

Christof Zarfl, BSc

Implementierung von statischer Druckmessung in einen piezoelektrischen Sensor

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades
Diplom-Ingenieur

Masterstudium Technische Physik



Technische Universität Graz

Betreuer:

Ao.Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roland Resel

Institut für Festkörperphysik

Graz, Mai 2012

Deutsche Fassung:
Beschluss der Curricula-Kommission für Bachelor-, Master- und Diplomstudien vom 10.11.2008
Genehmigung des Senates am 1.12.2008

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 entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am

.....
(Unterschrift)

Englische Fassung:

STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

.....
date

.....
(signature)

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle all jenen danken, ohne die diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre.

Allen voran gilt mein Dank Dr. Alexander Schrickler und Prof. Roland Resel für die exzellente Betreuung in der Piezocryst Advanced Sensorics bzw. an der TU Graz. Ohne die gute Zusammenarbeit und das gegenseitige Verständnis würde die Arbeit in der vorliegenden Form nicht existieren.

Weiters möchte ich allen Mitarbeitern der Piezocryst Advanced Sensorics für die Kooperation danken und besonders Hrn. Andreas Mayer für die tatkräftige Unterstützung.

Danke an Elisabeth dafür, dass sie immer für mich da ist und danke an meine ganze Familie für die Ermöglichung des Studiums und den Rückhalt.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	8
2	Grundlagen	9
2.1	Der piezoelektrische Effekt	9
2.2	Galliumorthophosphat	9
2.2.1	Kristallstruktur von Galliumorthophosphat	10
2.2.2	Herstellung	11
2.2.3	Der piezoelektrische Tensor	12
2.3	Das Prinzip der Dehnungsmessstreifen	13
2.4	Der P5 Sensor von Piezocryst Advanced Sensorics	14
2.4.1	Funktionsweise des P2 Sensors	15
2.4.2	Funktionsweise des P5 Sensors	15
3	Theoretische Betrachtungen	18
3.1	Signalabschätzung	18
3.1.1	Einleitendes	18
3.1.2	Stauchung der Messelemente	18
3.1.3	Einbeziehung der Membran	21
3.1.4	Signal	24
3.1.5	Erweiterung auf P5 Sensor	25
3.1.6	Dehnungsmessstreifen	26
3.2	Thermische Expansion	27
3.2.1	Materialkonstanten	27
3.2.2	Stauchung	28
3.2.3	Vergleich mit Messungen	30
4	Messen mit Dehnungsmessstreifen	33
4.1	Konzipierung einer Schaltung	33
4.1.1	Die Wheatstone'sche Brückenschaltung	33
4.1.2	Vollbrücke	34
4.1.3	Halbbrücke	35
4.1.4	DMS Typen	35
4.1.5	Messverstärker	38
4.2	Verhalten der Dehnungsmessstreifen bei Temperaturerhöhung	39
4.2.1	DMS LY11-0.3/120 in Halbbrücke	39
4.2.2	DMS LY11-0.6/120 in Halbbrücke	40
4.2.3	DMS LY11-0.6/120 in Halbbrücke aufgeklebt	40

5	Vorstudien	44
5.1	Offener Typ ungeschirmt	44
5.1.1	Rauschen	44
5.1.2	Belastung	44
5.2	Offener Typ geschirmt	46
5.2.1	Eliminierung der Störeinflüsse	46
5.2.2	Rauschstärke	46
5.2.3	Kraftkalibrieranlage	48
5.3	Offener Typ mit Halbbrücke	53
5.4	Temperaturverhalten offener Typ	55
6	Auslegung des geschlossenen Typs	56
6.1	Konzept	56
6.2	Applizieren der DMS auf die Messelemente	56
6.3	Zusammenbau Rohrfeder - Ermittlung der Vorspannung	57
6.4	Zusammenbau Basissensor	59
6.5	Anschluss der Messkabel	59
7	Messungen am geschlossenen Typ	61
7.1	Rauschsignal bei Raumtemperatur	61
7.2	Verhalten bei Erwärmen	61
7.3	Rauschen bei erhöhter Temperatur	66
7.4	Verhalten bei Drucksprüngen	66
7.4.1	Drucksprung 2 bar	66
7.4.2	Drucksprung 6 bar	69
7.4.3	Drucksprung 20 bar	69
7.5	Messen mit Vakuum	71
7.6	Druckgenerator für dynamische Drücke	71
7.6.1	Frequenzverhalten der DMS	71
7.6.2	Filteralternative	77
8	Hochtemperatur - Variante	78
8.1	Generelles	78
8.2	Erkenntnisse aus den Messungen	79
8.3	Spezifikationen	79
8.4	Anforderungen an einen Hochtemperatur-DMS	81
9	Zusammenfassung	83
A	Konstruktionszeichnungen	85

Zusammenfassung

Eine Studie zur Machbarkeit eines statisch-dynamisch messenden Drucksensors wird durchgeführt. Dazu wird ein existierender piezoelektrischer Sensor mit Dehnungsmessstreifen erweitert. Einleitend werden der piezoelektrische Effekt, speziell der Galliumorthophosphat-Kristall ($GaPO_4$), und die Technik der Dehnungsmessstreifen beschrieben. Zudem wird das Prinzip des P5 Sensors der Firma Piezocryst Advanced Sensorics erläutert, der als Basis für die Arbeit dient.

Das System wird durch analytische Berechnungen approximiert um vorab eine Einschätzung über Druck- und Temperaturverhalten geben zu können. Es ergibt sich für 1 bar Druck eine abgegebene Ladung von 94 pC bzw. eine relative Widerstandsänderung von $1.34 \cdot 10^{-5}$ für DMS mit einem angenommenen k-Faktor von 2.

Ein Konzept wird erarbeitet um Dehnungsmessstreifen (DMS) effektiv im Sensor anzuwenden. Als erste Annäherung wird ein einfacher offener Typ konzipiert, mit dem einige experimentelle Techniken für den späteren geschlossenen Typ erarbeitet werden. Hier zeigt sich, dass durch gute Schirmung und numerischen Filter eine Auflösung von 20 mbar für die DMS erreichbar ist. Durch Messungen in einer Kraftkalibrieranlage wird eine Abweichung zwischen theoretisch berechneten Werten und Experiment von 5% festgestellt. Problematisch ist das Temperaturverhalten des Sensors. Beim Erwärmen von Raumtemperatur auf $70^\circ C$ wurde eine Drift von 6 bar gemessen.

Beim Zusammenbau des geschlossenen Typs wird die Vorspannung im Sensor ermittelt. Die stark streuenden Werte ergeben sich im Mittel zu 120 N.

Nach Fertigstellung soll Frequenz- und Temperaturverhalten dieses Sensors untersucht werden. Piezoelektrisches Signal und das von den DMS stammende sollen abermals verglichen werden. Die Temperaturdrift verbessert sich gegenüber dem offenen Typ auf 3 bar bei Erwärmung auf $70^\circ C$. Bei Drucksprüngen ist ein Messen mit piezoelektrischen Messelementen und DMS sehr gut möglich und das Verhalten weitgehend linear. Wenn Druckschwankungen gemessen werden gibt es einen Bereich von 0 - 1 Hz in dem nur mit DMS gut gemessen werden kann, von 1 - 5 Hz zeichnen beide Systeme das gleiche Signal auf und über 5 Hz war nur mehr das piezoelektrische Signal im Frequenzverhalten kohärent.

Für den Bau einer Hochtemperaturvariante ist eine ausgezeichnete Temperaturkompensation für die DMS-Brücke unumgänglich. Darüber hinaus ist es nötig ein Material zu erproben, das einen hohen k-Faktor aufweist, der über einen weiten Temperaturbereich stabil ist. Weiters müsste dieses Material an den Temperaturkoeffizienten von $GaPO_4$ angepasst sein.

Abstract

A study of the producibility of a static-dynamic measuring pressure sensor is performed. For this purpose an existing piezoelectric sensor is modified with strain gauges. First the piezoelectric effect, especially the gallium orthophosphate crystal ($GaPO_4$) is explained. Further the principle of strain gauges is described, as well as the P5 sensor of Piezocryst Advanced Sensorics, which is the basis for the work.

The system is approximated by analytical calculations to describe pressure and temperature behaviour of the system. For 1 bar the calculations give 94 pC of charge and a relative change in resistance of $1.34 \cdot 10^{-5}$ for strain gauges with an assumed k-factor of 2.

A concept for the effective use of strain gauges in the sensor is brought up. As a first approach a simple open type is built to test some experimental techniques and to get first results to compare with the later built closed type. For an open type sensor with good screening and by use of a numerical filter a resolution of 20 mbar is reached. By measuring in a force calibration device, a discrepancy of 5% in calculated and measured values is estimated. For the temperature behaviour of the sensor severe problems are discovered. While heating to $70^\circ C$ a drift of 6 bar is observed.

In the assembling process of the closed type the pretension can be measured. A wide range of values is observed, an average of 120 N is determined.

After the production process of the closed type the frequency and temperature behaviour of this sensor is tested. Again the piezoelectric signal and the signal of the strain gauges are compared. The temperature drift is improved to 3 bar while heating to $70^\circ C$. For rapid pressure changes the signal of the strain gauges and the piezoelectric signal are very coherent and the behaviour is linear. For pressure changes with a certain frequency it is shown, that in a range from 0 - 1 Hz only the strain gauges give a good signal. In a range from 1 - 5 Hz both principles work pretty well. Above 5 Hz only the piezoelectric signal was frequency coherent.

For the design of a high temperature sensor it is necessary to have a very good temperature compensation for the strain gauges in the Wheatstone bridge. Further a material with a high k-factor which is stable over a wide temperature range must be tested. The thermal expansion coefficients must be adapted to $GaPO_4$.

1 Einleitung

In der praktischen Druckmessung kommt es oft vor, dass neben dem im System vorherrschenden Druck schnelle Druckschwankungen auftreten. Piezoelektrische Sensoren sind hervorragend geeignet um diese Druckschwankungen im Verlauf zu verfolgen. Das ist durch ihre hohe Steifigkeit zu begründen, es sind nur minimale Verformungen für ein Signal hoher Genauigkeit nötig. Allerdings haben diese Sensoren den gravierenden Nachteil, dass keine Informationen über den sogenannten statischen Druck im System gewonnen werden können [1].

Es gibt sehr viele Möglichkeiten statischen Druck zu Messen, davon sind es aber nur sehr wenige, die man mit einem piezoelektrischen Sensor in Einklang bringen kann. Ein Konzept, das für solche Anwendungen in Bezug auf Ausmaße und Empfindlichkeit sinnvoll erscheint, ist das der Dehnungsmessstreifen (DMS). Die Änderung metallischer Widerstände mit Verformung ist bereits lange bekannt, jedoch erlangten DMS erst mit der Entwicklung passender elektronischer Verstärker eine industrielle Bedeutung [1].

2 Grundlagen

2.1 Der piezoelektrische Effekt

Der piezoelektrische Effekt tritt bei Kristallen auf die kein Symmetriezentrum besitzen. Das trifft auf alle Kristalle zu die ferroelektrisch sind. Im Gegenzug müssen aber nicht alle piezoelektrischen Materialien auch ferroelektrisch sein. Im ferroelektrischen Zustand sind die Ionen eines Kristalls in der Einheitszelle so verteilt, dass die Ladungsschwerpunkte nicht zusammenfallen, es liegt also eine permanente Polarisierung im Kristall vor. Bei Piezoelektrizität kann man den Zustand einer Polarisierung zumindest durch Anlegen einer mechanischen Spannung herbeiführen. Quarz und Galliumorthophosphat sind Beispiele für Kristalle die zwar piezoelektrisch aber nicht ferroelektrisch sind [2].

Folglich kann man bei piezoelektrischen Materialien eine Änderung der Polarisierung durch Anlegen einer mechanischen Spannung herbeiführen. Die dabei erzeugten Ladungen können gemessen werden. Dies ist der direkte piezoelektrische Effekt und Grundlage für alle piezoelektrischen Sensoren. Man kann folgende direkte Effekte unterscheiden:

- Longitudinaleffekt: Polarisierung wird in der gleichen Richtung erzeugt, in der mechanische Spannung angelegt wird. Wenn ein Zug oder Druck in x-Richtung anliegt, entstehen Ladungen an jener Fläche, für die die x-Achse die Flächennormale bildet.
- Transversaleffekt: Die Polarisierung wird normal zur angelegten Spannung erzeugt. Die Empfindlichkeit hängt vom Verhältnis der belasteten zu einer unbelasteten Kristallachse ab, was diesen Effekt für Sensoranwendungen sehr sympathisch macht. So kann man die Empfindlichkeit durch Verwendung eines langen dünnen Plättchens stark erhöhen.
- Schereffekt: Polarisierung wird durch Anlegen von Scherkräften erzeugt.

Umgekehrt kann durch ein elektrisches Feld eine Dehnung des Kristalls erreicht werden. Dieser indirekte piezoelektrische Effekt wird für Aktuatoren eingesetzt.

2.2 Galliumorthophosphat

Quarz ist das am häufigsten verwendete Material für piezoelektrische Sensoranwendungen, bringt aber einige entscheidende Nachteile mit sich. Bei 573°C durchläuft Quarz eine Phasenumwandlung vom trigonalen α -Quarz

zum hexagonalen β -Quarz. Dabei geht der ohnehin nicht sehr große piezoelektrische Koeffizient völlig verloren. Zudem kommt es schon bei geringeren Temperaturen zu Zwillingsbildungen, wodurch der piezoelektrische Koeffizient sinkt. Galliumorthophosphat verzwillingt nicht und weist einen höheren piezoelektrischen Koeffizienten auf, der eine Verwendung bis über 900°C möglich macht [3].

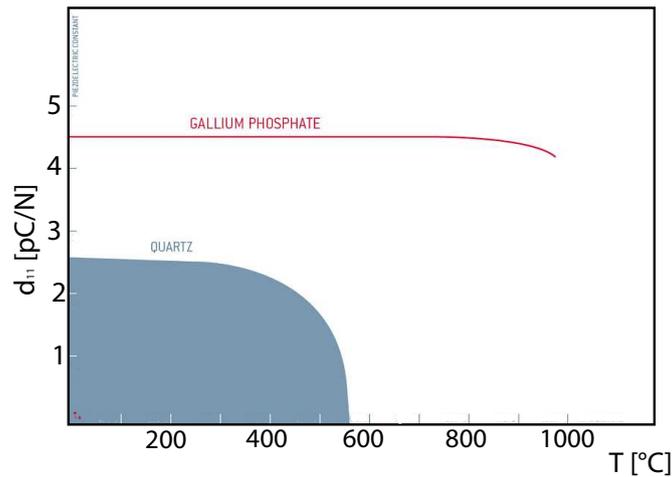


Abbildung 2.1: Vergleich der piezoelektrischen Koeffizienten von Quarz und GaPO_4 als Funktion der Temperatur [6]

2.2.1 Kristallstruktur von Galliumorthophosphat

Quarzhomöotypes Galliumorthophosphat GaPO_4 weist die gleiche Tetraederstruktur wie gewöhnliches Quarz auf. Die Siliziumatome in den Zentren der Tetraeder sind abwechselnd durch ein Gallium- und ein Phosphoratom ersetzt. Der Kristall gehört somit wie Quarz zur Punktgruppe 32, hat aber eine größere Einheitszelle, sie ist in c-Richtung doppelt soweit ausgedehnt. Die Basis der hexagonalen Kristallstruktur, sowie die Begrenzungen der Einheitszelle sind in Abbildung 2.2 zu sehen. Ein wesentlicher Unterschied zu Quarz ist, dass die Bindungswinkel der Tetraeder bei GaPO_4 im Mittel größer sind, 20.8° zwischen Gallium und Sauerstoff beziehungsweise 25.6° zwischen Phosphor und Sauerstoff. Da Quarz den Phasenübergang durchmacht wenn diese Winkel gegen 0 gehen, ist GaPO_4 zu höheren Temperaturen hin stabil [3].

Bei 723°C beginnt der piezoelektrische Koeffizient von GaPO_4 zu sinken und bei etwa 933°C findet ein Phasenübergang in eine kubische Phase der Raumgruppe F-43m statt, die keinen piezoelektrischen Koeffizienten mehr aufweist [7] [8]. Die Sauerstoffatome haben keine festen Plätze zwischen den

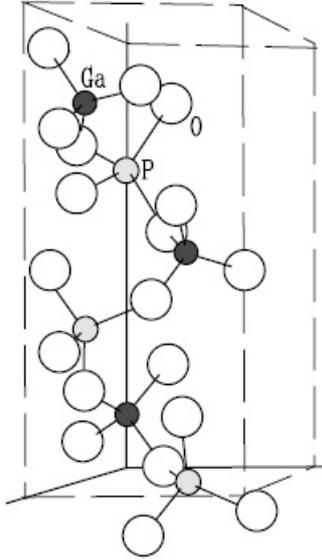


Abbildung 2.2: Basis und Einheitszelle von $GaPO_4$. Galliumatome sind schwarz dargestellt, Phosphoratome grau. Die Sauerstoffatome an den Tetraederecken sind in Weiß zu sehen [3].

