausgewählt werden. Zum Messen mit der pv-Sonde sind bereits alle nötigen Einstellungen unter dem Projekt "pv-Sonde" gespeichert und dieses kann verwendet werden. Will man dennoch ein eigenes Projekt erstellen, geschieht dies, indem man im Windows Explorer unter "D:\Messdaten\" einen neuen Ordner erstellt. Der Name des Ordners bestimmt den Namen des Projekts. Erst dann kann im PAK das Projekt ausgewählt werden. Alle Messdaten sowie Einstellungen werden in diesem Projektordner gespeichert.

Weitere im Hauptfenster wichtige Auswahlmöglichkeiten sind:

- Datenbetrachtung
- Messen
- Grafik-Definition

In der Datenbetrachtung können vorhandene Messungen betrachtet und verglichen werden, der Messen-Button ruft die Messdefinition auf und die Grafik-Definition bietet Einstellungen zur grafischen Auswertung.

### 3.3 Messdefinitionen

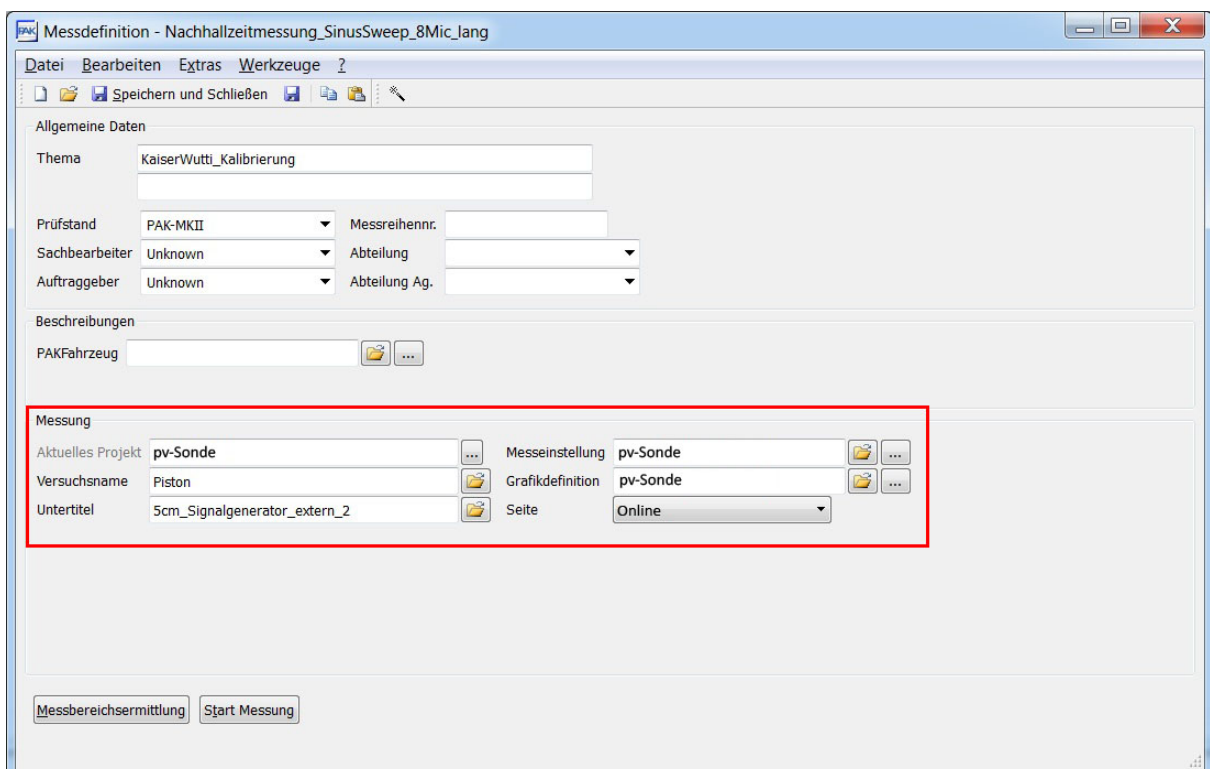


Abb. 3.4: Messdefinitionen

Im Fenster "Messdefinition" können zunächst Zusatzinformationen wie Thema, Prüfstand etc. eingegeben werden, wichtig aber sind die Einstellungen unter dem Punkt "Messung". Versuchsname und Untertitel bestimmen, unter welchem Namen die Messung abgespeichert wird. Bei "Messeinstellung" können vorab gespeicherte Einstellungen geladen ("pv-Sonde")

und falls nötig angepasst, oder eigene Messeinstellungen gespeichert werden. Das selbe gilt für den Punkt "Grafikdefinition" ("pv-Sonde").

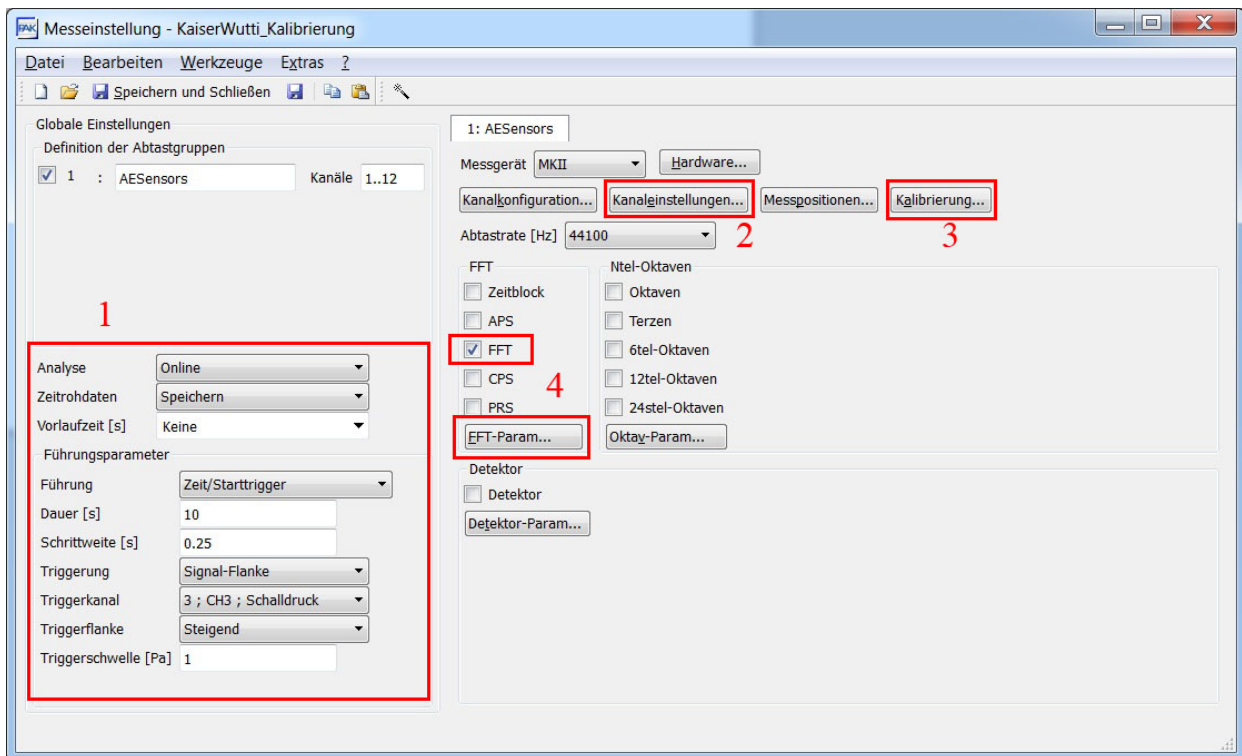


Abb. 3.5: Messeinstellung

1. Die wichtige Einstellung ist der "Führungparameter". Für die Sphärenkalibrierung wird Zeit/Starttrigger ausgewählt, da man damit den Start der Messung auf den internen Signalgenerator (siehe Kapitel 3.6) abgleichen kann. Getriggert wird auf Kanal 3, an dem das Signal des Signalgenerators anliegt (siehe Abb. 3.1). Bei einer Messung wird "Zeit" als Führungsparameter gewählt, da hier keine Triggerung erforderlich ist.
2. Bei "Kanaleinstellungen" werden die gewünschten Kanäle aktiviert und die Messgrößen (Schalldruck, Schallschnelle) eingestellt. Für die pv-Sonde (Kanäle 1 und 2) und das Triggersignal (Kanal 3) wird unter dem Punkt Eingang "Spannung" und als Masseführung "Geerdet" gewählt. Für das G.R.A.S. Referenzmikrofon wird "ICP" und "Differenziell" gewählt und daher muss dieses auf Kanal 5 anstatt Kanal 4 angeschlossen werden, da innerhalb eines Moduls nur entweder "Spannung" oder "ICP" gewählt werden kann (Modul 1: Kanäle 1-4, Modul 2: Kanäle 5-8, Modul 3: Kanäle 9-12). Zusätzlich wird unter dem Punkt "TEDS auslesen" der Kalibrierfaktor des Referenzmikrofons ausgelesen, der nachher unter "Kalibrierung" (Punkt 3) zu sehen ist.