Gallium- und Phosphoratomen mehr, sondern halten sich mit gewissen Wahrscheinlichkeiten an verschiedenen Orten auf, wie in Abbildung 2.3 angedeutet [20][21].

2.2.2 Herstellung

$GaPO_4$ Einkristalle können nicht, wie zum Beispiel einkristalline Silizium Ingots beim Czochralski-Verfahren, aus der Schmelze gezogen werden. Es sind hydrothermale Verfahren notwendig, die in speziellen Autoklaven stattfinden. Galliumoxid (Ga_2O_3) oder Galliumhydroxid ($GaO(OH)$) befindet sich dabei in Phosphorsäure (H_3PO_4) [9]. Die Grundgleichung der Reaktion lautet somit [22]:



In dieser Lösung findet spontane Nukleation statt, die erhaltenen Kristalle sind für industrielle Anwendung aber zu klein. Um große Kristalle herzustellen, kann man die aus der spontanen Nukleation erhaltenen Kristalle als Keimlinge verwenden, um in mehreren Zuchtdurchläufen die Größe der Kristalle zu steigern. Alternativ kann man $GaPO_4$ epitaxial auf eine Quarzplatte aufwachsen lassen und die dadurch erhaltenen Kristalle als Keimlinge

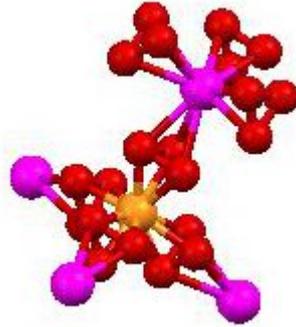


Abbildung 2.3: Kubische Struktur nach Phasenübergang bei etwa $933^{\circ}C$. Hier ist die neue Basis mit den Aufenthaltsmöglichkeiten der Sauerstoffatome (rot) angedeutet. Welche der beiden anderen Farben Phosphor und welche Gallium zugeordnet wird ist unbedeutend [21].

verwenden. Es werden noch weitere Verfahren beschrieben, auf die hier nicht näher eingegangen werden soll [4].

2.2.3 Der piezoelektrische Tensor

Der piezoelektrische Tensor ist eigentlich ein Tensor 3. Stufe, jedoch kann man ihn aus Symmetriegründen als 3×6 Matrix d_{ij} darstellen, die - setzt man die Abwesenheit eines elektrischen Feldes voraus - zur Polarisation p_i in folgender Beziehung steht [2]:

$$p_i = \sum_j d_{ij} \sigma_j \quad (2.2)$$

Hier ist σ_j der Spannungstensor, der von einem zweistufigen auf einen einstufigen reduziert wurde. Diese Vereinfachung reicht für die Beschreibung eines Sensors vollkommen aus.

Für die Punktgruppe 32 (bzw. D_3 nach Schönflies) nimmt der piezoelektrische Tensor folgende Form an:

$$d_{ij} = \begin{pmatrix} d_{11} & -d_{11} & 0 & d_{14} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -d_{14} & -2d_{11} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Die Werte der Koeffizienten über die Temperatur sind [5]:

	$25^{\circ}C$	$500^{\circ}C$	$700^{\circ}C$	$950^{\circ}C$
$d_{11}[pC/N]$	4.5	4.5	4.5	4.1
$d_{14}[pC/N]$	1.9	1.6	1.4	1.0

Man sieht, dass der Koeffizient d_{14} eine höhere Temperaturabhängigkeit aufweist als d_{11} . Daher kann man durch das Schneiden des Kristalls sowohl Empfindlichkeit als auch deren Temperaturabhängigkeit beeinflussen. Im Folgenden werden aber nur eindimensionale Fälle mit $-d_{11}$ für den Transversaleffekt betrachtet.

2.3 Das Prinzip der Dehnungsmessstreifen

Dehnungsmessstreifen beruhen auf dem Prinzip eine Längenänderung in eine messbare elektrische Größe umzuwandeln. Man stelle sich einen dünnen Leiter mit einer Querschnittsfläche A und einer Länge l aus einem Material einer spezifischen Leitfähigkeit ρ vor. Der Widerstand dieses Leiters ist gegeben durch:

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (2.3)$$

Man sieht, dass sich der Widerstand erhöht, wenn sich der Querschnitt verringert oder der Leiter länger wird, was bei einer Dehnung genau der Fall ist. Ein DMS besteht aus vielen, in Mäandern parallel zueinander angeordneten dünnen Leitern. Ein Beispiel für eine Messgitteranordnung ist in Abbildung 2.4 gezeigt.

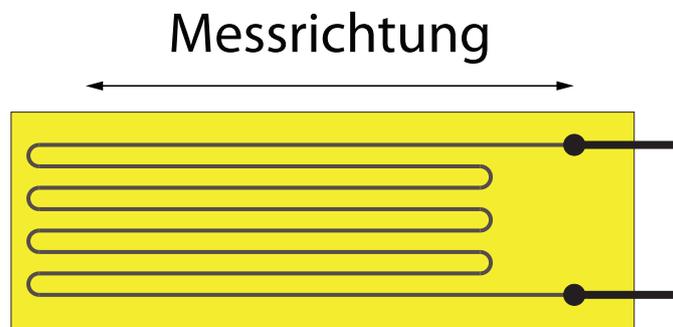


Abbildung 2.4: Beispiel eines Dehnungsmessstreifens

Um eine Aussage über die Empfindlichkeit eines DMS machen zu können wird das vollständige Differential von Gleichung 2.3 gebildet und umgeformt:

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{\Delta \rho}{\rho} + \frac{\Delta l}{l} - \frac{\Delta A}{A} \quad (2.4)$$

Die Querschnittsänderung ist über $\frac{\Delta A}{A} = -2\nu\frac{\Delta l}{l}$ mit der Längenänderung verknüpft und die Änderung des spezifischen Widerstandes über $\frac{\Delta \rho}{\rho} = \kappa\frac{\Delta l}{l}(1 - 2\nu)$ [12]. Dabei ist ν die Querdehnungszahl des Leiters und κ ein Proportionalitätsfaktor. Somit erhält man:

$$\frac{\Delta R}{R} = \kappa\frac{\Delta l}{l}(1 - 2\nu) + \frac{\Delta l}{l}(1 + 2\nu) = k\frac{\Delta l}{l} \quad (2.5)$$

Dieser sogenannte k-Faktor hängt von der Änderung der Geometrie des Leiters ab, sowie von der verformungsbedingten Änderung des spezifischen Widerstandes.

2.4 Der P5 Sensor von Piezocryst Advanced Sensorics

Beim P5 Sensor handelt es sich um einen Drucksensor, der durch eine Membran Druckschwankungen an eine Rohrfeder weitergibt, in die piezoelektrische Messelemente eingespannt sind. An diesen werden durch den Transversaleffekt Ladungen erzeugt, die gemessen werden können und direkt proportional zum Druck sind.

Im Vergleich zum verwandten P2 Sensor mit 3 Messelementen wurde die Druckseite beim P5 um eine Kompensationsseite mit nochmals 3 Messelementen erweitert ist. Diese soll bei Beschleunigung des Systems eine der Druckseite entgegengesetzte Ladung abgeben. Bei dem in Abbildung 2.5 dargestellten Sensor handelt es sich nur um den für das Messen essentiellen Teil, Gehäuse und Membran sind nicht gezeigt. Die Dehnungsmessstreifen (gelb) sind bereits schematisch eingezeichnet.

Die Baugruppe besteht aus im Wesentlichen folgenden Teilen:

- Druckplatte (beige, oben)
- Isolierscheibe (weiß)
- Kontaktscheibe (grün)
- Messelemente (grau)
- Rohrfeder (orange)
- Seismische Masse (beige, unten)
- Ladungsableitung (rot)

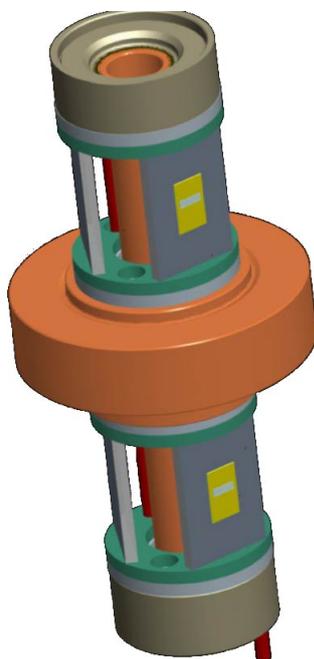


Abbildung 2.5: P5 Sensor mit applizierten DMS

2.4.1 Funktionsweise des P2 Sensors

Der Einfachheit halber soll zuerst die Funktionsweise des kleineren P2 Sensors erläutert werden. Ein vereinfachtes Schema ist in Abbildung 2.6 dargestellt. Die Messelemente werden durch eine Vorspannung der Rohrfeder (F_0) fixiert. Beim Anliegen einer äußeren Kraft F_A (verursacht durch eine Druckänderung) wird das gesamte System gleichmäßig gestaucht. Dadurch wird eine Ladung an den Messelementen durch den transversalen piezoelektrischen Effekt erzeugt. Durch eine metallische Beschichtung und der gezielten Erzeugung von zwei isolierenden Fasen beim Herstellungsprozess wird die Ladung zu den Kontaktscheiben an der Ober- und Unterseite geleitet. Von dort wird sie über Ladungsableitungsrohre nach außen geführt.

2.4.2 Funktionsweise des P5 Sensors

Das Konzept des P2 Sensors soll nun auf den beschleunigungskompensierten P5 Drucksensor erweitert werden. Die Gewinnung des Drucksignals erfolgt im oberen Teil des Sensors, der dem P2 Sensor identisch ist. Auf der Kompensationsseite ist die Polarität der 3 Messelemente umgedreht. Wird der Sensor beschleunigt wird eine Seite komprimiert, während die andere gestreckt wird, es wird also eine Ladung entgegengesetzten Vorzeichens erzeugt. Durch

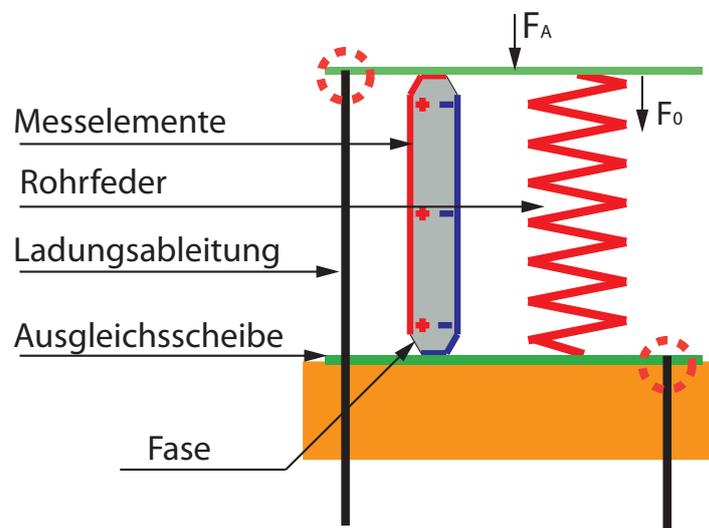


Abbildung 2.6: Das Prinzip des P2 Sensors. Nur eines der drei Messelemente ist skizziert. Die erzeugte Ladung wird über den roten bzw. blauen Pfad zu den Kontaktscheiben geführt, dazwischen befinden sich die isolierenden Fasen. Die Ladungsableitungsrohre sind nur an den kreisförmig markierten Stellen kontaktiert.

entsprechende Kontaktierung heben sich diese Signale auf, sodass durch Beschleunigung kein unerwünschtes Signal beobachtet wird. Das Schema des Sensors ist in Abbildung 2.7 zu sehen.

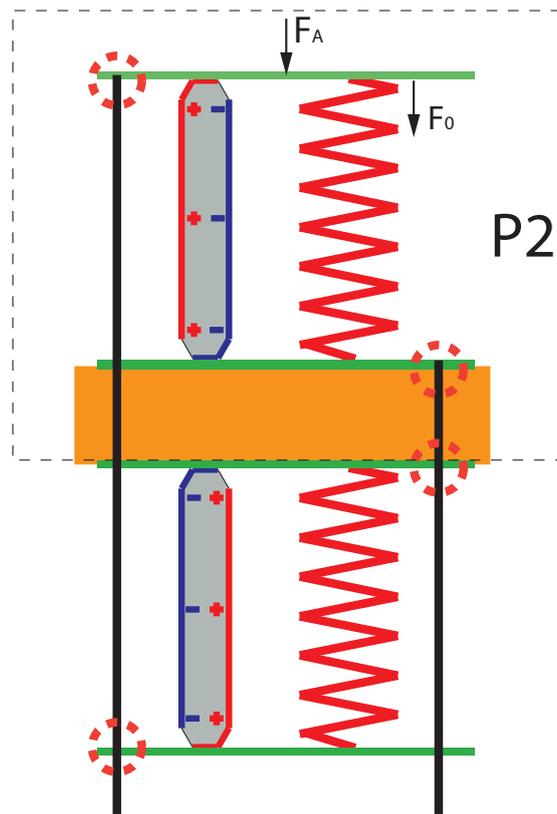


Abbildung 2.7: Das Prinzip des P5 Sensors. Das Skizzenschema des P2 Sensors wurde übernommen, die entsprechenden Kontaktierungen der Ladungsableitungsrohre sind wieder eingezeichnet.

3 Theoretische Betrachtungen

3.1 Signalabschätzung

Um vorab eine Vorstellung zu haben wie stark das Signal sein wird, welches der Sensor liefert, soll eine Berechnung beruhend auf einem einfachen Federsystem gemacht werden. Dieses System besteht aus einer Membran, welche die Kraft überträgt, sowie einer Rohrfeder und den Messelementen des Sensors. Die Isolier- und Ausgleichsscheiben sind in dieser Betrachtung äußerst steife Federn und werden in diesem Kapitel nicht berücksichtigt. Als Grundlage wird vorerst der Sensor des Typs P2 herangenommen, der Unterschied zum leicht unempfindlicheren P5 Sensor soll anschließend untersucht werden.

3.1.1 Einleitendes

Die Bauteile sollen als Federn betrachtet werden, somit muss eine anliegende Kraft über eine Federkonstante mit einer Längenänderung verbunden werden. Diese Federkonstante ergibt sich mit der Geometrie und dem Elastizitätsmodul E des Bauteils aus der einfachen Beziehung:

$$D = \frac{E \cdot A}{l} \quad (3.1)$$

Hier steht A für die Querschnittsfläche und l für die Länge des jeweiligen Teils. Die Querschnittsflächen ergeben sich aus den Originalplänen folgendermaßen:

- Rohrfeder: $A_R = \left(\frac{2.4mm}{2}\right)^2\pi - \left(\frac{2mm}{2}\right)^2\pi = 1.380mm^2$
- Messelemente: $A_K = 3.3mm \cdot 0.45mm = 1.485mm^2$

Die Elastizitätsmodule von $GaPO_4$ (für die Messelemente) und für NiMONIC (für die Rohrfeder) betragen jeweils 66.58 GPa bzw. 222 GPa bei Raumtemperatur [5][11].

3.1.2 Stauchung der Messelemente

Um zu ermitteln, wie stark die Messelemente durch eine äußere Kraft gestaucht werden wird zunächst ein System von 2 parallelen Federn angenommen (Rohrfeder und die 3 Messelemente als eine Feder), wie in Abbildung 3.1 dargestellt. Die dazugehörigen Federkonstanten D_R und D_K sind gegeben durch:

$$D_R = \frac{E_R A_R^*}{l_R} = 41.9 \cdot 10^6 \frac{N}{m} \quad (3.2)$$

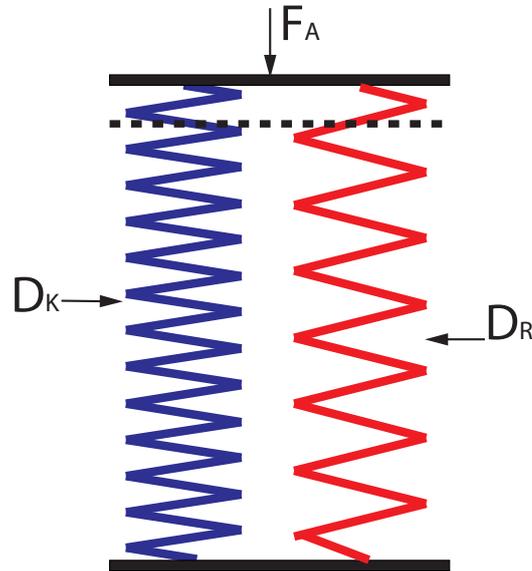


Abbildung 3.1: Einfache Betrachtung des Sensors als System von zwei Federn, rot für die Rohrfeder, blau für die 3 Messelemente die zu einer Feder zusammengefasst werden.

und

$$D_K = \frac{3E_K A_K}{l_K} = 59.3 \cdot 10^6 \frac{N}{m} \quad (3.3)$$

Dabei stehen $l_R = 7.4mm$ und $l_K = 5mm$ für die Längen der Rohrfeder und der Kristalle (siehe Abb. 3.2). A_R^* steht für eine leicht erhöhte Fläche ($1.397mm^2$) der Rohrfeder. Diese ergibt sich durch Integration und Mittelung über die Länge l , über die sich der Radius r an den Enden der Rohrfeder erstreckt:

$$d^* = d + \frac{1}{l} \int_0^l r - \sqrt{r^2 - l'^2} dl' \quad (3.4)$$

Gewichtet man diesen neuen Durchmesser über die Gesamtlänge mit dem ursprünglichen Durchmesser d

$$d_{ges} = \frac{d^* l}{l_R} + \frac{d(l_R - l)}{l_R} \quad (3.5)$$

ergibt sich mit diesem Durchmesser d_{ges} die Fläche A_R^* .

Die Längenänderung beim Anlegen einer Kraft F an dieses System ist gegeben durch:

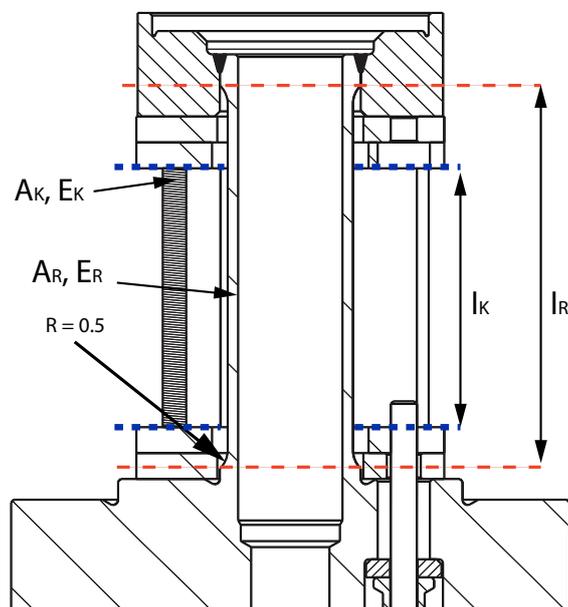


Abbildung 3.2: Reale Darstellung des berechneten Sensorsystems. Die blauen Linien begrenzen die Kristalle, die roten die Rohrfeder. An den Enden verdickt sich die Rohrfeder mit einem Radius von 0.5 mm. Der Mittelteil der Membran liegt auf diesem Aufbau auf und überträgt den äußeren Druck.

$$\Delta x_1 = \frac{F_A}{D_R + D_K} \quad (3.6)$$

Diese Stauchung beträgt etwa 32 nm bei einem Druck von einem bar auf den 5mm des Messelements, was einer relativen Stauchung

$$\epsilon_K = \frac{\Delta x_1}{l} = 6.4 \cdot 10^{-6} \quad (3.7)$$

entspricht.

3.1.3 Einbeziehung der Membran

In Abbildung 3.3 ist ein Querschnitt der Membran zu sehen auf die von außen ein Druck wirkt. Es wird eine aktive Membranfläche definiert um dem äußeren Druck eine Kraft zuordnen zu können, die auf das Federsystem übertragen wird. Da nur der mittlere Part Kraft auf das Federsystem überträgt, wird die aktive Membranfläche A_M aus Innen und- Außernradius simpel als

$$A_M = 36.32mm^2 \quad (3.8)$$

berechnet. Daraus ergibt sich die Kraft F_2 die von der Membran infolge eines äußeren Drucks p auf das Federsystem übertragen wird zu

$$F_{A0} = A_M \cdot p \quad (3.9)$$

Nun wird diese Kraft aber nicht vollständig auf das darunterliegende Federsystem übertragen, sondern es gibt einen Kraftnebenschluss über das Gehäuse. Infolgedessen muss die Membran als 3. Feder miteinbezogen werden. Eine einfache Darstellung ist in Abbildung 3.4 skizziert.

Eine Bestimmung der Federkonstanten wie in 3.1 ist nicht möglich, da diese theoretische 3. Feder keine Länge und Fläche im gleichen Sinn besitzt. Deshalb wird eine finite Elemente Simulation vorgenommen und die Stauchung für verschiedene Kräfte bestimmt (siehe Abb. 3.5). Dabei wird die Membran an dem am Gehäuse aufliegenden Teil fixiert und nacheinander gleichmäßige Kräfte von oben angelegt. Die jeweiligen Verformungen zu 50, 100, 200 und 250 N werden notiert. Durch lineare Interpolation ergibt sich die Federkonstante (mit $z = 0$) zu:

$$D_M = (F - z)/x = 7.46 \cdot 10^6 \frac{N}{m} \quad (3.10)$$

Auf diese Feder wird nun ein Teil der äußeren Kraft übertragen, was die Stauchung der Kristalle verringert. Legt man nun auf die in Abbildung 3.4

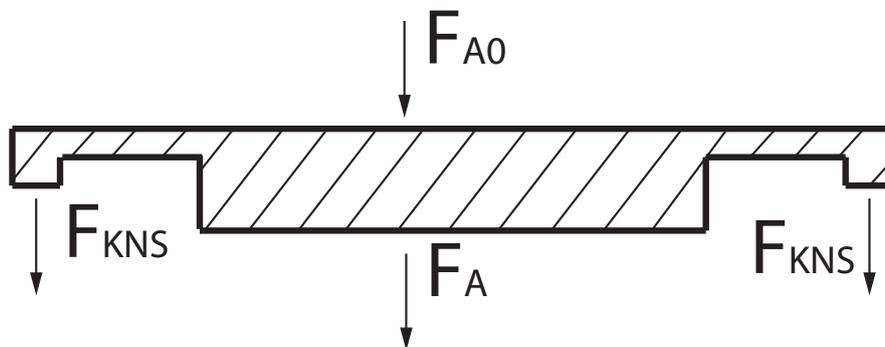


Abbildung 3.3: Skizzierter Querschnitt der Membran die einen Druck auf das Rohrfedersystem überträgt. Die äußeren Auflageflächen sind mit dem Gehäuse verbunden, der innere Teil ist die aktive Membranfläche. Der Anteil F_A der äußeren Kraft F_{A0} wird auf das Sensorsystem übertragen, während der Anteil F_{KNS} (Kraftnebenschluss) in das Gehäuse abgeleitet wird.

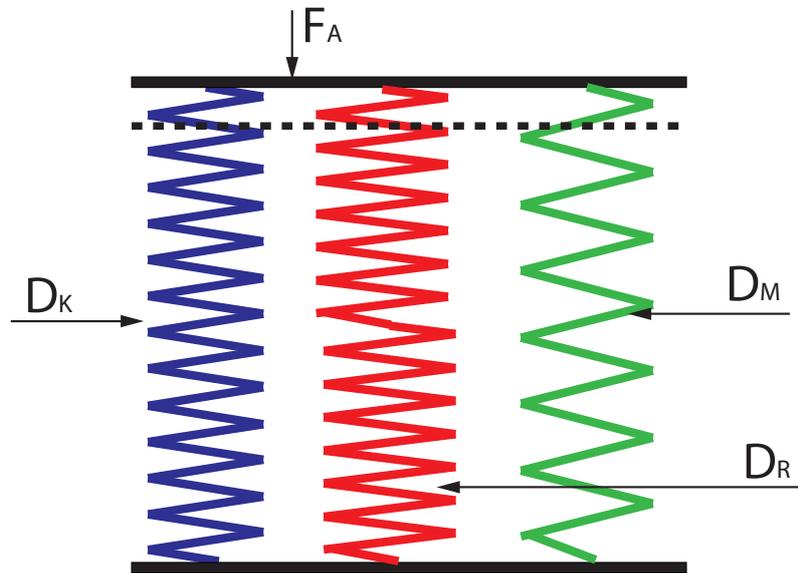


Abbildung 3.4: Miteinbeziehung der Membran als (theoretische) dritte Feder. Die grüne Feder, welche die Membran darstellt könnte ebenso über dem restlichen System angeordnet werden, solange die Kraft auf der gleichen Ebene angreift.

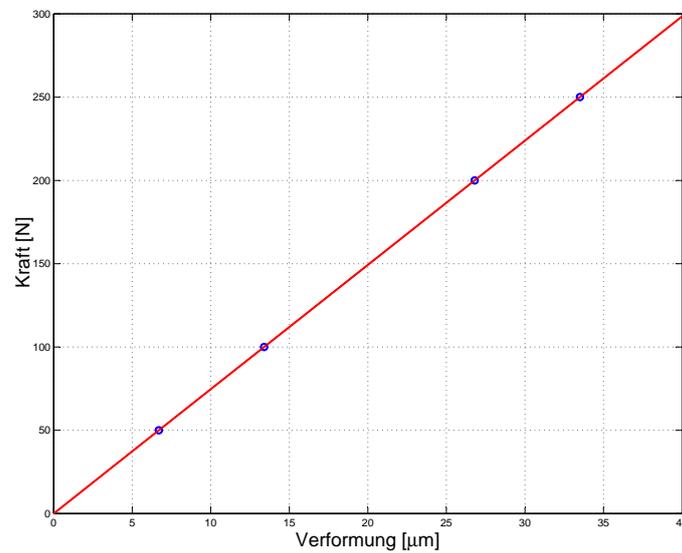


Abbildung 3.5: In der Simulation an die Membran angelegte Kraft über die dazugehörigen Stauchungen zur Ermittlung der Federkonstanten.

gezeigte Anordnung eine beliebige Kraft an, ergibt sich folgende Gesamtstauchung:

$$\Delta x_2 = \frac{F_A}{D_K + D_R + D_M} \quad (3.11)$$

Im Gegensatz dazu steht die ungestörte Stauchung aus Gleichung 3.6. Das Verhältnis von ungestörter Stauchung und jener mit Kraftnebenschluss ist:

$$\frac{\Delta x_2}{\Delta x_1} = \frac{D_K + D_R}{D_K + D_R + D_M} = 0.93 \quad (3.12)$$

Der Kraftnebenschluss über die Membran beträgt also 93%. Dadurch kann man Gleichung 3.9 mit dem Kraftnebenschluss ergänzen um die von der Membran übertragene Kraft zu erhalten:

$$F_A = A_M \cdot p \cdot 0.93 \quad (3.13)$$

3.1.4 Signal

Zusammenfassend erhält man für die Beziehung zwischen äußerem Druck und Stauchung der Messelemente, unter Verwendung von Gleichung 3.7 in Kombination mit 3.6 und 3.13:

$$\epsilon_K = \frac{0.93 \cdot A_M \cdot p}{l(D_R + D_K)} = 6.7 \cdot 10^{-11} \cdot p [Pa^{-1}] \quad (3.14)$$

Die durch diese Stauchung ausgeübte Kraft auf ein Messelement ist somit:

$$F_{piezo} = A_K E_K \epsilon_K \quad (3.15)$$

Durch Ausnutzen dieser Beziehung und mit Hilfe des piezoelektrischen Koeffizienten von $GaPO_4$ und dem Verhältnis von Länge zu Breite der Messelemente (die Ladung wird transversal zur Richtung der Krafteinwirkung erzeugt, [10]) kann somit einfach die Gesamtladung ermittelt werden, die von den Kristallen abgegriffen wird:

$$Q = 3d_{11} \frac{l}{a} F_{piezo} \quad (3.16)$$

Der piezoelektrische Koeffizient von $GaPO_4$ ist wohlbekannt, $d_{11} = 4.5 \frac{pC}{N}$, sowie auch die Länge ($l = 5mm$) und die Dicke ($a = 0.45mm$) des Messelementes. Durch Einsetzen aller bekannten Koeffizienten ergibt sich:

$$Q = 9.89 \cdot 10^{-4} \frac{pC}{Pa} \cdot p \quad (3.17)$$

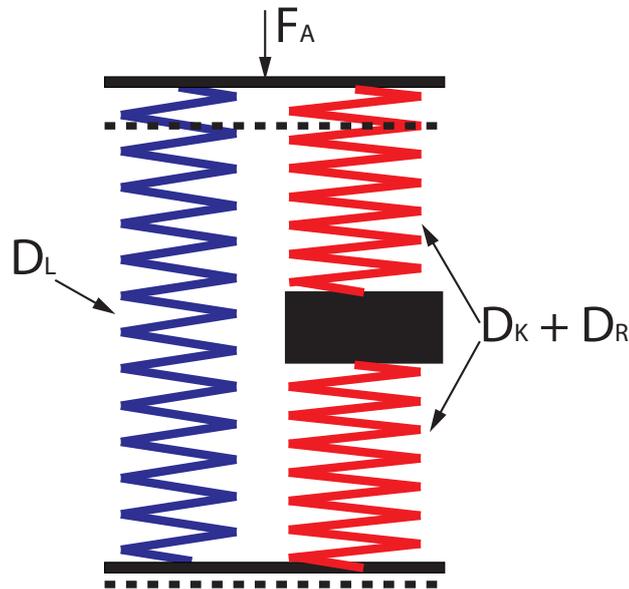


Abbildung 3.6: Federmodell zur Darstellung der Kraftübertragung vom oberen in den unteren Sensorteil. Messelemente und Rohrfeder werden als rote Feder dargestellt, Ladungsableitungsrohr als blaue Feder. Blaue und untere rote Feder können als Serienschaltung gesehen werden.

Für 1 bar Druck entspricht das also etwa 99 pc Ladung die von den Messelementen abgegriffen werden kann.

3.1.5 Erweiterung auf P5 Sensor

Die Betrachtung wird auf den P5 Sensor ausgedehnt, der durch einen gespiegelten Messteil an der Unterseite der Rohrfeder erweitert ist. Würde das Problem identisch wie in 3.1.2 behandelt, ergäbe sich somit auch das gleiche Ergebnis. Experimentell ist aber gezeigt, dass dieser Sensor um etwa 5 pC unempfindlicher ist. Diese fehlende Kraft auf die oberen Messelemente muss über den Ladungsableitungsdraht in den unteren Teil übertragen werden. Zwar nimmt dieses Rohr als Feder betrachtet kaum Kraft auf ($A_l = 0.25^2\pi$, $E_l = 225$ GPa, $l_l = 16.65$ mm), jedoch dehnt es gleichzeitig den unteren Aufbau, was eine negative Ladung erzeugt. Das vereinfachte Modell aus einer Serien- und einer Parallelschaltung von Federn ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

Die Gesamtfederkonstante dieses Systems ergibt sich zu

$$D_{ges} = D_1 + D^* = D_1 + \left(\frac{D_1 D_2}{D_1 + D_2}\right) \quad (3.18)$$

mit $D_1 = D_K + D_R$ und $D_2 = \frac{E_l A_l}{l}$. D^* ist die Federkonstante der Reihenschaltung.

Die Stauchung des oberen Teils erhält man mit

$$\Delta x_1 = \frac{F}{D_{ges}} \quad (3.19)$$

Hier ist F eine von der Membran übertragene Kraft, die sich aus Gleichung 3.13 ergibt. Die Dehnung des unteren Teils erhält man aus

$$\Delta x_2 = \frac{F^*}{D_1} \quad (3.20)$$

mit $F^* = \Delta x_1 D^*$. Es ist zu beachten, dass die Stauchung im unteren Teil des Sensors eine Ladung erzeugt, die der oberen entgegengesetzt ist. Setzt man diese beiden Stauchungen (relativ zur Länge der Messelemente) in die Gleichungen 3.15 und 3.16 ein und subtrahiert die Ladungen voneinander ergibt sich für die Gesamtladungsabgabe des P5 Sensors nach kurzer Rechnung:

$$Q_{P5} = 3d_{11} \frac{l_K}{a_K} A_K E_K \frac{0.93 \cdot A_M \cdot p}{D_K + D_R + 2D_2} = 9.40 \cdot 10^{-4} \frac{pC}{Pa} \cdot p \quad (3.21)$$

Also eine Ladung von 94 pC für 1 bar Druckdifferenz. Die Differenz von 5 pC zum P2 Sensor ist somit auch theoretisch erwiesen.