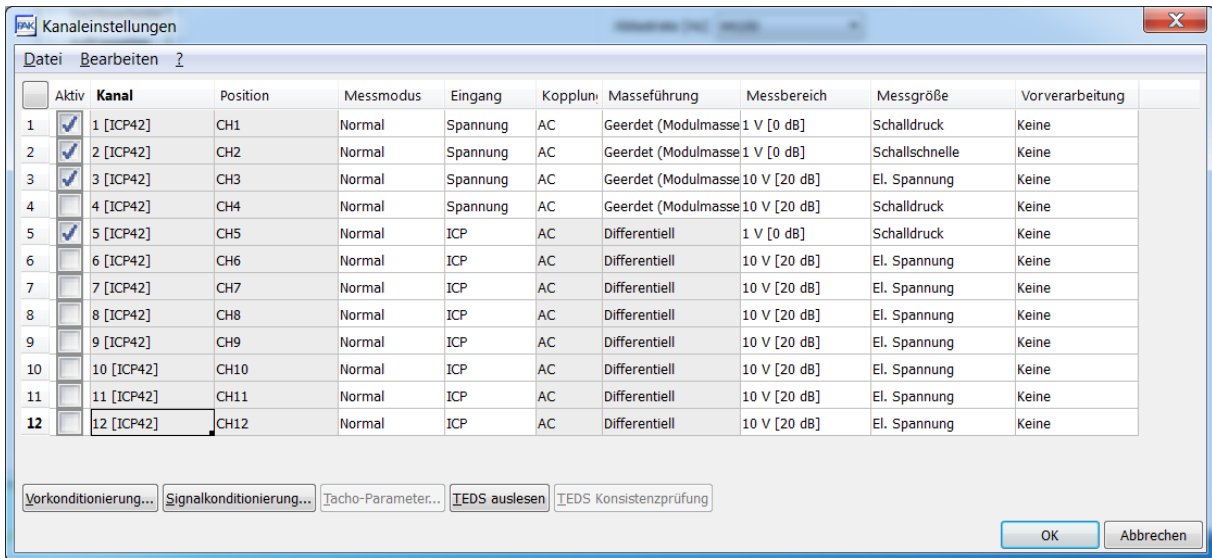


Abb. 3.6: Kanaleinstellungen

- Unter "Kalibrierung" werden die Kalibrierfaktoren entweder bei bekannten Werten manuell eingestellt, oder z.B. mithilfe eines Kalibrators ermittelt (Kalibrierung starten). Falls unter Punkt 2 die TEDS Werte ausgelesen wurden, wird der Kalibrierfaktor für das Referenzmikrofon bereits angezeigt. Für die pv-Sonde wurde die Empfindlichkeit aus den Datenblättern ausgelesen und manuell eingestellt (für Schnellesensor bei 250Hz und für Drucksensor bei 1000Hz).

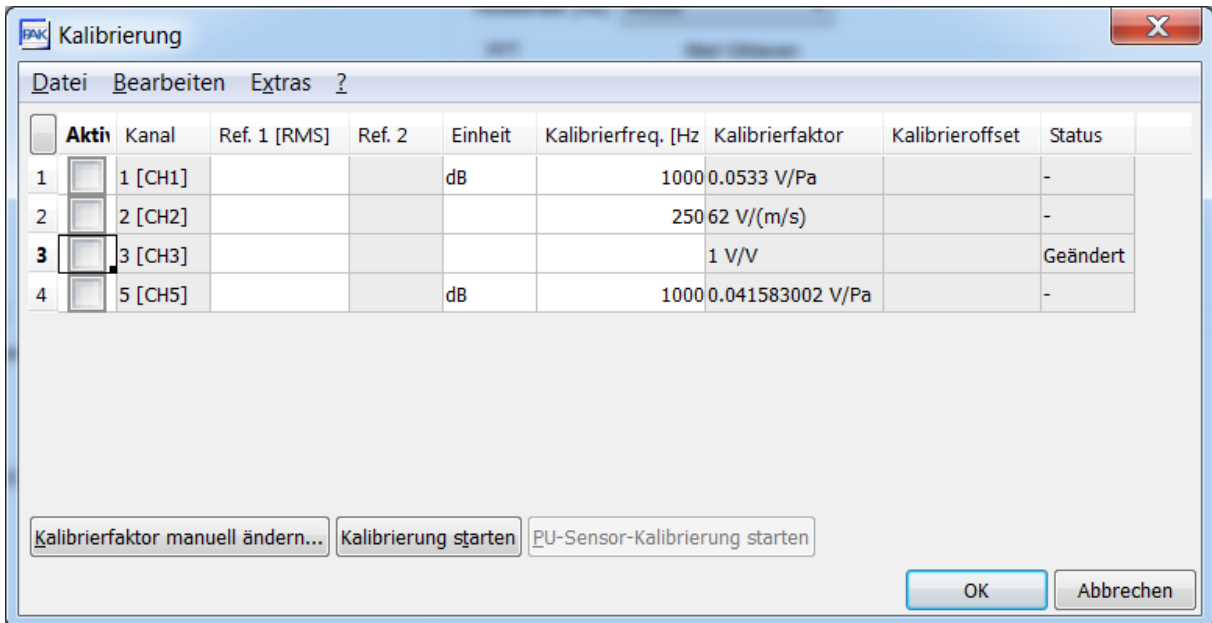


Abb. 3.7: Kalibrierung

- In diesem Bereich kann eingestellt werden, welche Verarbeitung bereits in der PAK-Hardware geschieht und welche Daten zusätzlich zu den Zeitrohdaten gespeichert werden. FFT muss hier ausgewählt werden (nötig für die späteren Berechnungen). In folgender Abbildung sind die eingestellten "FFT-Parameter" ersichtlich.

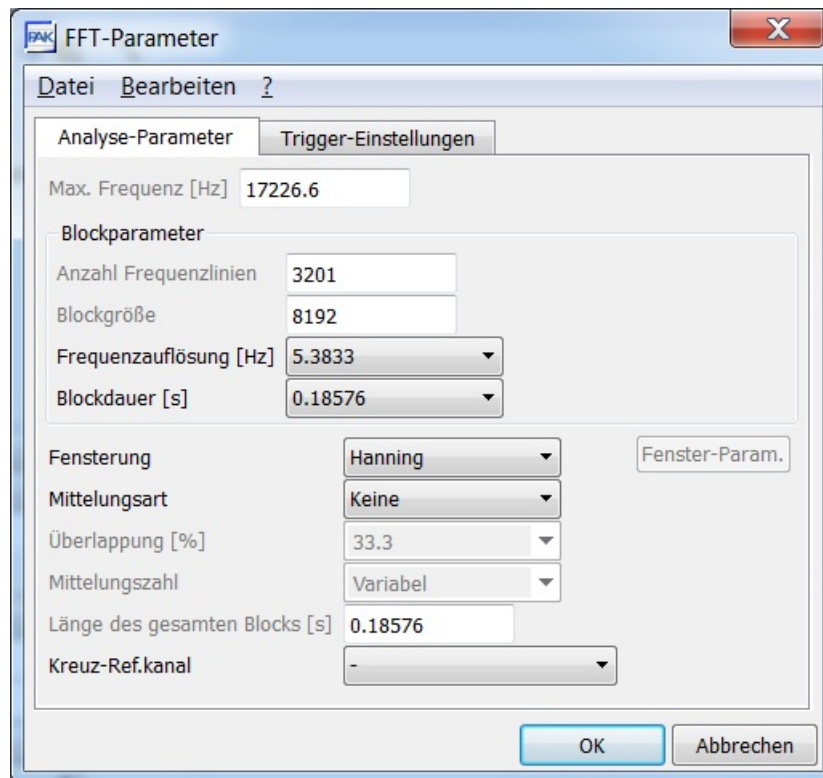


Abb. 3.8: FFT-Parameter

Ein wichtiger Parameter bei der Durchführung der FFT ist die gewünschte Frequenzauflösung. Diese wurde von uns zu 5,3833Hz gewählt, um bei tiefen Frequenzen eine noch ausreichende Auflösung und bei hohen nicht unnötig viele Frequenzpunkte zu erhalten. Daraus ergeben sich die Anzahl der Frequenzlinien und die maximale Frequenz, für welche die FFT berechnet werden kann. 17226,6Hz sind dafür ausreichend, da man mit der pv-Sonde nur bis ca. 10kHz messen kann.

### 3.4 Grafikdefinitionen

Mit den Grafikdefinitionen ist es möglich, die Messergebnisse in Diagrammen darstellen zu lassen. Die Einstellungen für die Anzeige werden in der Datendefinition gespeichert und müssen für jedes Diagramm einzeln erfolgen. Unter "Messungsname" wird angegeben, ob die Messungen direkt angezeigt werden (Letzte Messungen), oder zusätzliche Berechnungen über die integrierte Arithmetik-Funktion stattfinden.