3.1.6 Dehnungsmessstreifen

Die Widerstandsänderung eines applizierten DMS für den P2 Sensor kann mit bekanntem k-Faktor und der relativen Stauchung ϵ_K , die aus Gleichung 3.14 bekannt ist, einfach berechnet werden:

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon_K = 6.7 \cdot 10^{-11} \cdot k \cdot p \quad (3.22)$$

Bei einem k Faktor von 2 und einem Druck von 1 bar ergibt sich somit eine relative Widerstandsänderung im DMS von $1.34 \cdot 10^{-5}$.

Für den P5 Sensor macht es aus schaltungstechnischen Gründen, wie später noch genauer erläutert wird, Sinn, die in 3.19 und 3.20 erhaltenen Längenänderungen zu addieren. Nach kurzer Rechnung ergibt sich:

$$\epsilon_{P5} = \frac{\Delta x_1}{l_k} + \frac{\Delta x_2}{l_k} = \frac{0.93 \cdot A_M \cdot p}{D_K + D_R} \quad (3.23)$$

Dies ist der Stauchung und somit der Widerstandsänderung für den P2 Sensor identisch. Das macht auch aus logischer Sicht Sinn, da das untere Messelement die Längenänderung erfährt, die das obere wegen dem Kraftnebenschluss weniger gestaucht wird.

3.2 Thermische Expansion

Es soll berechnet werden, wie sich die thermische Ausdehnung der Bauteile auf den Sensor auswirkt. So soll unter anderem das Verhalten des Dehnungsmessstreifen bei erhöhten Temperaturen abgeschätzt werden.

Die Expansion der Materialien bei Erhitzen kann mit der Beziehung

$$\epsilon = \alpha \cdot T \quad (3.24)$$

beschrieben werden.

3.2.1 Materialkonstanten

Der Koeffizient der thermischen Ausdehnung von $GaPO_4$ ist nicht über die Temperatur konstant, sondern wird durch ein Polynom 3. Grades beschrieben. Die dazugehörigen Werte sind in entsprechenden Datenblättern sehr gut beschrieben [5]:

	$\alpha_{ii}(T_0)[10^{-6}K^{-1}]$	$T\alpha_{ii}^{(1)}[10^{-9}K^{-2}]$	$T\alpha_{ii}^{(2)}[10^{-12}K^{-3}]$	$T\alpha_{ii}^{(3)}[10^{-15}K^{-4}]$
α_{11}	12.78	10.6	-16.1	12.3
α_{33}	3.69	5.0	-5.4	3.6

Hier gilt:

$$\alpha_{ii}(T) = \alpha_{ii}(T_0) + \sum_{n=1}^3 [T\alpha_{ii}^{(n)} \cdot (T - T_0)^n] \quad (3.25)$$

Für die hier durchgeführten Berechnungen wird nur der longitudinale Koeffizient α_{11} verwendet.

Der thermische Ausdehnungskoeffizient von NIMONIC, dem Material der Rohrfeder, beträgt $\alpha_R = 12.7 \cdot 10^{-6}K^{-1}$ [11]. Mit Messpunkten von α_R bei höheren Temperaturen und einem Fit mit einem Polynom 3. Grades kann das Verhalten dieser Größe bei Erhitzen angepasst werden. Das Elastizitätsmodul von NIMONIC wird mit entsprechenden Messpunkten auf gleiche Weise modifiziert. Weiters werden die Materialkonstanten der Kontakt- und der Isolierscheiben benötigt [13], von denen jeweils eine unter und über den Piezoelementen sitzt:

	Material	Dicke [mm]	A [mm^2]	$\alpha[10^{-6}]$	E [GPa]
Kontaktscheibe	Nickelbasisleg.	0.50	20.27	10.6	216
Isolierscheibe	Al_2O_3 (Saphir)	0.50	21.18	8.4	375

Entsprechend den Materialien werden im Folgenden die Indizes NB (für die Kontaktscheiben) und Sa (für die Isolierscheiben) verwendet. Die Werte in der oberen Tabelle zeigen auch Änderungen mit der Temperatur. Das Temperaturverhalten von α und E kann angepasst werden, indem vorhandene Messpunkte für das Material mit einem Polynom 3. Grades gefittet werden. Wie in 3.1 soll hier auch die Membran, welche den Druck auf Rohrfeder und Kristalle überträgt, in die Betrachtung miteinbezogen werden. Da diese Membran, sowie die Rohrfeder, aus NIMONIC besteht, können dessen Materialkonstanten direkt übernommen werden.

3.2.2 Stauchung

Da die $GaPO_4$ Stäbchen in kristallographischer y- Richtung eingespannt sind, lässt sich mit den bekannten Größen α_{11} (für den Kristall aus Gleichung 3.25), α_{NB} , α_{Sa} und α_R (für die Nickelbasislegierung, Saphir und Rohrfeder) und der Beziehung 3.24 ermitteln, wie stark sich die Materialien mit steigender Temperatur dehnen. Es ergibt sich eine Dehnung für die Rohrfeder (ϵ_R), sowie eine Dehnung für die Piezokristalle (ϵ_K), der Kontaktscheiben (ϵ_{NB3}) und der Isolierscheiben (ϵ_{Sa}). Durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Rohrfeder und der Kristall - Scheiben Kombination ergibt sich ein Ausdehnungsunterschied, der durch

$$\Delta x = \epsilon_R l_R - \epsilon_K l_K - 2\epsilon_{NB} l_{NB} - 2\epsilon_{Sa} l_{Sa} \quad (3.26)$$

gegeben ist.

Es liegt ein Federsystem zweier Federn mit verschiedenen Ruhelagen vor. Die tatsächliche Lage befindet sich irgendwo dazwischen. Betrachtet man das Kräftegleichgewicht gilt:

$$x_1 D_1 = x_2 D_2 \quad (3.27)$$

Hier entspricht x den Längenänderungen in Rohrfeder bzw. Kristallen und Scheiben und D den Federkonstanten. Da auf einer Seite nur die Rohrfeder vorhanden ist gilt: $D_1 = \frac{E_R A_R}{l_R}$. Hier wird l_R , also die effektive Federlänge der Rohrfeder, aus Konstruktionszeichnungen ausgemessen und beträgt 7.4mm.

D_2 ist die Gesamtfederkonstante des Kristall - Scheiben Systems und durch

$$D_2 = \left[\frac{l_k}{3E_K A_K} + \frac{2l_{NB}}{E_{NB} A_{NB}} + \frac{2l_{Sa}}{E_{Sa} A_{Sa}} \right]^{-1} \quad (3.28)$$

gegeben. Der Faktor 2 für NB und Sa beschreibt die Tatsache, dass je eine Scheibe des Materials unter und über den Messelementen sitzt.

Es muss gelten, dass die Summe aus x_1 und x_2 gerade Δx entspricht. Somit erhält man durch Einsetzen in Gleichung 3.27:

$$x_2 = \frac{\Delta x D_1}{D_1 + D_2} \quad (3.29)$$

x_2 kann sowohl einer Stauchung als auch einer Dehnung des Kristall-Scheiben- Systems entsprechen.

Die Membran wird wieder als 3. theoretische Feder eingerechnet, die der thermischen Expansion des restlichen Systems entgegenhält. Die thermische Ausdehnung der Membran wird nicht miteinbezogen, da eine Näherung bei gegebener Form und den Wechselwirkungen mit anderen Komponenten nicht möglich beziehungsweise sinnvoll wäre. Diese Feder hält nun x_2 entgegen, es liegen wiederum 2 Kräfte im Gleichgewicht vor:

$$D_M x_A = (D_1 + D_2) x_B \quad (3.30)$$

In Gleichung 3.30 beschreibt x_A die tatsächliche Stauchung des unter der Membran befindlichen Federsystems. Weiters gilt: $x_2 = x_A + x_B$. Daraus erhält man:

$$x_A = \frac{x_2(D_1 + D_2)}{D_M + D_1 + D_2} \quad (3.31)$$

Zu dem beinahe identischen Ergebnis für x_A wäre man gekommen, hätte man einfach den in 3.1.3 errechneten Kraftnebenschluss mit x_2 multipliziert. Einen minimalen Unterschied macht hier die Einbeziehung der Isolier- und Kontaktscheiben aus, das aufgrund des Ausdehnungsverhaltens notwendigerweise miteinbezogen und der Vollständigkeit halber beibehalten wurde.

Die Stauchung der Kristalle ergibt sich aus dem Verhältnis der Gesamtfederkonstante des Systems zur Federkonstante der Messelemente:

$$x_K = x_A \frac{D_1 + D_2}{D_K} \quad (3.32)$$

Unter Berücksichtigung der Vorspannung der Kristalle x_{K1} , bei einer angenommenen Kraft von 200 N und berechnet mit Gleichung 3.6, ergibt sich schlussendlich die absolute Stauchung in Abhängigkeit von der Temperatur, die in Abb. 3.7 dargestellt ist.

$$x_{St} = x_{K1} + x_K \quad (3.33)$$

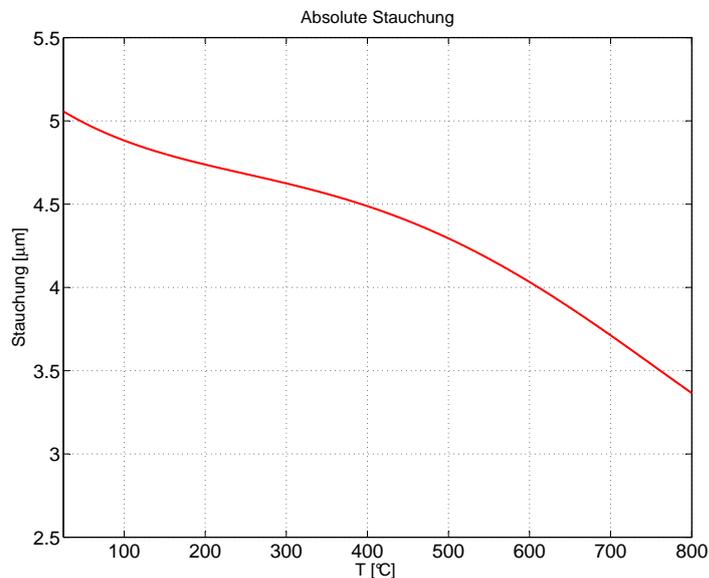


Abbildung 3.7: Absolute Stauchung der Kristallstäbchen. Als Vorspannung wird 200 N angenommen.

Wie man in der Grafik erkennen kann, nimmt die Stauchung der Kristalle mit zunehmender Temperatur ab, die Dehnung der Rohrfeder übertrifft also die des Kristall-Scheiben Systems. Dieser Trend ließe sich durch Variation der Längenverhältnisse von Kristall und Scheiben verändern. Ein recht konstantes Verhalten der Vorspannung über einen großen Temperaturbereich wäre erreichbar. Ein mögliches Beispiel ist in Abbildung 3.8 dargestellt. Rechnet man unter Zuhilfenahme der Ergebnisse in 3.1 ein Signal für die erhaltenen Dehnungen aus, erhält man für einen Temperatursprung von 25 auf 75°C eine Ladung von 371 pC.

In Abbildung 3.9 ist die relative Stauchung der Messelemente, sowie die Kraft auf diese in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt.

3.2.3 Vergleich mit Messungen

Ein P2 - Sensor wird von einem Wasserbad mit ca. 20°C in ein Wasserbad mit ca. 80°C gelegt. Nach vollständigem Durchwärmen des Sensors (1-2 min) wird er wieder ins kalte Wasserbad gelegt. Der genaue Temperaturunterschied wird festgehalten, während das Signal des Sensors aufgezeichnet wird. Das

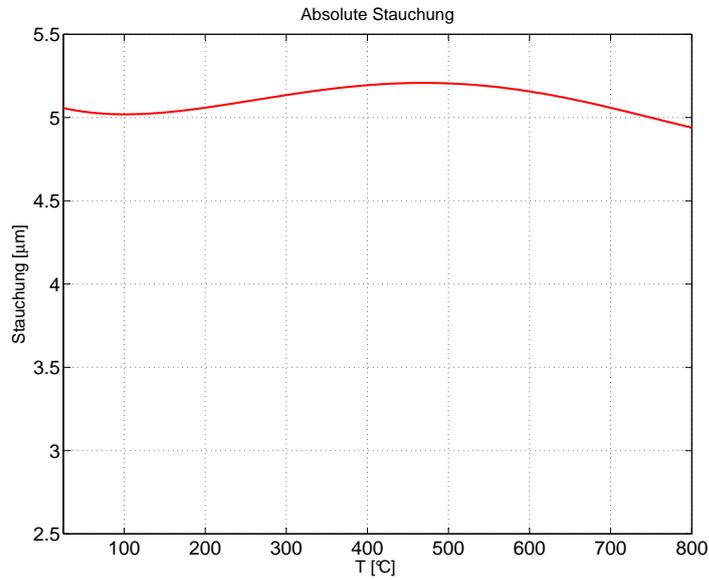


Abbildung 3.8: Absolute Stauchung der Kristallstäbchen bei einer Änderung der Scheibendicke. Die Dicke der Isolierscheibe wurde auf 0.3mm reduziert und die Dicke der Kontaktscheibe auf 0.25mm.

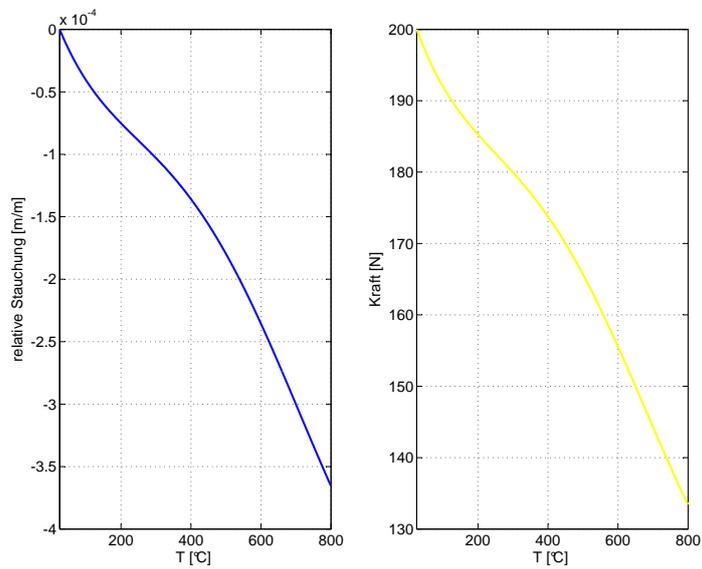


Abbildung 3.9: Relative Stauchung der Messelemente und Kraft über die Temperatur.

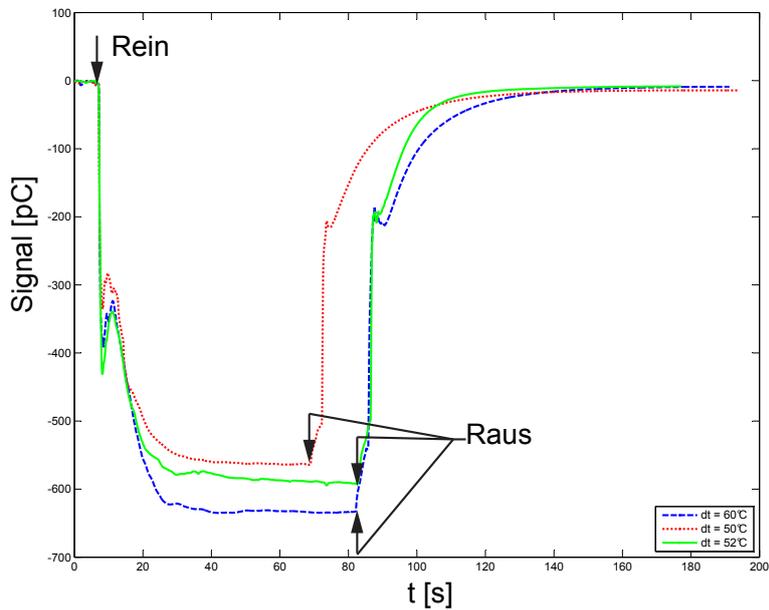


Abbildung 3.10: Aufzeichnung des Sensorsignals beim Wechsel vom kalten ins warme Wasserbad und wieder zurück. Zu erkennen sind auch charakteristische Inhomogenitäten in der Ladungsabgabe die auftreten wenn die Wärme vom Gehäuse auf die Messelemente übergeht.

Ergebnis ist in Abb. 3.10 zu sehen.

Zum Vergleich mit der Theorie reicht eine Betrachtung des Temperaturunterschieds, da das Ausdehnungsverhalten sich, bei dem vermessenen Temperaturbereich, weitgehend linear verhält. Die gemessenen Ladungen reichen von etwa 560 - 635 pC. Für einen Temperatursprung von 50°C wurden 366 pC berechnet. Dieser niedrige Wert kann auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden. So schwanken die Literaturwerte von α_{Sa} im Bereich von $(3.6 - 7.3) \cdot 10^{-6}$ [14]. Im gerechneten Beispiel würde eine Verkleinerung von α_{Sa} um 20% das Signal bereits auf 445 pC erhöhen. Weiters konnte Temperatur im Wasserbad nur sehr ungenau bestimmt werden.

4 Messen mit Dehnungsmessstreifen

Es sollen Schaltungen für 2 Sensortypen konzipiert werden. Einerseits eine Schaltung, die für den offenen Sensortyp geeignet ist. Da hier Gehäuse und Membran fehlt, ist ausreichend Platz für die Verschaltung vorhanden. Andererseits soll eine Schaltungsmöglichkeit der DMS für den geschlossenen Typ gefunden werden. Hier müssen die Kabel im Gehäuse geführt werden und man muss zwischen Realisierbarkeit und ausreichender Empfindlichkeit einer Schaltung abwägen.

4.1 Konzipierung einer Schaltung

4.1.1 Die Wheatstone'sche Brückenschaltung

Dehnungsmessstreifen werden für gewöhnlich in einer Wheatstone'schen Brücke geschaltet. Diese hat den Vorteil, dass bereits sehr kleine Widerstandsänderungen (bzw. Änderungen der Widerstandsverhältnisse in den einzelnen Brückenzweigen) die gemessene Ausgangsspannung deutlich verändern. Die Brückenschaltung ist in Abbildung 4.1 dargestellt.

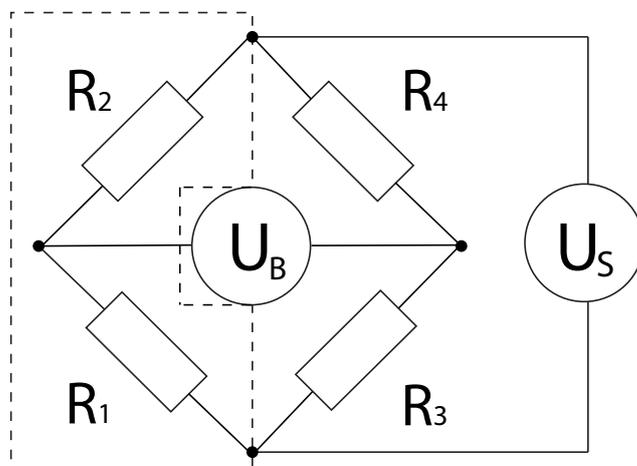


Abbildung 4.1: Schaltung einer Wheatstone Brücke. Der bei einer Halbbrücke applizierte Teil ist umrahmt, bei einer Vollbrücke werden alle 4 Widerstände aufgebracht.

Wie in Abschnitt 3.1.6 berechnet, beträgt mit einem k-Faktor von 2 die relative Widerstandsänderung im DMS $1.34 \cdot 10^{-5} \text{ bar}^{-1}$. Nun soll die Spannungsänderung relativ zur Speisespannung in verschiedenen Schaltungsvari-

anten der DMS abgeschätzt werden. Für diese gilt allgemein [16]:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot \epsilon \cdot B \quad (4.1)$$

Hier ist ϵ die gesamte Längenänderung, die durch Kombination der einzelnen Brückenarme entsteht. Beziehungswise unter Verwendung von Gleichung 3.22:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \cdot \frac{\Delta R}{R} \cdot B \quad (4.2)$$

Hier steht ϵ für die relative Stauchung bzw. Dehnung der DMS und B für den Brückenfaktor. Dieser Faktor hängt von der Art der verwendeten Schaltung ab.

4.1.2 Vollbrücke

In dieser Schaltungsvariante werden alle vier Widerstände der Wheatstone'schen Brücke tatsächlich an der Messstelle angebracht, daher werden hier vier DMS benötigt. Diese Schaltung soll für den offenen Sensortyp verwirklicht werden. Dadurch wird bestmögliches Signal- und Kompensationsverhalten erreicht. Aus Platzgründen kann mit den verwendeten DMS beim später aufgebauten geschlossenen Typen keine Vollbrücke verwirklicht werden. Im Sensor werden zwei DMS vertikal auf je ein Piezoelement appliziert, die beiden anderen DMS werden auf einem unbelasteten Messelement in gleicher kristallographischer Richtung angebracht. Damit sollte eine vollständige Temperaturkompensation gegeben sein, da sich alle DMS nun thermisch gleich mit dem Kristall mitdehnen. Voraussetzung ist jedoch genügend Kontakt der unbelasteten Kristallplättchen zur Umgebung um rasch ein thermisches Gleichgewicht zu erzielen. Diese Voraussetzung wäre bei losen DMS in der Realität nur schwer zu erreichen.

Für diese Schaltung ergibt sich ein Brückenfaktor von 2 [15]. Gleichung 4.1 lässt sich somit umschreiben zu:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{2} \cdot k \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2 + \epsilon_3 - \epsilon_4) \quad (4.3)$$

Mit Gleichung 4.2 ergibt sich eine relative Spannungsänderung von $7 \cdot 10^{-3} \frac{mV}{V}$ für 1 bar Druck.

Für die Vollbrücke gilt, dass mindestens 6 Leitungen aus dem Sensor geführt werden müssen (vor der Verschaltung der DMS untereinander wären es sogar 8). Über 2 Messleitungen wird die Spannungsänderung gemessen, über 2 weitere Leitungen wird die Spannung eingespeist. Am gleichen Knotenpunkt wie

die Speiseleitungen hängt jeweils eine Fühlerleitung. Diese werden gebraucht, um den Kabelwiderstand der Speiseleitungen zu kompensieren. In Abbildung 4.2 ist schematisch die Verschaltung der DMS im P5 Sensor dargestellt.

4.1.3 Halbbrücke

In dieser Variante werden nur zwei Widerstände tatsächlich appliziert, der Rest der Brücke wird durch den Messverstärker ergänzt. Der Vorteil dieser Schaltung ist offensichtlich, da nur zwei Dehnungsmessstreifen benötigt werden und die Verschaltung einfacher ist. Ein DMS wird druckseitig aufgebracht, der andere auf ein unbelastetes Messelement. Allerdings sind somit auch die Kompensationsqualitäten geringer und der Brückenfaktor beträgt nur 1 [15]. Hier lässt sich Gleichung 4.1 schreiben als:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{1}{4} \cdot k \cdot (\epsilon_1 - \epsilon_2) \quad (4.4)$$

Das bedeutet, dass sich auch die relative Spannungsänderung auf $3.5 \cdot 10^{-3} \frac{mV}{V}$ halbiert. Somit ist das Signal-Rausch-Verhältnis schlechter als bei einer Vollbrücke. Der schematische Aufbau im P5 Sensor ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

4.1.4 DMS Typen

Für den Aufbau eines Sensor Prototypen werden 2 Typen von Dehnungsmessstreifen der Firma HBM GmbH verwendet. Siehe [18] für nähere Informationen.

- LY11 0.6/120
- LY11 0.3/120

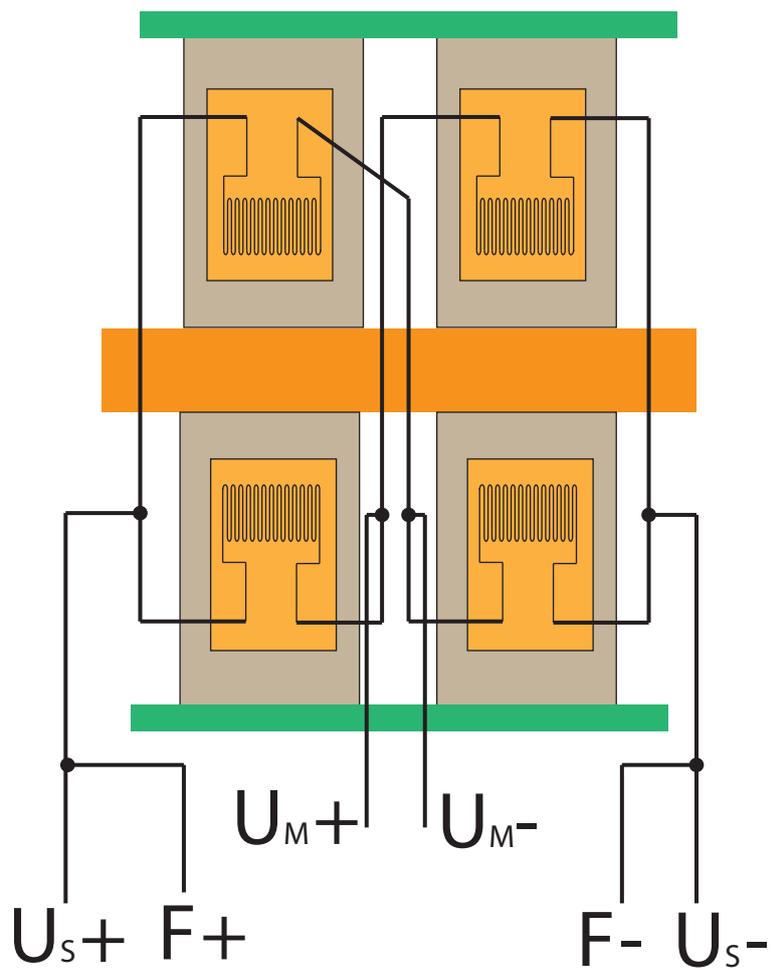


Abbildung 4.2: Prinzipielle Verschaltung von vier DMS in einem P5 Sensor zu einer Vollbrücke. U_S und U_M stehen für die Speise- und Messleitungen. F sind die Fühlerleitungen, die benötigt werden um die Widerstände der Speiseleitungen zu kompensieren.

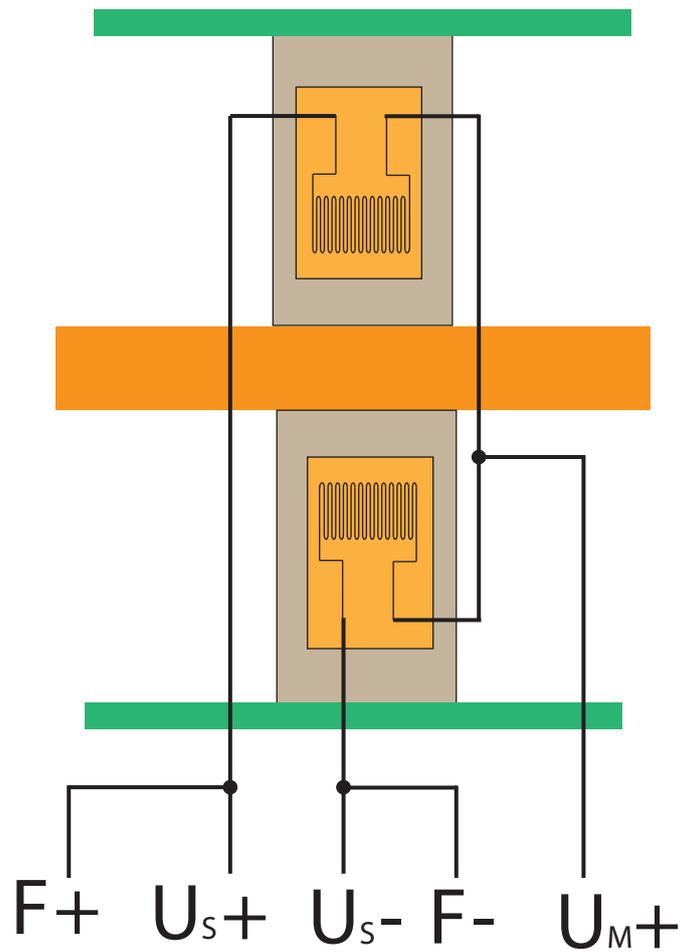


Abbildung 4.3: Prinzipielle Verschaltung von zwei DMS in einem P5 Sensor zu einer Halbbrücke. Bezeichnungen analog zu Abbildung 4.2

4.1.5 Messverstärker

Als Messverstärker dient der Universalmessverstärker MX410 aus der QuantumX Familie der Firma HBM GmbH. Das Modul besitzt vier universelle Eingänge sowie vier Analogausgänge die über BNC Buchsen abgreifbar sind. Es wird über ein Ethernet Kabel mit dem PC verbunden. Siehe [19] für nähere Informationen.

Zum Messen wird mit Hilfe des QuantumX Assistenten ein Sensor definiert. Als Grundlage dienen dabei die Daten der DMS selbst, sowie deren Schaltungsart. Folgende Einstellungen wurden getätigt:

	Offener Typ	Geschlossener Typ
K-Faktor	1.7	1.7
Brückenfaktor	2	1
Schaltungsart	6-Leiter	5-Leiter
Impedanz	120 Ω	120 Ω
max. el. Ausgangssignal	$1 \frac{mV}{V}$	$1 \frac{mV}{V}$
Speisespannung	1V	1V
Phys. Einheit	$\frac{\mu m}{m}$	$\frac{\mu m}{m}$

4.2 Verhalten der Dehnungsmessstreifen bei Temperaturerhöhung

Um das Temperaturverhalten der DMS zu untersuchen, werden verschiedene Anordnungen in einen Ofen gebracht und erwärmt.

4.2.1 DMS LY11-0.3/120 in Halbbrücke

Zwei DMS dieser Klasse werden lose (ohne Applikation auf einen Aufnehmer) zu einer Halbbrücke verschaltet und mit dem Messverstärker verbunden. Das Kabel kann dabei auf der Rückseite aus dem Ofen geführt werden, die Tür kann also geschlossen werden. Von Raumtemperatur werden die DMS auf 70°C erwärmt, das Rauschsignal wird dabei aufgenommen und ist in Abbildung 4.4 dargestellt.

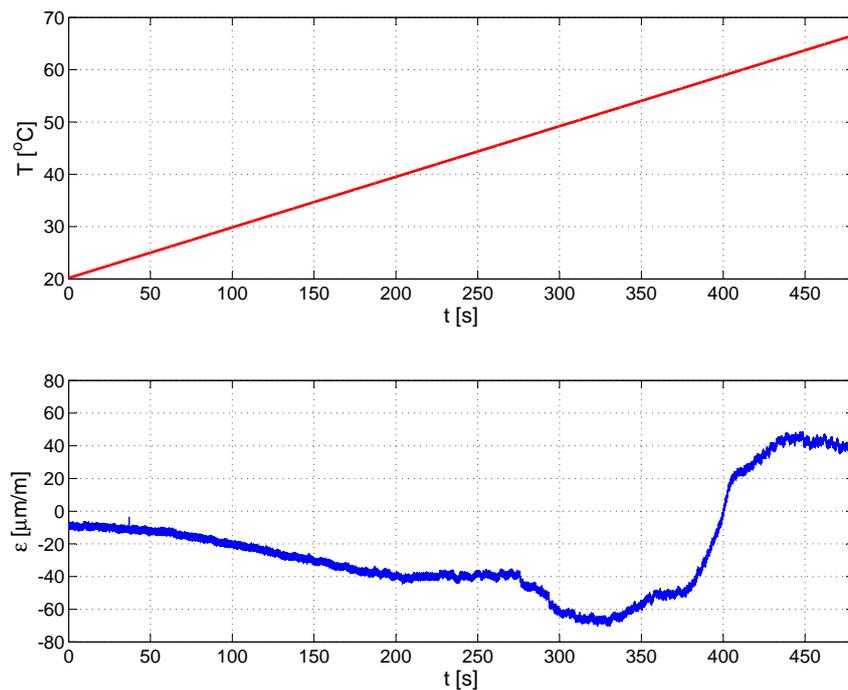


Abbildung 4.4: Verhalten des Rauschens bei Erwärmen der DMS LY11-0.3/120 auf 70°C

Es zeigt sich eine wesentliche Verschlechterung der Signalqualität und

starke Temperaturdrift, was durch mehrere Ursachen hervorgerufen wird:

- Das thermische Rauschen der DMS nimmt bei erhöhten Temperaturen unvermeidlich zu
- Die Temperaturdrift der DMS ist an Stahl mit $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ angepasst. Somit machen die DMS eine scheinbare Stauchung bei Erwärmen durch. Dieser Effekt sollte theoretisch durch die Halbbrückenschaltung kompensiert werden, was in der Realität aber nur zum Teil der Fall ist.
- Geringe Temperaturgradienten zwischen den Brückenzeigen verursachen bereits eine Drift, was in der untersuchten Schaltung, aufgrund der räumlichen Nähe, aber nur eine untergeordnete Rolle spielt.
- Der MX410 kann den DMS eine Mindestspeisespannung von 1V anbieten, die maximal zulässige Spannung dieser beträgt aber nur 0.6V. Das führt zu einer zusätzlichen Erwärmung der DMS und einer Unzuverlässigkeit der Ergebnisse.