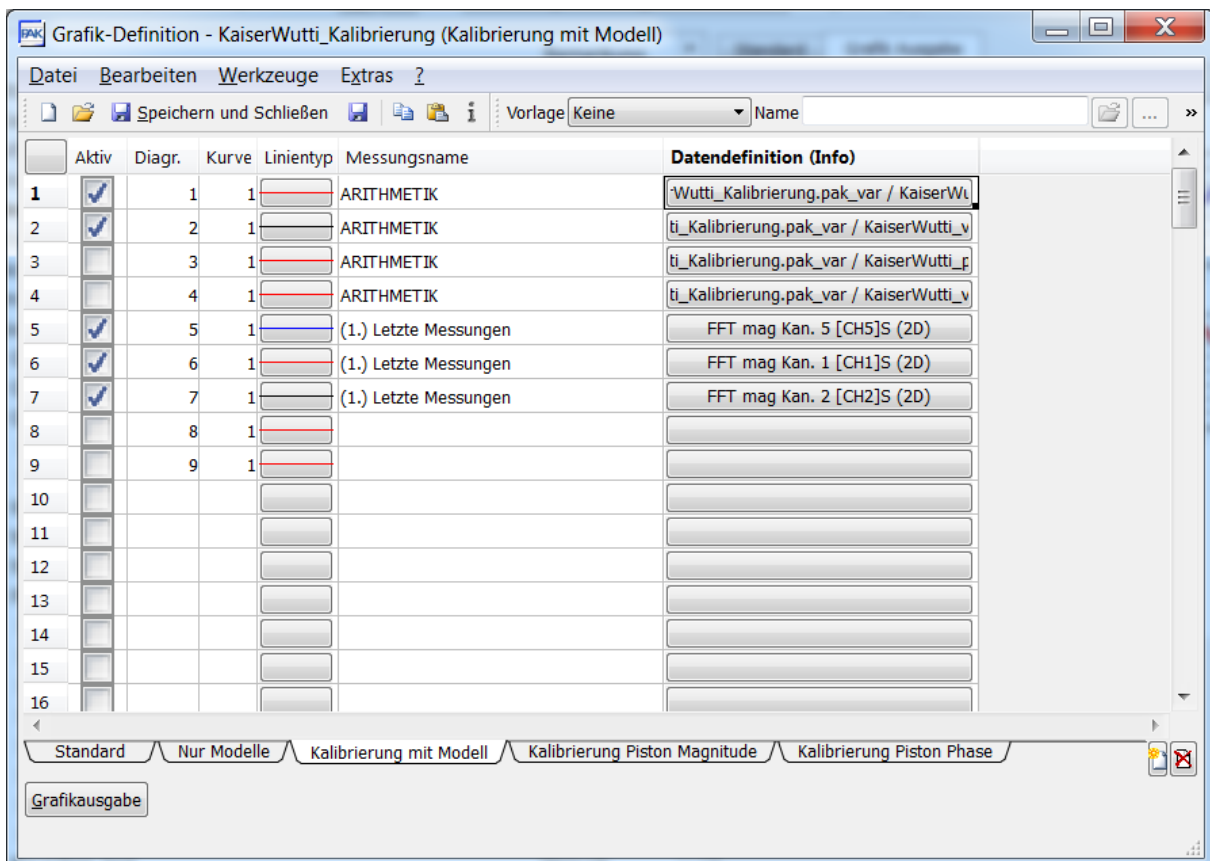


Abb. 3.9: Grafikdefinitionen

Je nach ausgewähltem Messungsname unterscheiden sich die Einstellmöglichkeiten der Datendefinition.

In Abb. 3.10 und Abb. 3.11 sind die Einstellungen für "Letzte Messungen" ersichtlich. Wichtig sind die Register "Datentyp" und "Führungs-Parameter".

Im Register Datentyp wählt man den entsprechenden Kanal aus und als Mess/Grafik-Datentyp FFT-komplex. Die Auswahl FFT-komplex als Mess-Datentyp ist nur vorhanden, wenn bei der Messeinstellung das Häkchen bei "FFT" gesetzt wurde (vgl. Abb. 3.5). Danach kann als Zusatzparameter gewählt werden, ob die Magnitude oder die Phase angezeigt werden soll.

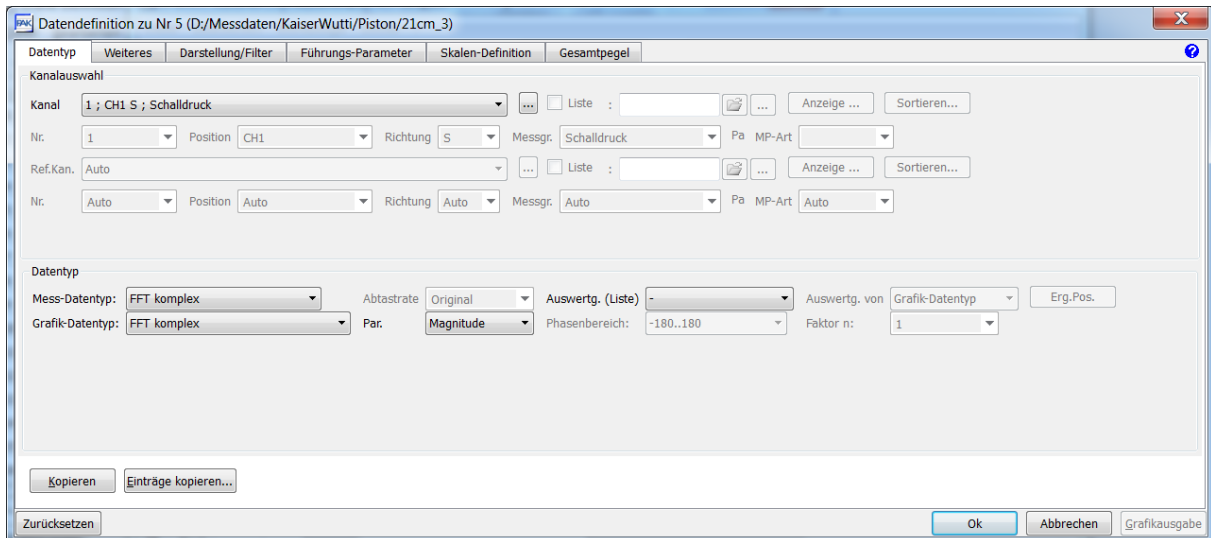


Abb. 3.10: Datendefinition zu Letzte Messungen, Register: Datentyp

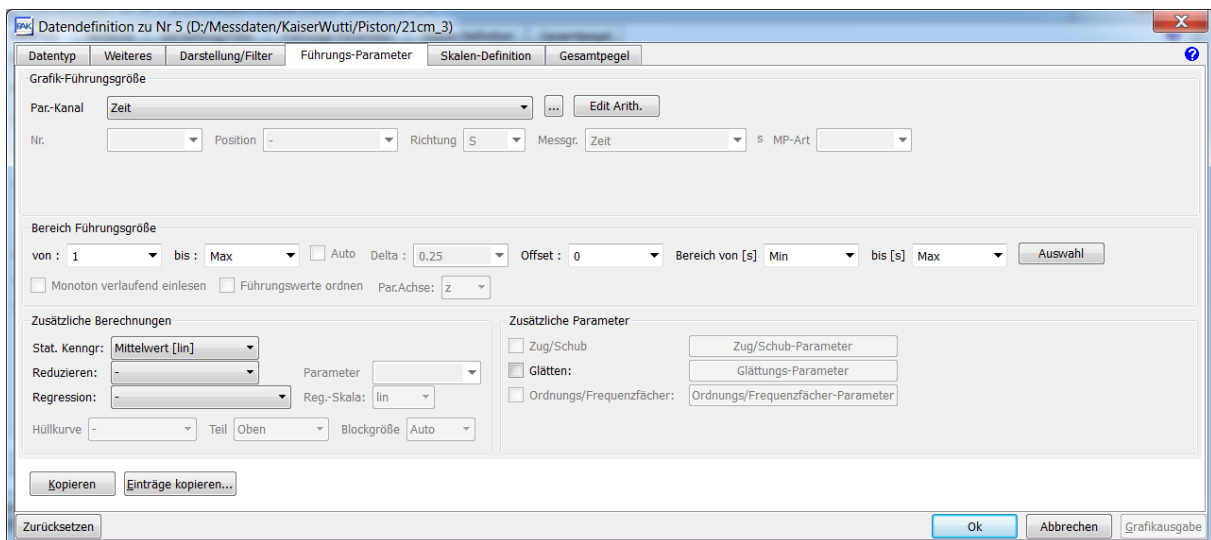


Abb. 3.11: Datendefinition zu Letzte Messungen, Register: Führungsparameter

Unter dem Register "Führungs-Parameter" wird bei "Zusätzliche Berechnungen" die lineare Mittelung über die Zeit (Messstufen) aktiviert um eine 2-dimensionale Frequenz-Amplituden-Darstellung zu erhalten. Ansonsten gibt PAK ein 3-dimensionales Zeit-Frequenz-Amplituden-Diagramm aus. Der Bereich der Führungsgröße muss unbedingt bei 1 beginnen (anstatt Standardeinstellung: "Min"). Ansonsten wird eine Fehlermeldung ausgegeben und kein Diagramm angezeigt.

## Arithmetik

Bei den Datendefinitionen des Messungsnamens Arithmetik (Abb. 3.12) existiert das Register "Variablen" anstatt "Datentyp". Hier werden die Variablen und Formeln ausgewählt und definiert.

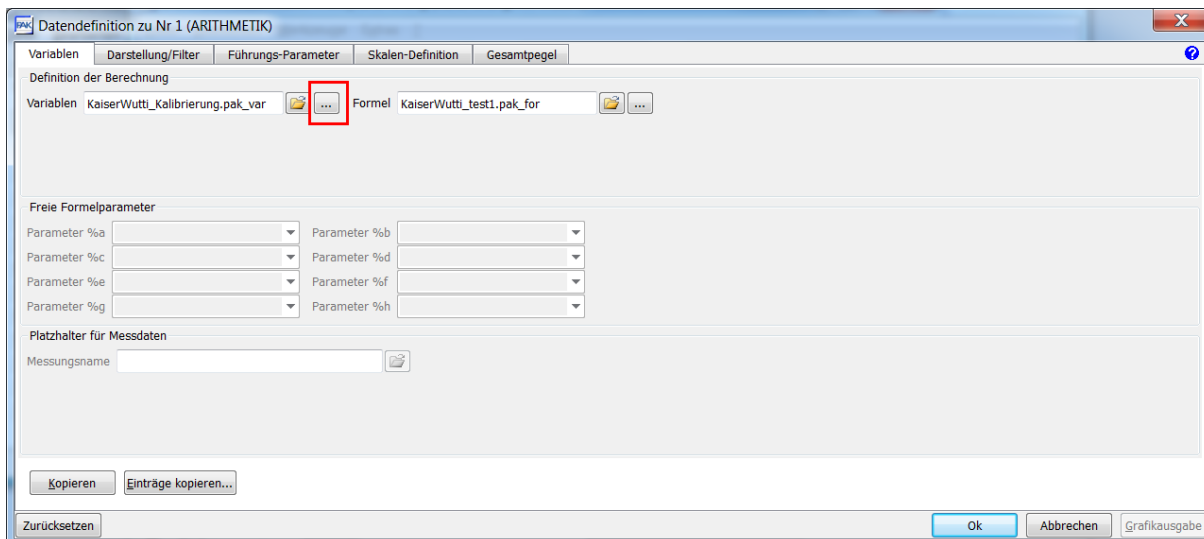


Abb. 3.12: Datendefinition zu Arithmetik

Über die rot markierte Schaltfläche in Abb. 3.12 öffnet sich das Arithmetikfenster. Im Register Variablen werden Variablen definiert, die in den Formeln benötigt werden. In unserem Fall sind es die Fouriertransformierten der drei Eingangskanäle (daher Messungsname: Letzte Messungen).

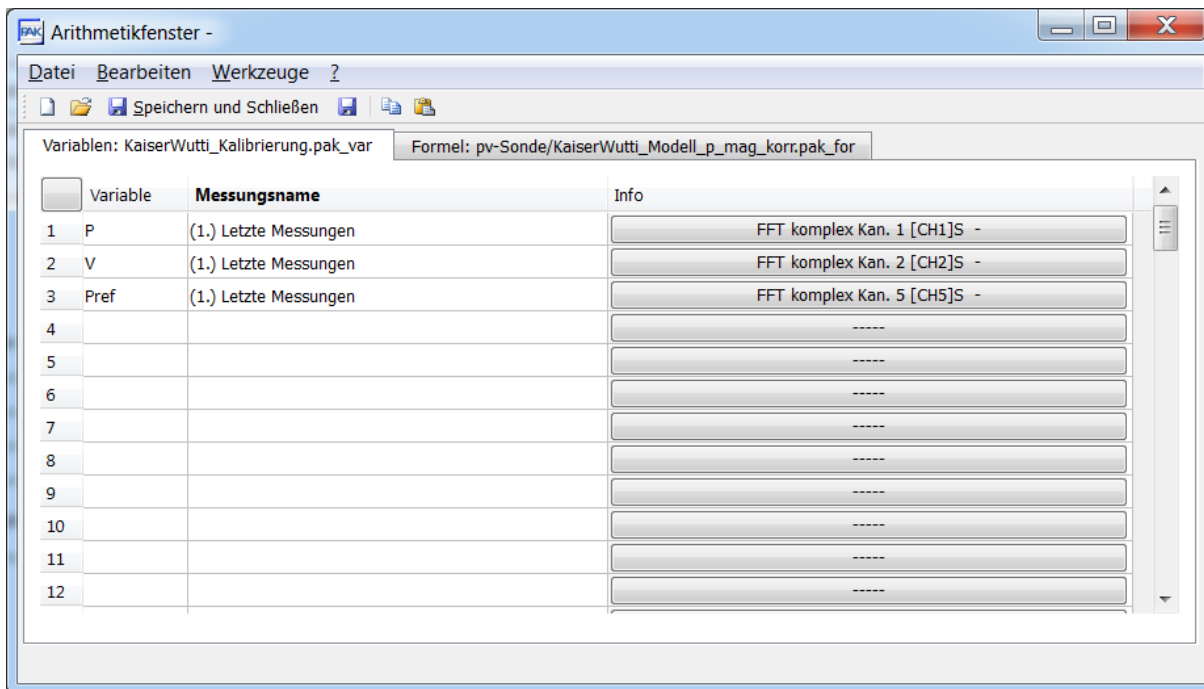


Abb. 3.13: Arithmetikfenster, Register: Variablen

Abb. 3.14 zeigt das Formelfenster der PAK-Arithmetik, in dem die nötigen Rechenoperationen durchgeführt werden. Grundsätzlich existiert eine Vielzahl von vordefinierten Funktionen, auf die man zugreifen kann. Das Ergebnis wird mit dem letzten Befehl „RESULT“ ausgegeben.

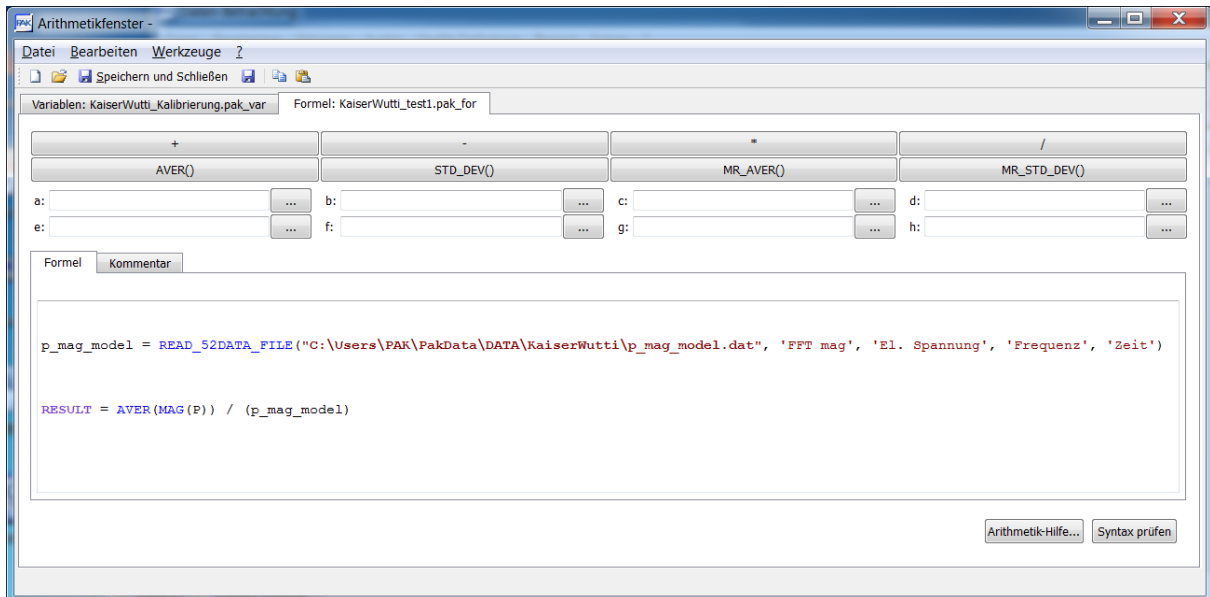


Abb. 3.14: Arithmetikfenster, Register: Formel

Für die Berechnungen mit der pv-Sonde waren neben den Grundrechnungsarten nur folgende spezielle Befehle relevant:

**READ\_52DATA\_FILE**("Dateipfad", 'Datentyp', 'El. Spannung', 'Frequenz', 'Zeit')  
**WRITE\_52DATA\_FILE**(Variable, "Dateipfad", BIN, NEW\_FILE, "in")  
**AVER**(Variable)