4.2.2 DMS LY11-0.6/120 in Halbbrücke

Das in 4.2.1 beschriebene Verfahren wird mit den größeren DMS wiederholt (siehe Abbildung 4.5).

Diese DMS zeigen wesentlich bessere Kompensationsqualitäten als die LY11-0.3/120, was auf das größere Messgitter zurückzuführen ist. Keil [16] empfiehlt größere Messgitter bei schlechten Wärmeleitern (wie auch $GaPO_4$ einer ist) aus Gründen der Wärmeenergiedissipation. Den Haupteinfluss hat aber die Speisespannung von 1V, die bei den DMS der Serie LY11-0.6/120 maximal 1.5V betragen darf und somit voll im vertretbaren Rahmen liegt.

4.2.3 DMS LY11-0.6/120 in Halbbrücke aufgeklebt

Um den Einfluss der Messelemente auf das Temperaturverhalten der Dehnungsmessstreifen bestimmen zu können, werden 2 DMS vom Typ LY11-0.6/120 auf $GaPO_4$ Messelemente appliziert. Das Experiment aus 4.2.1 wird nochmals wiederholt. Die Messung ist in Abbildung 4.6 zu sehen.

Im Vergleich zu den losen DMS zeigt sich eine recht starke Temperaturdrift. Das lässt sich eindeutig auf die Wärmeausdehnung von $GaPO_4$ zurückführen. Der Temperaturgang des DMS ist an ferritischen Stahl mit $\alpha = 10.8 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ angepasst, während sich $GaPO_4$ bei Raumtemperatur mit $\alpha_{11} = 12.78 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ in y-Richtung und mit $\alpha_{11} = 3.69 \cdot 10^{-6} K^{-1}$

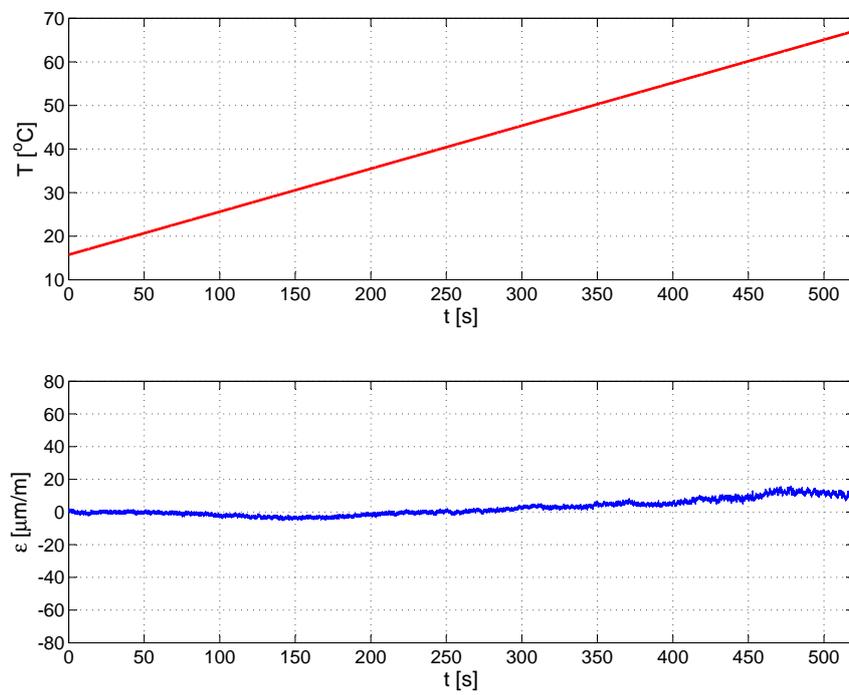


Abbildung 4.5: Verhalten des Rauschens bei Erwärmen der DMS LY11-0.6/120 auf 70°C

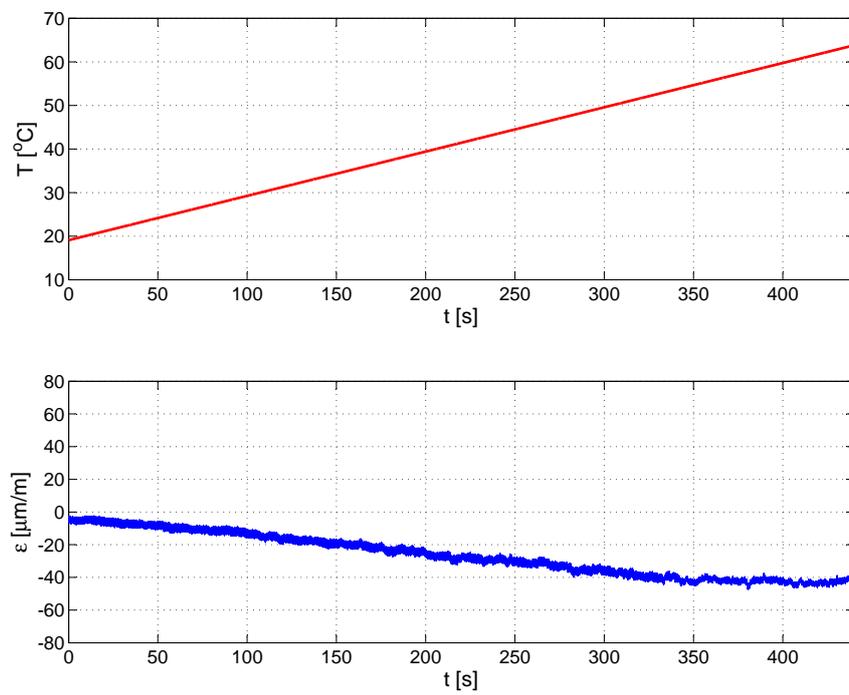


Abbildung 4.6: Temperaturdrift der auf die Messelemente applizierten DMS bei Erwärmen auf 70°C

in z -Richtung dehnt. Legt man diese Unterschiede aus den Dehnungsmessstreifen um, kann man qualitativ feststellen, dass der DMS zwar stärker in die Länge gezogen wird als seinem Temperaturgang entsprechend, aber viel weniger verbreitert. Zieht sich der DMS nun dementsprechend zusammen, wird eine scheinbare Stauchung gemessen. Die Halbbrückenschaltung scheint diesen Effekt nicht kompensieren zu können.

5 Vorstudien

5.1 Offener Typ ungeschirmt

Die erste Schaltungsvariante die verwirklicht wird ist eine DMS Vollbrücke mit 2 unbelasteten Kompensationselementen. Es wird ein piezoelektrischer Sensor der Baureihe P5 verwendet, da es hier möglich ist DMS auf unbelasteten $GaPO_4$ Plättchen anzubringen. Der Sensor wird als offener Typ bezeichnet, da kein Gehäuse um die Rohrfeder gebaut wird und die Verkabelungen außen verlaufen. Es werden DMS vom Typ LY11 - 0.6/120 verwendet. Diese Dehnungsmessstreifen weisen eine Trägerfolie mit Abmessungen von 5x3.1mm auf. Um das Anbringen zu erleichtern wird Stirnseitig am DMS etwa 1mm mit einem Skalpell abgetrennt. Der fertige Sensor wird in eine für die Kraftkalibrieranlage gefertigte Vorrichtung eingespannt, was die Handhabung der ungeschützten Teile erleichtert.

5.1.1 Rauschen

Das Signal des unbelasteten Sensors wird für 300s bei einer Messrate von 50 Hz aufgezeichnet. Der Sensor wird mit einfachen Mitteln möglichst gut vor elektromagnetischer Strahlung geschirmt. Diese Schirmung wird nach 120s entfernt um einen Vergleich mit dem ungeschirmten Sensor zu haben. Das erhaltene Signal ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Es ist ein erheblicher Störeinfluss zu erkennen. Das völlig ungeschirmte Signal hat (trotz Vollbrücke) eine Bandbreite von etwa $3\frac{\mu m}{m}$, was nach Gleichung 3.14 einem Druck von 0.46 bar entsprechen würde. Somit wird deutlich, dass eine möglichst gute Schirmung gegen elektromagnetische Störeinflüsse unvermeidlich ist.

5.1.2 Belastung

Ein Gewicht von 120g wird auf den Sensor gelegt um die Funktionstüchtigkeit der DMS zu prüfen. Das entspricht einer Kraft von 1.17N. Aufgrund der unebenen Auflagefläche (die Membran fehlt beim verwendeten Aufbau noch) ist es nicht sinnvoll hier einen Druck zuzuordnen. Das Gewicht wird für circa 23s liegen gelassen und wieder abgenommen. Das erhaltene Resultat ist in Abbildung 5.2 dargestellt. Das Signal hebt sich zwar aus dem Rauschen ab, es ist aber für diese Ausführung (vor allem in Kombination mit dem langsamen Abdriften des Signals) ein sehr schlechtes Signal-rausch Verhältnis zu erwarten.

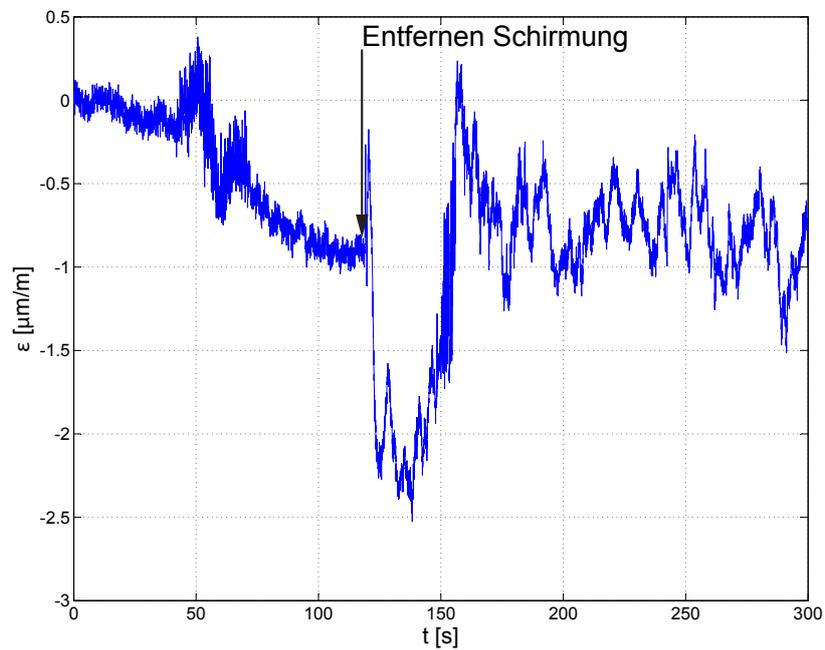


Abbildung 5.1: Reines Rauschsignal des Sensors mit Abschirmung die nach 120s entfernt wird.

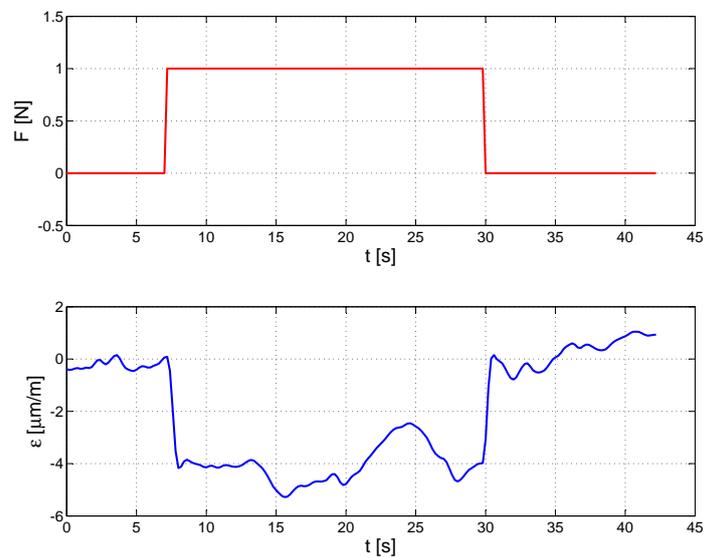


Abbildung 5.2: Belastung des Sensors mit einer Kraft von etwa 1N. Das Rauschen ist hier wegen der niedrigen Messrate nicht gut ersichtlich.

5.2 Offener Typ geschirmt

Um Störeinflüsse und das Rauschen zu minimieren, werden die bisher verwendeten einzelnen Kabelstränge durch ein geschirmtes Kabel ersetzt (siehe Abbildung 5.3). Das Rauschsignal wird bei einer Messrate von 600 Hz unter elektromagnetischer Abschirmung aufgenommen und ist in Abbildung 5.4 gezeigt. Die Verwendung eines geschirmten Kabels verringert das Rauschen wesentlich. Vor allem ist das Abdriften des Signals nicht mehr vorhanden.



Abbildung 5.3: 8-Leiter Kabel im Querschnitt, Isolation der einzelnen Adern sowie Ummantelung sichtbar.

Um Störfrequenzen zu finden wird mit den Daten eine schnelle Fourier Transformation (FFT) durchgeführt. Das normierte Frequenzspektrum ist in Abbildung 5.5 dargestellt. Es sind deutlich erhöhte Frequenzanteile bei 50 Hz, sowie bei der 3. und 5. Harmonischen dieser Schwingung zu erkennen. Somit ist es erwiesen, dass die Störfrequenzen aus dem Stromnetz stammen. Zudem scheint es noch ein oder mehrere sehr niederfrequente Störsignale zu geben, die auch in Abbildung 5.4 zu sehen sind.

5.2.1 Eliminierung der Störeinflüsse

Um die sinusförmige Störung des Signals in Abbildung 5.4 zu filtern wird ein numerisch generierter Frequenzfilter verwendet. Es wurde ein Notch-Filter (Kerb-Filter) gewählt der Schwingungen bei 50 Hz und deren Harmonische eliminiert. Der Filter ist in Abbildung 5.6 visualisiert.

5.2.2 Rauschstärke

Um eine Aussage über die Stärke des Rauschens zu gewinnen wird die Verteilung der Messpunkte eines Rauschsignals bei 600Hz verwendet (siehe auch

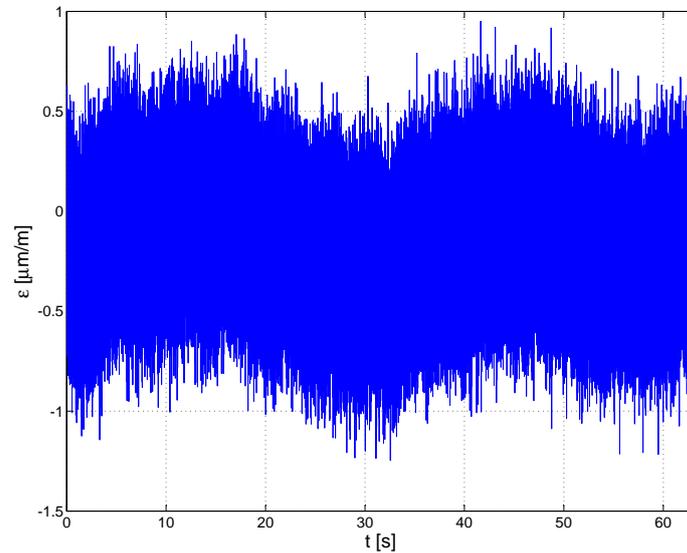


Abbildung 5.4: Rauschsignal des Sensors mit geschirmten Kabel bei 600 Hz.

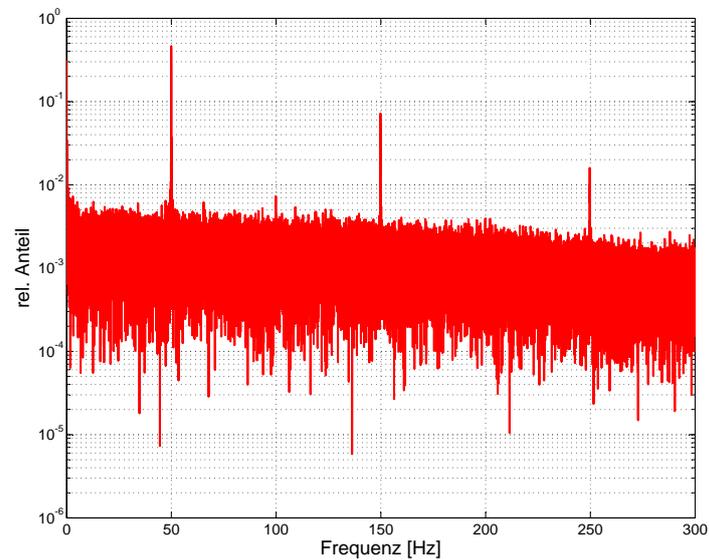


Abbildung 5.5: Frequenzspektrum des gemessenen Rauschsignals in halblogarithmischer Darstellung. Der Einfluss aus dem Stromnetz ist deutlich zu erkennen.