## 3.5 Datenbetrachtung

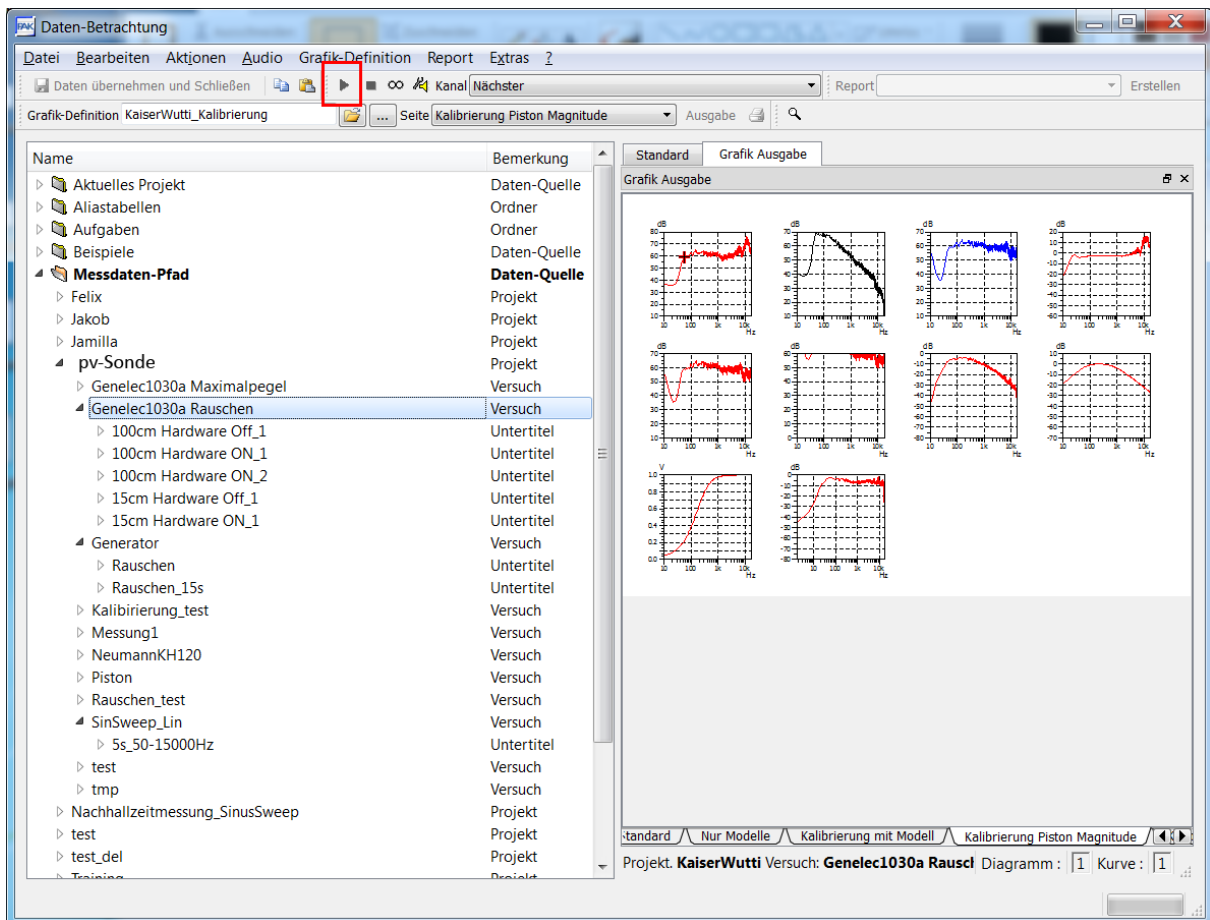


Abb. 3.15: Datenbetrachtung

Über das Hauptfenster (Abb. 3.3) erreicht man die Daten-Betrachtung. Hier sind alle gemessenen Daten nach folgender Struktur geordnet:

- Projektname
  - Versuchsname
    - Untertitel

Bei "Grafik-Definition" muss die eigene Grafik-Definition ausgewählt werden ("pv-Sonde"), die bestimmt, in welcher Form die Messdaten angezeigt werden. Mit Rechtsklick auf einen Untertitel (=Messung) → "Grafikausgabe" wird eine Vorschau der Daten im Datenbetrachtungs-Fenster angezeigt. Damit wird diese Messung als aktuell ausgewählt und man kann nun darauf auch über das Fenster Grafik-Definitionen (Abb. 3.9) komfortabler zugreifen (skalier- und veränderbare Diagramme).

Über den Wiedergabe-Knopf (rot markiert) können standardmäßig Kanal 1 und 2 einer Messung in Stereo wiedergegeben werden.

## 3.6 Signalgenerator

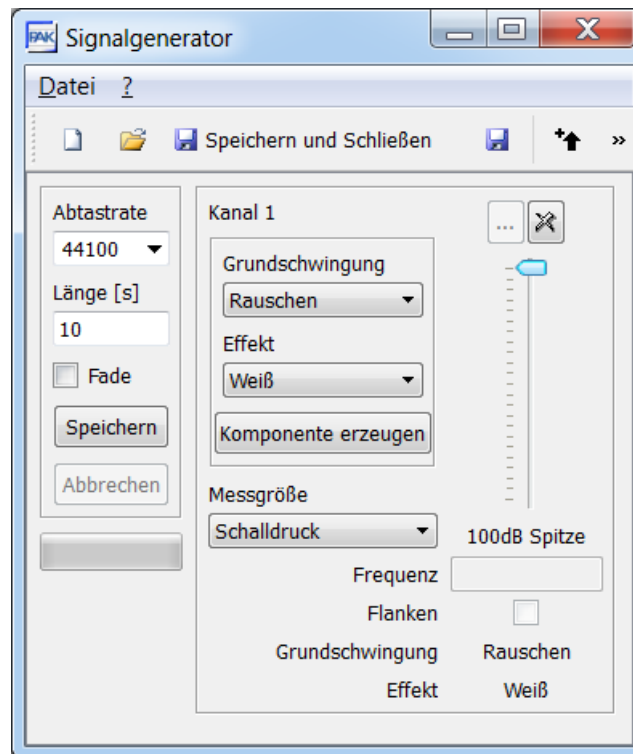


Abb. 3.16: Einstellungen des Signalgenerators

Auf den internen Signalgenerator kann über das Hauptfenster (Abb. 3.3) → Extras → Signalgenerator zugegriffen werden. Hierbei wird kein Signal direkt ausgegeben sondern Daten mit den entsprechenden Einstellungen (Signalform, Länge, Pegel) gespeichert. Auf diese Daten muss dann über die Datenbetrachtung zugegriffen und das Signal dort abgespielt werden (Abb. 3.15, rot markierte Schaltfläche).

Bei der Sphärenkalibrierung wird dieses Signal über das Firewire-Interface ausgegeben, einerseits dem Lautsprecher zugeführt und über einen zweiten Weg wieder ins PAK-System als Triggersignal zurückgeführt (siehe Messaufbau in Abb. 3.1).

## 3.7 Sphärenkalibrierung

Im Folgenden wird der genaue Ablauf der Sphärenkalibrierung beschrieben, unter der Voraussetzung, dass das Projekt "pv-Sonde", die Messeinstellung "pv-Sonde" und die Grafikdefinition "pv-Sonde" gewählt sind (siehe Abb. 3.3 & Abb. 3.4)

1. Messaufbau für mittlere/hohe Frequenzen vorbereiten (siehe Kapitel 0 & 3.1)

1.1. Grafik-Definition aufrufen und im Register "Sphärenkalibrierung" Häcken 1-4 aktivieren → "Speichern und Schließen" drücken

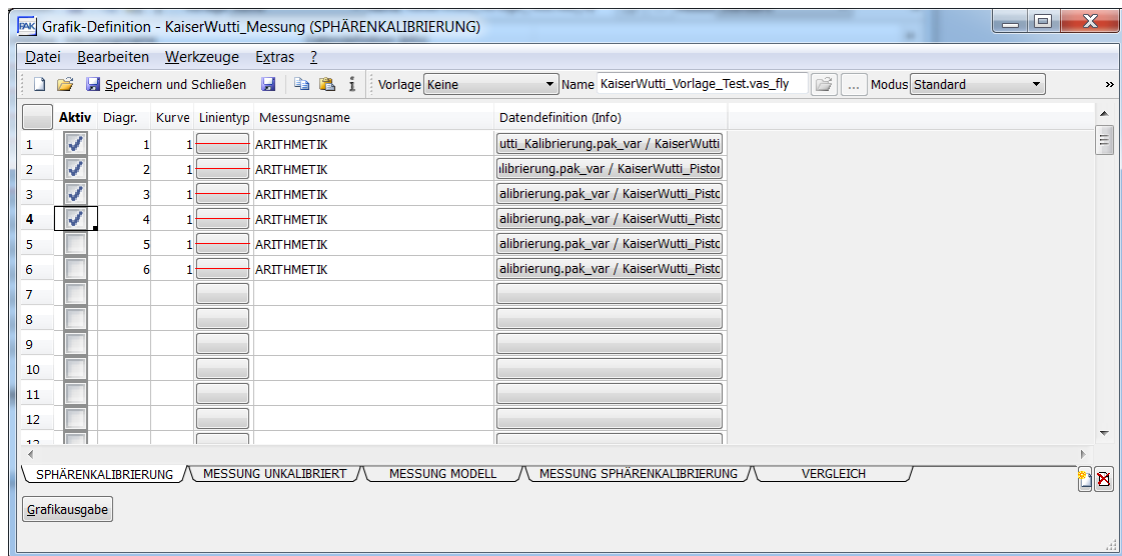


Abb. 3.17: Sphärenkalibrierung Schritt 1

1.2. Im Hauptfenster "Messen" auswählen, neuen Versuchsnamen und Untertitel definieren und "Start Messung" (2) drücken

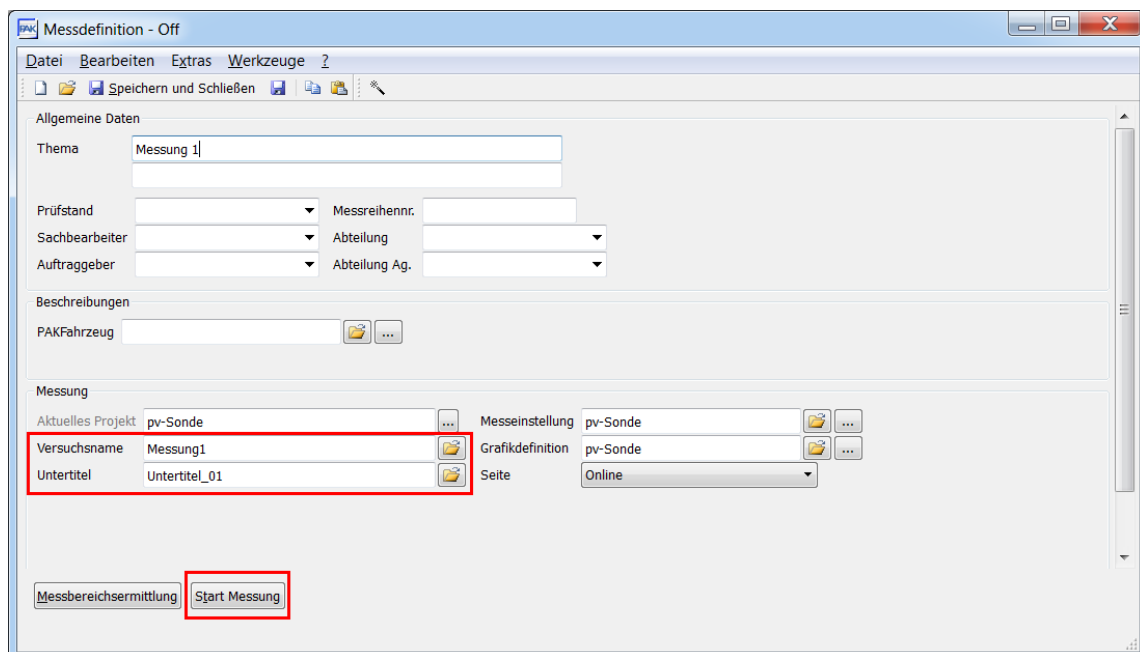


Abb. 3.18: Messung starten

- 1.3. Im neuen Fenster auf Start klicken → Messung wartet (falls Messung trotzdem startet, muss der Starttrigger in den Messeinstellungen aktiviert werden, siehe Abb. 3.5)

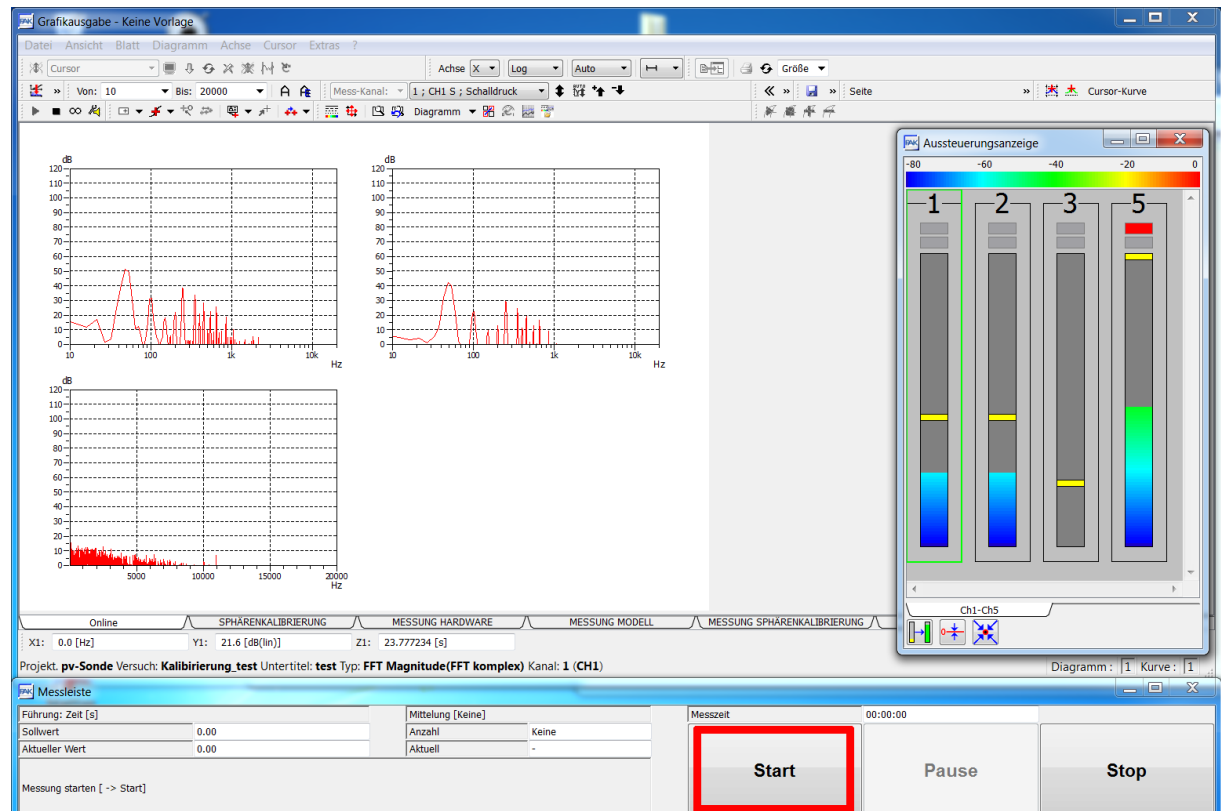


Abb. 3.19: Messfenster

- 1.4. Im Hauptfenster Datenbetrachtung öffnen und unter "Messdatenpfad" → "pv-Sonde" → "Generator" den Untertitel "Rauschen\_15s" auswählen und auf den Abspielknopf drücken → Rauschen wird abgespielt und Messung startet automatisch (siehe Abb. 3.15)
- 1.5. Zurück zum Fenster "Grafik-Definition" und auf Grafikausgabe drücken
- 1.6. Die Kalibrierfunktionen  $vdiff\_mag\_hi$ ,  $vdiff\_phase\_hi$ ,  $pdiff\_mag$  und  $pdiff\_phase$  (Abb. 2.14) werden automatisch abgespeichert

## 2. Messaufbau für tiefe Frequenzen vorbereiten (siehe Kapitel 2.3.2 & 3.1)

- 2.1. Grafik-Definition aufrufen und im Register "Sphärenkalibrierung" Häkchen 1-4 deaktivieren (WICHTIG, sonst werden die Files überschrieben!) und Häkchen 5 & 6 aktivieren → "Speichern und Schließen" drücken

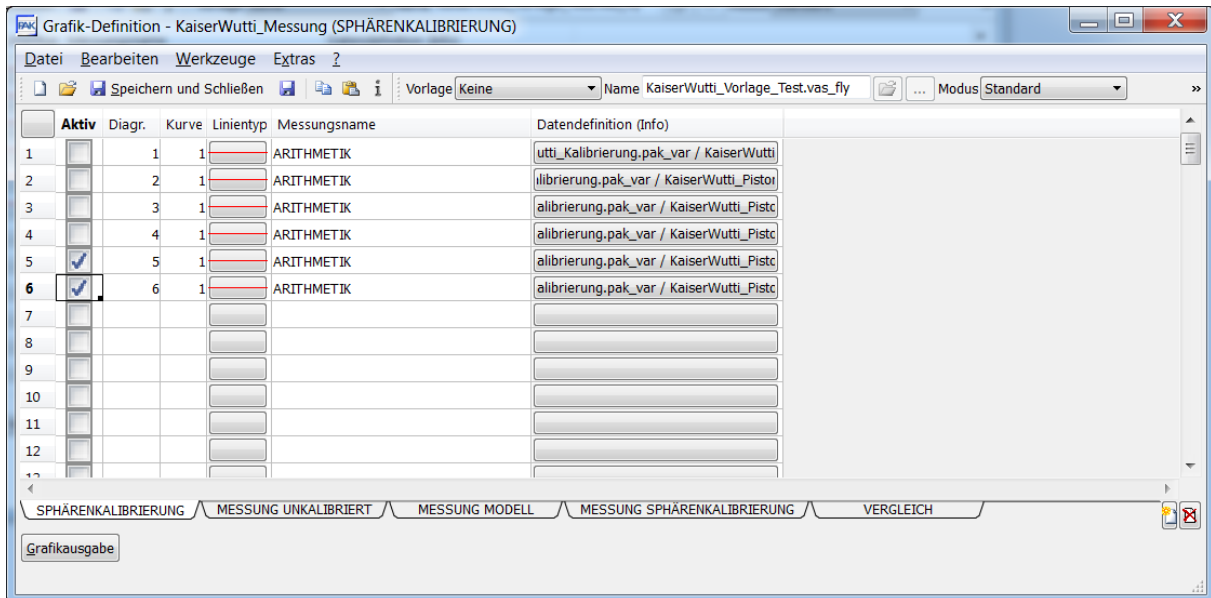


Abb. 3.20: Sphärenkalibrierung Schritt 2

### 2.2. Punkte 1.2 - 1.5 wiederholen

- 2.3. Die Kalibrierfunktionen  $vdiff\_mag\_lo$  und  $vdiff\_phase\_lo$  (Abb. 2.14) werden automatisch abgespeichert

## 3. Matlab starten → Skript "zusammensetzen.m" in "D:\Daten\pv-Sonde" ausführen

## 3.8 Durchführen der Messung

Vor dem Durchführen der Messung muss man sich für eine der drei in dieser Arbeit beschriebenen Kalibrierungsarten entscheiden und je nachdem zusätzliche Schritte durchführen:

- Hardwarekalibrierung: "EQ"-Schalter des Signalaufbereiters auf Schalterstellung "ON"
- Softwarekalibrierung: keine zusätzlichen Schritte erforderlich
- Sphärenkalibrierung: siehe Kapitel 3.7