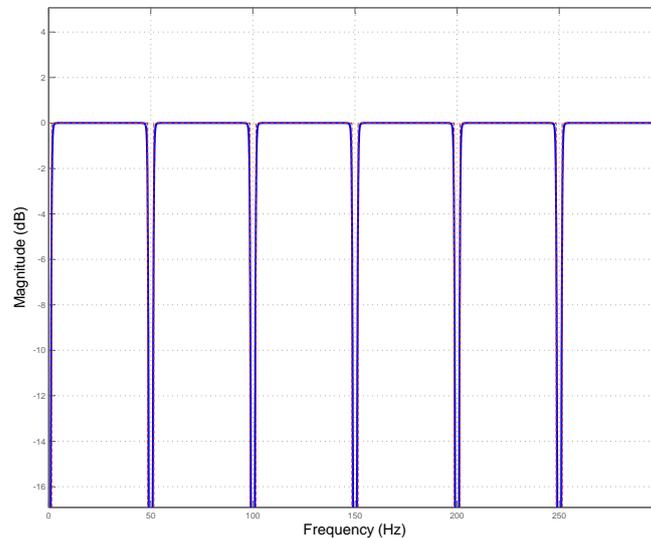


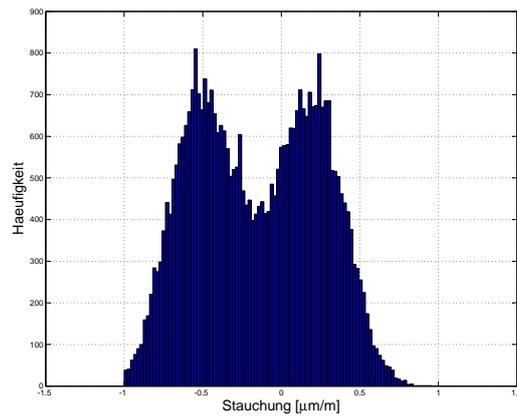
Abbildung 5.6: Notch-Filter zum Eliminieren der Störeinflüsse aus dem Stromnetz.

Abbildung 5.4). Es zeigt sich, dass das ursprüngliche Signal aufgrund der Superposition mit dem sinusförmigen Störsignal deutlich von einer idealen Normalverteilung abweicht. Deshalb kann nur die Verteilung des gefilterten Signals mit einer Gaußverteilung sinnvoll gefittet werden (siehe Abbildung 5.7).

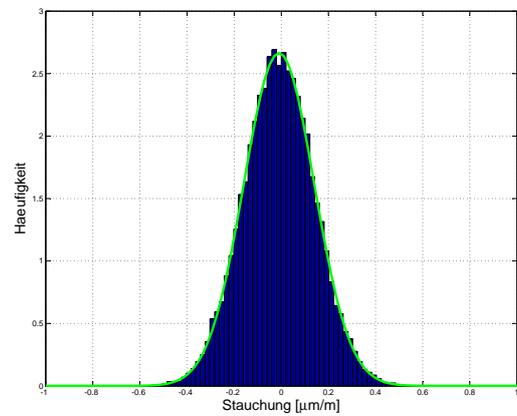
Für das gemessene Signal ergibt sich die effektive Stärke des Rauschsignals aus der Standardabweichung der Normalverteilung mit $\sigma = 0.15 \frac{\mu m}{m}$. Ein Signal-Rausch-Verhältnis kann somit für eine beliebige mittlere Signalamplitude aus Division durch σ gewonnen werden. Zudem lässt sich unter Verwendung von Gleichung 3.14 aussagen, dass unter den oben erläuterten Bedingungen bei Raumtemperatur eine Auflösung von 0.02 bar erreichbar wäre.

5.2.3 Kraftkalibrieranlage

In der Kraftkalibrieranlage Midi 10-20/4x11 (Messphysik GmbH) wird der Sensor mit 4 mal 100 N periodisch belastet und entlastet. Es werden die Signale von Messelementen und DMS aufgezeichnet. Dabei wird ein CMD 600 für die piezoelektrischen Messelemente und ein Quantum MX410 Modul für die DMS verwendet. Über die Analogausgänge der beiden Messverstärker



(a) Verteilung der Messpunkte ohne Filter



(b) Verteilung der Messpunkte nach Verwendung eines Notch-Filters

Abbildung 5.7: Verteilung der Messpunkte des Rauschsignals der ursprünglichen Messung und nach Verwendung eines Notch-Filters.

werden die Spannungen über ein INDICOM Modul angezeigt (siehe Abbildung 5.8). Da das Signal vom CMD 600 aufgrund fehlender Isolation einer Drift unterliegt, wird es anschließend mit einem linearen Fit korrigiert. Dieser orientiert sich an den Spannungswerten bei den Kraftminima und setzt diese auf eine neue x-Achse.

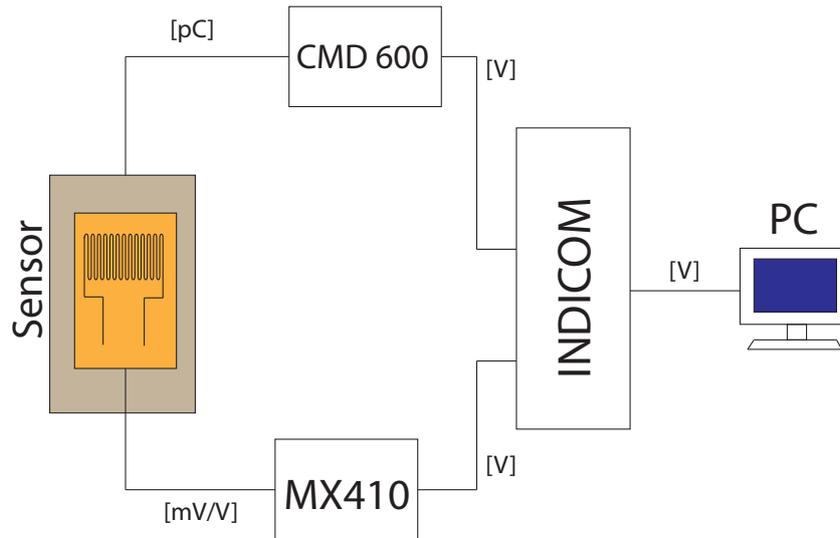


Abbildung 5.8: Schematischer Versuchsaufbau zum parallelen Messen von Piezo- und DMS Signal.

Die Signale in Abbildung 5.9 werden in Volt ausgegeben, wobei am CMD 600 eine Empfindlichkeit von 0.01 V/N eingestellt ist. Die Quelleneinheit des Quantum MX410 ist $\frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ und am Ausgang wird 1 V für $100 \frac{\mu\text{m}}{\text{m}}$ ausgegeben. Aus Gleichung 3.7 lässt sich somit errechnen, dass 1 V 48 N entspricht. Hier darf der Kraftnebenschlussfaktor 0.93 nicht miteinbezogen werden, da der vermessene Sensor keine Hülle besitzt über die Kraft abgeleitet werden kann. Eine Übersicht über die Kraft- und Spannungspeaks und die entsprechenden Umrechnungen ist in Tabelle 1 gegeben.

Trägt man die Kraft die mit den Piezoelementen gemessen wurde über jene aus dem DMS Signal auf zeigt sich ein deutliches Hystereseverhalten, siehe Abbildung 5.10. Das deutet für gewöhnlich auf eine Unlinearität im Sensor hin. Es sind hier aber einige andere verfälschende Faktoren zu berücksichtigen:

- Die Drift aufgrund der mangelnden Isolation kann nicht vollständig kompensiert werden.

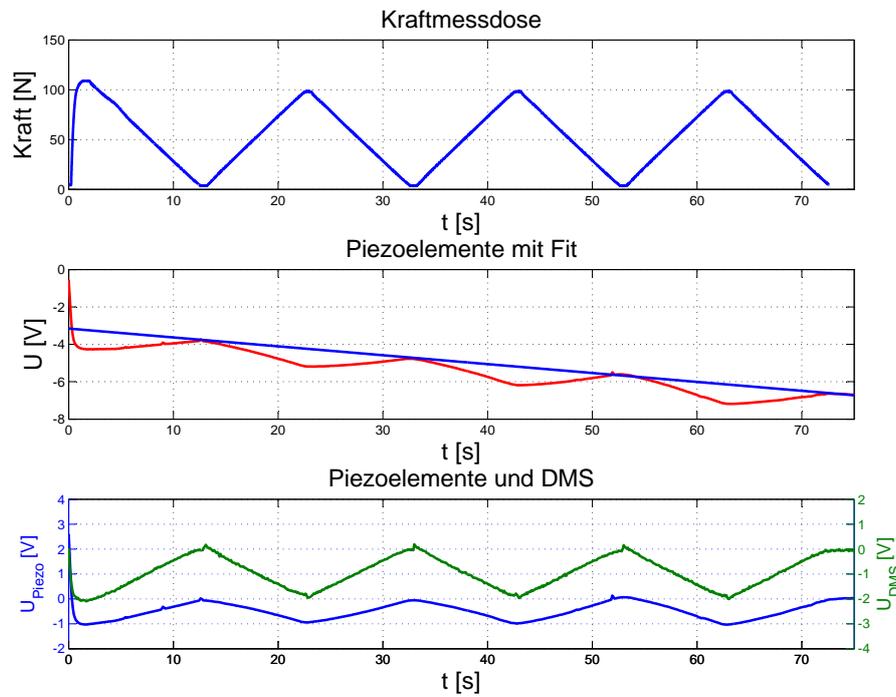


Abbildung 5.9: Piezoelektrisches Signal und das der DMS beim periodischen Anlegen von Kraft. Das piezoelektrische Signal wird durch einen linearen Fit auf eine neue x-Achse gebracht um die Werte vergleichen zu können.

Peak	F [N]	U_{DMS} [V]	U_{Piezo} [V]	F_{DMS} [N]	F_{Piezo} [N]
1	109	2.08	1.03	99.8	103
2	98	1.95	0.97	93.6	96.8
3	98	1.97	0.94	94.6	94
4	98	2.01	1.01	96.5	101

Tabelle 1: Übersicht der vermessenen Kraft- und Spannungspeaks.

- Die DMS Brückenschaltung ist praktisch ungeschirmt. Das führt zu einer großen Rauschamplitude und eventuell auch zu einer Drift.
- Die Umrechnungsfaktoren stammen aus rein theoretischen Betrachtungen und sind deshalb fehlerbehaftet.

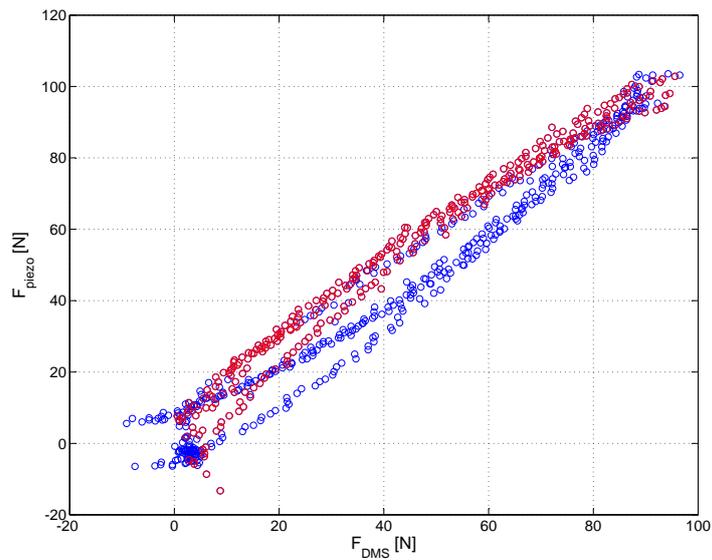


Abbildung 5.10: Signal der Messelemente über das der DMS, jeweils in eine Kraft umgerechnet. Werte beim Belasten sind in Rot, Werte beim Entlasten in Blau dargestellt.

Dennoch ist aufgrund der Messergebnisse aus Abbildung 5.9 nachgewiesen, dass beide Messmethoden parallel einsetzbar sind und in guter Kohärenz zueinander stehen.

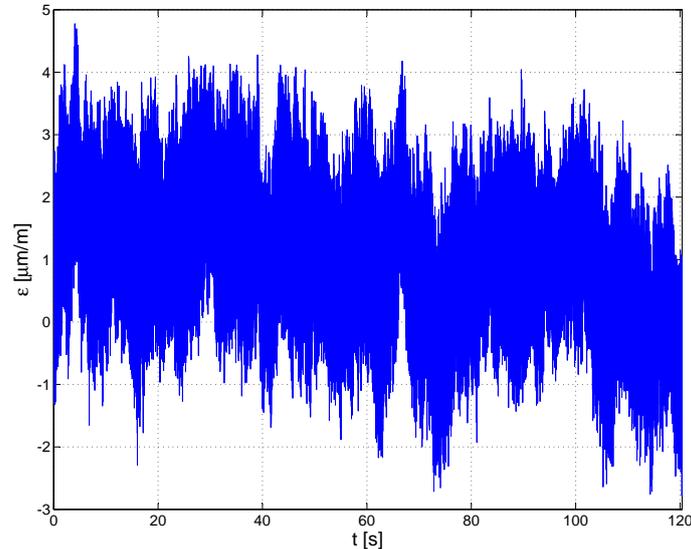


Abbildung 5.11: Rauschsignal eines Sensors mit DMS Halbbrücke. Messrate 200Hz.

5.3 Offener Typ mit Halbbrücke

Auf einen Sensor werden 2 DMS vom Typ 1-LY11-0.6/120 aufgeklebt und als Halbbrücke verschaltet. Einer der DMS bleibt dabei unbelastet. Auf Schirmung der Leitungen wird kein Wert gelegt, es sollen lediglich die Möglichkeiten im Vergleich zu einer Vollbrückenschaltung abgeschätzt werden. Es wird das Rauschsignal aufgezeichnet, wobei nur eine improvisierte Schirmung gegen elektromagnetische Strahlung verwendet wird. Das Rauschen ist in Abbildung 5.11 dargestellt. Das Rauschsignal zeigt mehr als doppelt so hohe Amplitude wie das Rauschen des Vollbrücken-Sensors (vgl. Abb. 5.5), also etwa eine Auflösung von 1 bar.

Auch für dieses Signal wird eine FFT durchgeführt um Störeffekte zu isolieren. Das entsprechende Frequenzspektrum ist in Abbildung 5.12 zu sehen. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie für den Vollbrücken-Sensor, mit dem Unterschied, dass der Peak für sehr niederfrequente Störungen höher ist als der der Netzfrequenz bei 50Hz, vermutlich wegen der kleineren Messrate. Auch sind die Störanteile generell höher. Zudem reicht das Frequenzspektrum nur bis 100Hz, da mit einer Messrate von 200Hz (statt 600Hz) aufgezeichnet wurde.

Verfährt man mit dem erhaltenen Signal analog wie in Abschnitt 5.2.1

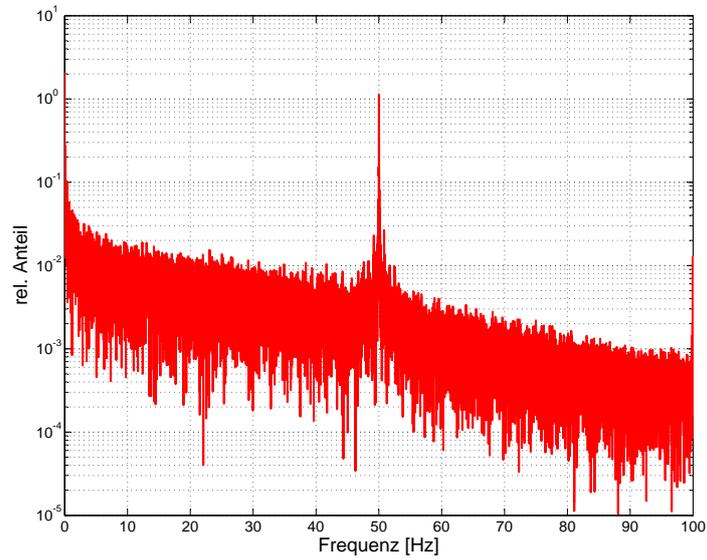


Abbildung 5.12: *Frequenzspektrum eines Sensors mit DMS Halbbrücke in halblogarithmischer Darstellung.*

ergibt sich eine Standardabweichung von $\sigma = 0.4 \frac{\mu m}{m}$, was einem Druck-Auflösungsvermögen von 0.06 bar entspricht.