1. Messaufbau laut Abb. 3.1 vorbereiten
2. Im Hauptfenster der PAK-Software Projekt "pv-Sonde" auswählen



Abb. 3.21: PAK-Hauptfenster

3. Schaltfläche "Messen" drücken → Fenster Messdefinition erscheint

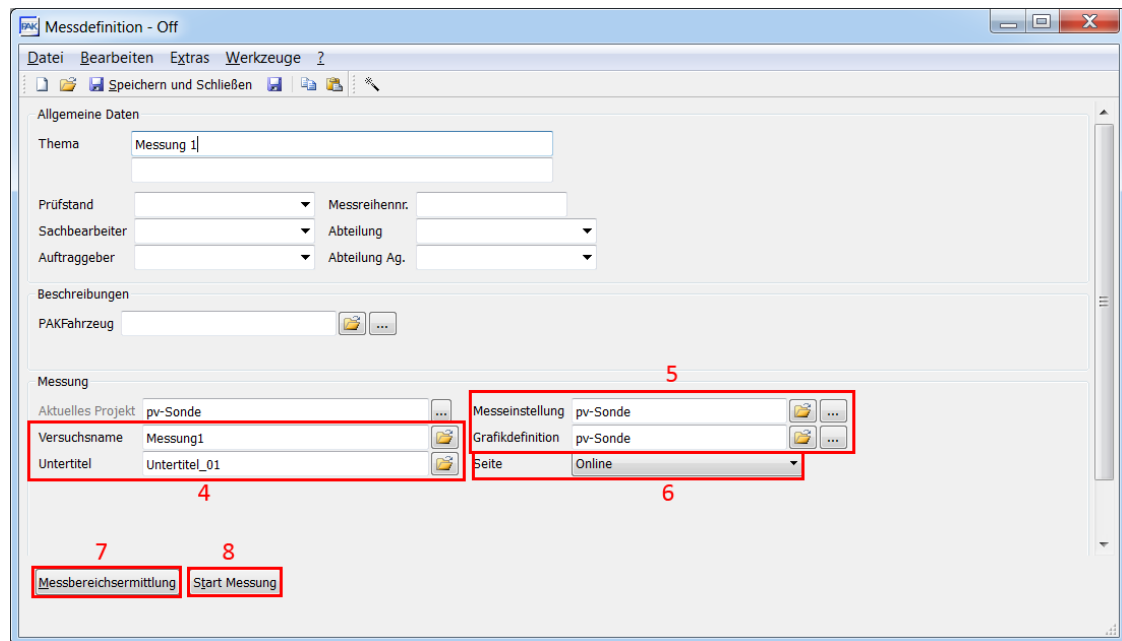


Abb. 3.22: Messdefinition

4. Neuen Versuchsnamen und Untertitel definieren
5. Messeinstellung "pv-Sonde" und Grafik-Definition "pv-Sonde" auswählen
6. Seite "Online" auswählen
7. Messbereichsermittlung zur Pegeleinstellung durchführen
8. "Start Messung" auswählen
9. Im neuen Fenster erneut Start drücken → Messung wird gestartet

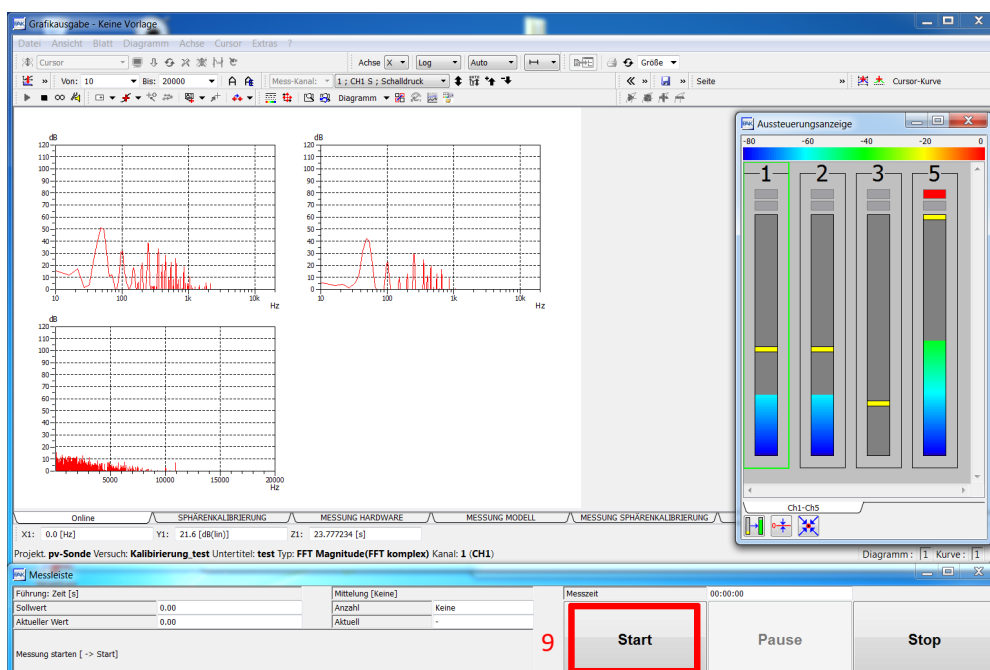


Abb. 3.23: Messfenster

10. Im Hauptfenster Schaltfläche "Grafik-Definition" auswählen

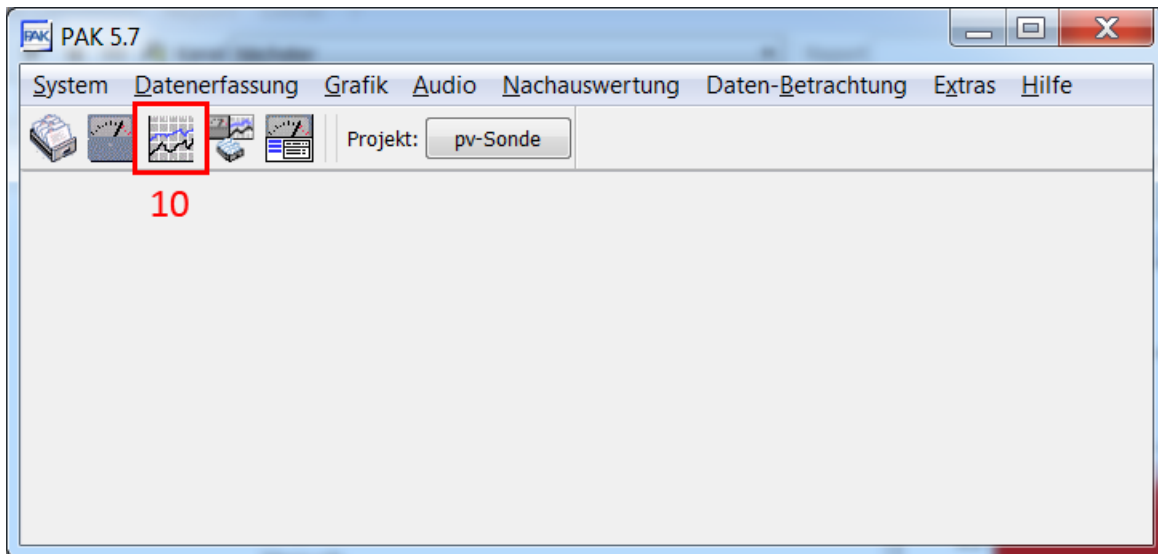


Abb. 3.24: PAK-Hauptfenster

11. Je nach gewählter Kalibrierungsart entsprechendes Register aufrufen

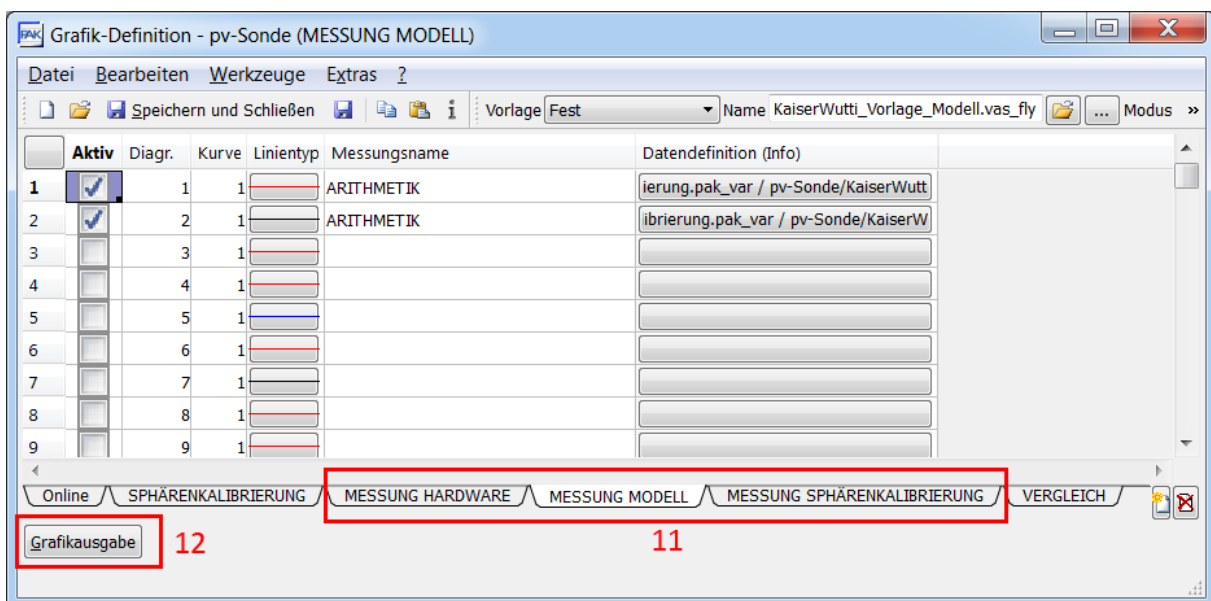


Abb. 3.25: Grafik-Definition



## 12. "Grafikausgabe" wählen → Messung wird angezeigt

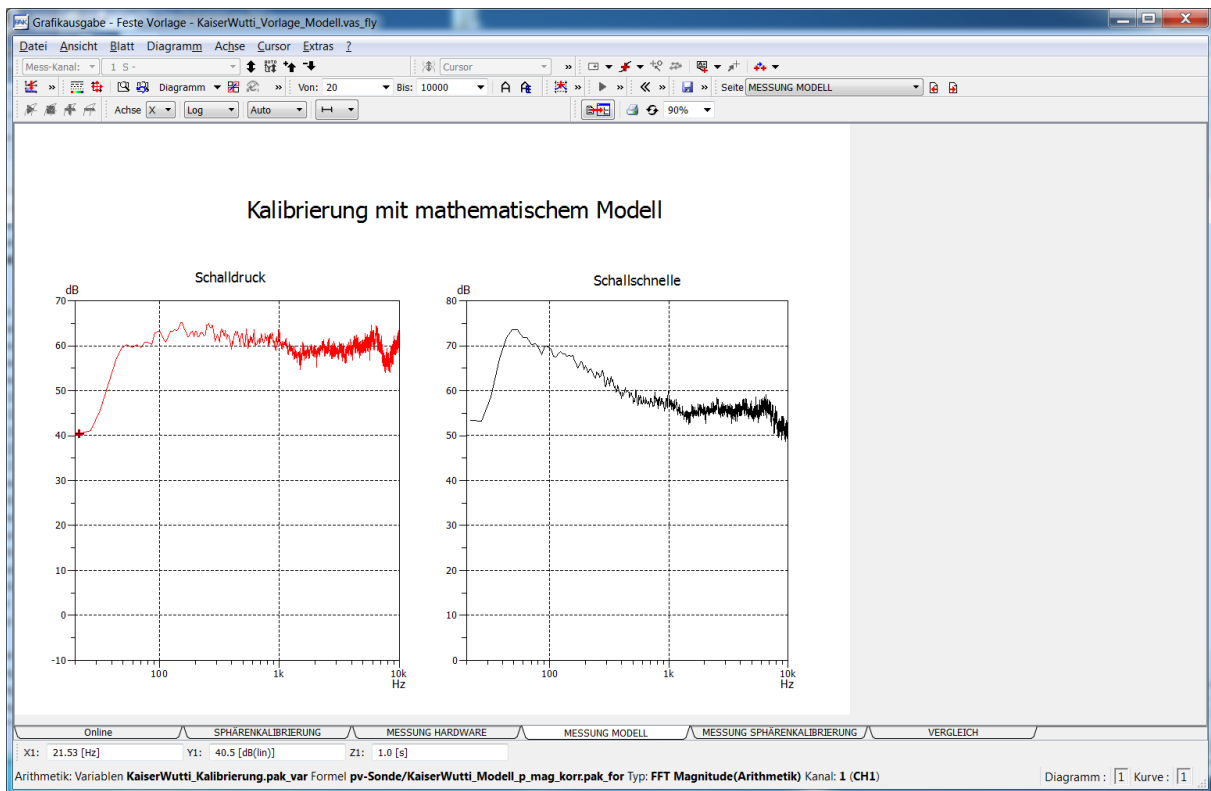


Abb. 3.26: Grafikausgabe

## 4 Ausblick

Mit dieser Arbeit wurde der Weg für die Kalibrierung der pv-Sonde und Messung mit dieser geebnet. Theoretische Zusammenhänge wurden ausgearbeitet und zusammengefasst und mögliche Vor- und Nachteile zur pp-Sonde kurz angesprochen.

Praktisch ist es gelungen, den kompletten Ablauf für eine kalibrierte Messung vorzubereiten, der auch für spätere Verwendung zur Verfügung steht und weiterentwickelt werden kann. Die Amplitudengänge von Druck- und Schnellesensor liefern schlüssige Ergebnisse. In dem für diese Arbeit vorhandenen Zeitrahmen war es jedoch nicht möglich, aussagekräftige Phasengänge zu erhalten, sowie diese zu kalibrieren. Damit können dann genaue Aussagen über weitere Größen wie Impedanz, Schallintensität oder Schalleistung getroffen werden.

Weiters wäre der Vergleich der pv-Sonde mit einer pp-Sonde interessant, um qualitative Aussagen über die Messgenauigkeit sowie die Genauigkeit der Kalibrierungsarten treffen zu können. Die Grenzen sowie Vor- und Nachteile der pv-Sonde, die in dieser Arbeit theoretisch diskutiert wurden, sollten anhand von praktischen Messungen verifiziert werden.

Sind diese Aspekte geklärt, gibt es noch weitere Anwendungsbereiche für die pv-Sonde:

### **Scan&Paint**

Die von der Firma Microflown eigens für die pv-Sonde entwickelte Software bietet die Möglichkeit zur schnellen Schallquellenlokalisierung und Synchronisation mit dazugehörigem Bildmaterial. Mit diesem Verfahren ist es möglich, das Schallfeld anschaulich darzustellen.

### **3D-Darstellung des Schallfeldes**

Die Microflown USP-Sonde (Ultimate Sound Probe) bietet 3 pv-Sonden normal zueinander angeordnet in einem 1/2-Zoll Gehäuse. Dadurch ist es ohne zusätzlichen Aufwand möglich, zur selben Zeit in allen drei Raumdimensionen zu messen und zum Beispiel die Schallintensität in einem 3D-Bild darzustellen.

## 5 Literaturverzeichnis

[BASTEN]

Full bandwidth calibration procedure for acoustic probes containing a pressure and particle velocity sensor, Acoustical Society of America, 2010

[CMANUAL]

Microflown Calibration Software Manual, V1.0 2012-02

[DATASHEET PU REGULAR]

Microflown Technologies Datasheet PU-regular, V1.0 2012-07

[GEN]

Genelec 1030a Manual

[MICROFLOWN 1-5, 15]

The Microflown E-Book Chapter 1-5 & 15, 2007

[RAANGS]

Diplomarbeit "Exploring the use of the Microflown", 2005

[DE BREE]

A particle velocity sensor to measure the sound from a structure in the presence of background noise, Forum Acousticum, 2005

[FINN]

A Comparison of two different sound intensity measurement principles, Acoustical Society of America, 2005

[TIJS]

Verification of PU intensity calculation, Novem Oxford, 2009

[WESELAK] Akustische Messtechnik, Skript zur Vorlesung, Version 6.0

[GRABER] Raumakustik, Skript zur Vorlesung, Version 5.2

# ANHANG

## Z\_modell.m:

```
% Einlesen des Default-Files
[Header, lD, ~, f, ~, ~, ~ ]= pak52_binary_in('default.dat');

% Definition der Grenzfrequenzen
rho = 1.2;
c = 343;
r = 0.23;
k = 2*pi.*f / c;

% Erstellung der Modelle
Z = rho*c*(i .* k .* r) ./ (i .* k .* r + 1);

Z_mag = abs(Z);
Z_phase = phase(Z) * 180/pi;

% Ausgabe in PAK-Datenformat
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, Z_mag, 'z_mag.dat');
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, Z_phase, 'z_phase.dat');
```

## alpha\_modell.m:

```
[Header, lD, ~, f, ~, ~, ~ ]= pak52_binary_in('default.dat');

% Definitionen
d_sphere = 0.101;
d_membran = 0.075;
kappa = 1.4;
p0 = 101325; % Norm auf Meereshöhe

V0 = (4/3)*pi*(d_sphere/2)^3; % Spherenvolumen
A0 = pi*(d_membran/2)^2; % Membranoberfläche

% Erstellung der Modelle
alpha = -1i*2*pi.*f*V0 / (kappa*A0*p0);

alpha_mag = abs(alpha);
alpha_phase = phase(alpha) * 180/pi;

% Ausgabe in PAK-Datenformat

pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, alpha_mag, 'alpha_mag.dat');
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, alpha_phase, 'alpha_phase.dat');
```

**Zusammensetzen.m:**

```
% Einlesen der Kalibrierfunktionen
[Header, lD, ~, f, ~, v_mag_hi, ~ ]= pak52_binary_in('v_diff_mag_hi.dat');
[Header, lD, ~, f, ~, v_mag_lo, ~ ]= pak52_binary_in('v_diff_mag_lo.dat');

rho = 1.2; c = 343;

% Umrechnen in dB
v_mag_hi = 20*log10(v_mag_hi);
v_mag_lo = 20*log10(v_mag_lo);

% Berechnung der Differenz und Verschieben der Tieffrequenz-Messung
delta = mean(v_mag_hi(30:40)) - mean(v_mag_lo(30:40))
v_mag_lo_korr = v_mag_lo + delta

% Zusammensetzen der Kalibrierfunktionen
v_mag_korr = zeros(1,lD);
v_mag_korr(1:30) = v_mag_lo_korr(1:30);
v_mag_korr(31:70) = (v_mag_hi(31:70)+v_mag_lo_korr(31:70))/2;
v_mag_korr(71:lD) = v_mag_hi(71:lD);

v_mag_korr = 10.^(v_mag_korr/20) % Entlogarithmierung

% Ausgabe in PAK-Datenformat
pak52_binary_out(Header, lD, 1, f, 1, v_mag_korr, 'v_mag_korr.dat');
```