5.4 Temperaturverhalten offener Typ

Das Verhalten des Sensors bei Erwärmen soll überprüft werden. Dazu wird er in einen Laborofen gebracht, der auf 70°C aufgeheizt wird. Der Temperaturgang des unbelasteten Sensors ist in Abbildung 5.13 zu sehen.

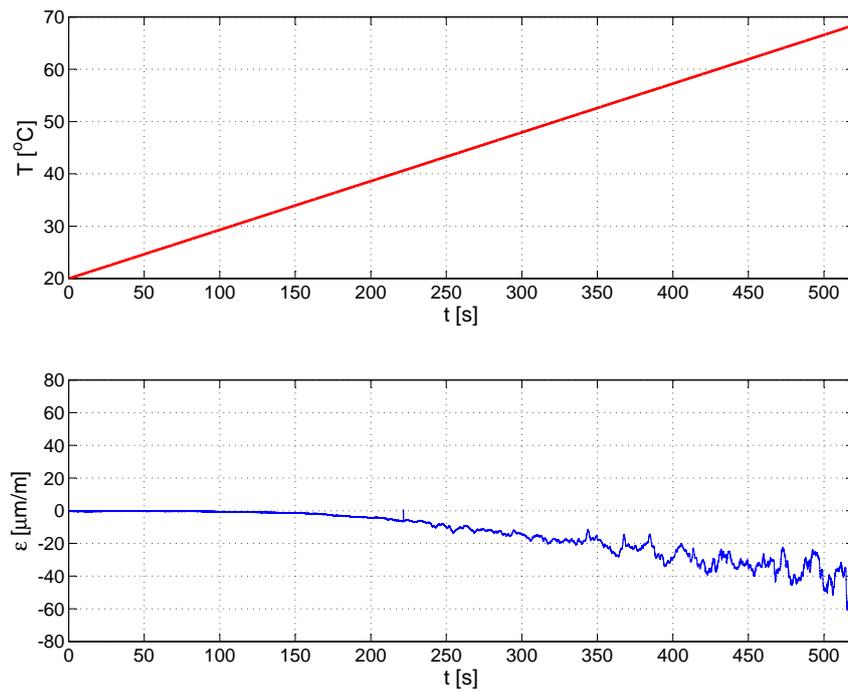


Abbildung 5.13: Offener Typ beim Erwärmen auf 70°C

6 Auslegung des geschlossenen Typs

Es sollen 3 Sensoren eines geschlossenen Typs gebaut werden, was ein praxisnahes Messen ermöglichen und die Handhabung erleichtern soll. Zudem ist die elektromagnetische Schirmung durch das Gehäuse sehr gut, wodurch sich bereits abschätzen lässt, was mit dem DMS-Konzept erreichbar ist.

6.1 Konzept

Die Messelemente werden, wie auch beim offenen Typ, mit Dehnungsmessstreifen beklebt, aber diesmal werden die DMS vor dem Einbau und mit höherer Präzision aufgebracht. Die Kabel werden ebenfalls vor dem Einbau angelötet. Um diese anschließend aus dem Sensor führen zu können, werden folgende Bauteile mit einer zusätzlichen Bohrung versehen (siehe A): Isolierscheiben, Kontaktscheiben, Rohrfeder, Seismische Masse. Außerhalb des Sensors sollen die DMS zu einer Halbbrücke verschaltet und mit dem Messkabel verlötet werden. Das Kabel für die Ladungsmessung der Messelemente wird mit eigens konzipierten Anschlusssteckern an die Ladungsableitungshülsen kontaktiert. Die beiden Messkabel sollen geschützt sein und das komplette System soll abgedichtet werden.

6.2 Applizieren der DMS auf die Messelemente

Die Dehnungsmessstreifen sollen mit Hilfe des Schnellklebstoffs Z70 auf den Messelementen befestigt werden. Um dabei einen stabilen Halt der Messelemente zu gewährleisten werden eigene Vorrichtungen (siehe Anhang A) verwendet. DMS der Serie LY11-0.6/120 müssen vor dem Bekleben mit einem Skalpell zugeschnitten werden, mindestens 1mm an Länge und Breite sollte von der Trägerfolie entfernt werden. Die DMS werden unter Reinraumbedingungen appliziert um keine Verunreinigungen zwischen DMS und Messelement zu riskieren. Da eine sehr dünne Kleberschicht benötigt wird (durch die glatte Oberfläche der Messelemente bedingt) und die zu klebende Fläche sehr klein ist, ist ein direktes Auftragen aus der Kleberflasche nicht möglich. Daher wird ein, zu einer Spitze gerolltes, Reinraumentuch in einem Tropfen des Klebers getränkt und damit die Klebefläche bestrichen. Danach muss der DMS rasch und präzise aufgebracht werden. Die Position auf dem Messelement ist dabei zweitrangig, auf eine genaue Ausrichtung parallel zu den Kanten sollte jedoch großer Wert gelegt werden. Der Dehnungsmessstreifen muss danach für etwa 1 Minute angedrückt werden, danach sollte der Kleber ausreichend ausgehärtet sein. Das Andrücken kann bei den DMS der Serie LY11-0.6/120 mit dem Finger geschehen, bei den kleineren DMS der Serie

LY11-0.3/120 sollte mit einer geeigneten Vorrichtung genauer gedrückt werden. Beispiele für je einen aufgeklebten DMS jeder Serie sind in Abbildung 6.1 zu sehen.

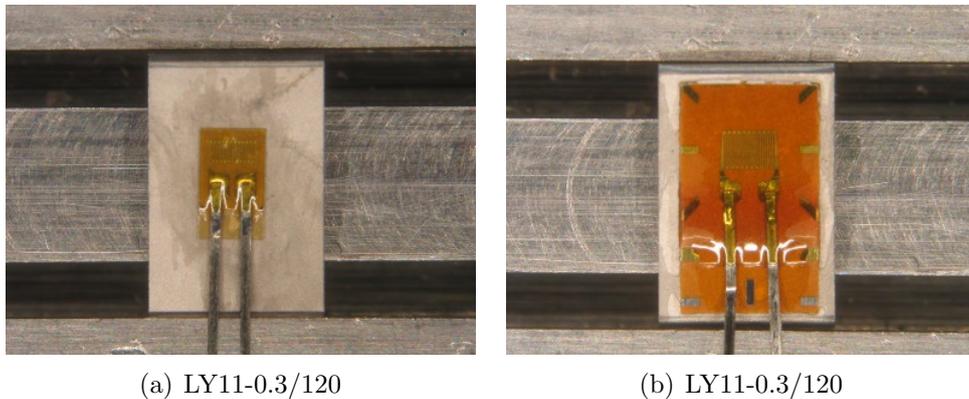


Abbildung 6.1: Ergebnis des Beklebens der Messelemente.

Bei den DMS der Serie LY11-0.3/120 zeigen sich große Haftungsprobleme, nur 20% der im Rahmen dieser Versuchsreihe gemachten Klebeexperimente konnten erfolgreich abgeschlossen werden. Die größten Schwierigkeiten zeigen sich in folgenden Punkten:

- Die Klebefläche der DMS ist sehr klein, wodurch ein präzises Aufbringen des Klebers schwierig ist. Bei zu viel Kleber härtet er nicht aus, bei zu wenig ist keine Haftung gegeben.
- Die glatte Oberfläche der Messelemente erschwert das Aufbringen des Klebers und das Ausrichten der DMS zusätzlich

6.3 Zusammenbau Rohrfeder - Ermittlung der Vorspannung

Mit Hilfe der aufgeklebten Dehnungsmessstreifen kann ermittelt werden, wie stark die Rohrfeder die Messelemente vorspannt. Es wird ein applizierter Dehnungsmessstreifen, der später auf der Druckseite eines Sensors eingebaut, wird zusammen mit einem Dummy-DMS zu einer Halbbrücke verschalten und dann gemessen. Das Signal wird auf Null gesetzt und als Referenz verwendet.

Es werden drei Rohrfedern mit folgenden Seriennummern zum Zusammenbau von drei Testsensoren verwendet:

	$\epsilon_0 [\frac{\mu m}{m}]$	$F_1 [N]$
RF1	-75	37
RF5	403	-
RF3	823	-

Tabelle 2: Gemessene Stauchungen der Messelemente nach Einschrauben in die Zusammenbauvorrichtung. Für Rohrfeder 1 wurde das Referenzsignal gesetzt und es kann somit eine zugehörige Vorspannung berechnet werden.

STAT 01
STAT 05
STAT 03

Nach dem Einbau entsprechend des Arbeitsplans für den P5 Sensor [23] befindet sich das Messelement bereits in der richtigen Anordnung mit der Rohrfeder, ist aber lediglich eingeschraubt. Die Kabel sind auf der Unterseite der verwendeten Vorrichtung herausgeführt. Dabei befinden sich die kompensationsseitigen Kabel bereits in der richtigen Position, die druckseitigen müssen in Nachhinein durch die unteren Bohrungen geführt werden (dann dienen farbliche Markierungen zur Unterscheidung von Druck- und Kompensationsseite).

Erneut wird der Dummy-DMS mit dem ursprünglich gemessenen zu einer Halbbrücke verlötet und gemessen. Die Messung wird auch für die beiden anderen Sensoren gemacht, eine Berechnung der Vorspannung ist für diese aber nicht möglich, da für die unbelasteten DMS kein Referenzsignal gemessen werden konnte. Für Rohrfeder 1 kann die Spannung mit Gleichung 3.6 berechnet werden. Die Messungen sind in Tabelle 2 angeführt.

Nach dem Schweißen in der Elektronenstrahlschweißanlage [23] hat die Vorspannung ihren endgültigen Wert erreicht. Um sie trotz unvollkommener Brückenweige im Verhältnis zum eingeschraubten Zustand möglichst gut ermitteln zu können wird folgendermaßen vorgegangen: Wie zuvor wird der druckseitig aufgeklebte DMS mit dem Dummy DMS verschalten. Nach der Messung der Stauchung werden die Brückenweige der Halbbrücke vertauscht (Dummy-DMS und druckseitiger DMS werden an jeweils die Speisespannung umgekehrten Vorzeichens angeschlossen). Man erhält einen zweiten Messwert der, bei idealer Schaltung, gleich dem ersten mit umgekehrten Vorzeichen wäre. Die Messungen werden zwei mal durchgeführt. Aus den beiden Werten lässt sich aber sehr einfach eine mittlere Stauchung und damit die vorspannende Kraft ermitteln. Dazu werden vor der Umrechnung die Stauchungen aus Tabelle 2 subtrahiert. Die erhaltenen Werte, sowie Stauchung und Vorspannung sind in Tabelle 2 angeführt.

	$\epsilon_1 [\frac{\mu}{m}]$	$\epsilon_2 [\frac{\mu}{m}]$	$\epsilon_3 [\frac{\mu}{m}]$	$\epsilon_4 [\frac{\mu}{m}]$	$\epsilon_e [\frac{\mu}{m}]$	$\epsilon_e - \epsilon_0 [\frac{\mu}{m}]$	$F_2 [N]$
RF1	-210	420	-198	421	312	237	115
RF5	660	-415	698	-455	557	154	75
RF3	1250	-1088	1292	-1055	1171	348	169

Tabelle 3: Gemessene Stauchungen und daraus bestimmte Vorspannungen. ϵ_1 und ϵ_3 ist der aktive DMS an negative Speisespannung angeschlossen, bei ϵ_2 und ϵ_4 an positive. ϵ_e ist das Mittel der Absolutwerte, mit der Differenz zu den oberen Ergebnissen wird die Vorspannung F_2 berechnet.

Bei Ausbau aus der Vorrichtung zeigte sich, dass die Kabel an einem der kompensationsseitigen DMS an der Rohrfeder STAT05 beim Schweißprozess beschädigt wurden. Da die DMS innen an den Messelementen angebracht sind ist ein neuerliches Anlöten nicht mehr möglich. Daher wurde kompensationsseitig im Nachhinein ein neuer DMS an der Außenseite aufgeklebt und verlötet (wie auch in Abbildung 2.5 zu sehen).

6.4 Zusammenbau Basissensor

In einem standardisierten Arbeitsplan für den P5 Sensor werden die Rohrfedern folglich vermessen und mit einem Gehäuse versehen. Dabei zeigen sich Schwierigkeiten mit den Kabeln der Dehnungsmesstreifen, die zusätzlich aus dem Sensor geführt werden. Sie müssen bei allen Arbeitsschritten seitlich am Sensor oder durch Zurückführen in die Rohrfeder fixiert werden. An einem Kabel der Rohrfeder STAT01 brach infolge dieser Belastungen eine Isolierung am Ausgang des Sensors auf. Dieser Sensor wurde somit unbrauchbar.

6.5 Anschluss der Messkabel

Zwei Kabel werden benötigt um sowohl die piezoelektrischen Signale als auch die der DMS vom Sensor wegzuführen:

- Piezokabel von AVL: Teflonbeschichtetes, kapazitätsarmes Kabel zur Ableitung der Ladungen zum Messverstärker. Ein isolierter und kohlenstoffbeschichteter Innenleiter wird von einer metallischen Ummanntelung umgeben.
- CABA1 von HBM: Geschirmtes 6-Leiter Kabel zur Messung der Widerstandsänderung. Außer der Anzahl der Innenleiter analog zu dem Kabel in Abbildung 5.3.

Die Ladungsableitungshülsen des Basissensors werden mit lötbaren Kupfersteckern kontaktiert (siehe Anhang A). An diesen werden die Ummantelung und der Innenleiter des Piezokabels gelötet. Das CABA1 Kabel wird mit den von den DMS kommenden Leitungen verschaltet. Zum Schutz der Lötstellen werden 2 verschweißte Fensterabdeckungen über die Anordnung geführt und am Sensor angeklebt. Zur Versiegelung wird ein Schrumpfschlauch über das Ende der Fensterabdeckungen geschrumpft und mit Kleber versiegelt. Der fertige Sensor ist in Abbildung 6.2 gezeigt.



Abbildung 6.2: Fertiger Sensor mit Schutzabdeckung und Schrumpfschlauch zur Versiegelung.

7 Messungen am geschlossenen Typ

7.1 Rauschsignal bei Raumtemperatur

Mit dem in Abschnitt 5 ermittelten Verfahren wird auch das Rauschsignal des geschlossenen Typs untersucht. Das Rauschsignal der beiden verbliebenen Sensoren wird aufgenommen und die Verteilung der Messpunkte vor und nach Anwenden eines Notch-Filters betrachtet. Das Rauschsignal von Sensor STAT05 und STAT03 ist in Abbildung 7.1 zu sehen. Auf jede Art einer zusätzlichen Abschirmung durch einen Faraday-Käfig wurde hier im Gegensatz zum offenen Typ verzichtet.

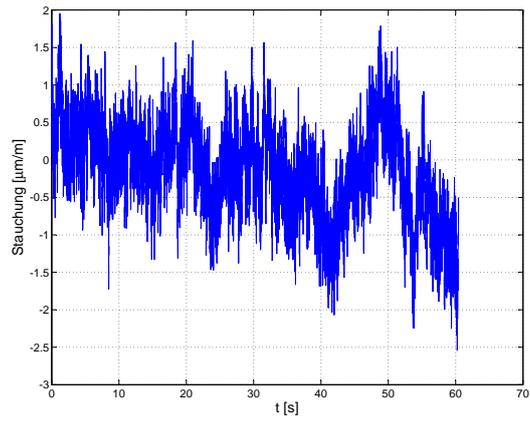
Abbildung 7.2 zeigt die Frequenzspektren der beiden Sensoren. Im Vergleich zum offenen Typ ist die Einstreuung aus dem Stromnetz stark reduziert. Dennoch ist noch ein Peak bei 50 Hz erkennbar, vor allem bei Sensor STAT03. Nach genauerer Untersuchung stellte sich heraus, dass bei diesem Sensor eine DMS Lötstelle mit dem Gehäuse kurzgeschlossen sein muss, da das Signal divergiert sobald das Sensorgehäuse Kontakt zu einem leitenden Material hat. Der Sensor STAT03 ist somit für weitere Messungen unbrauchbar.

Die Verteilung der Messpunkte wird sowohl im ursprünglichen als auch im gefilterten Zustand geplottet und mit einer Normalverteilung gefittet (siehe Abbildung 7.3). Es ergeben sich folgende Standardabweichungen σ und somit effektive Rauschstärken:

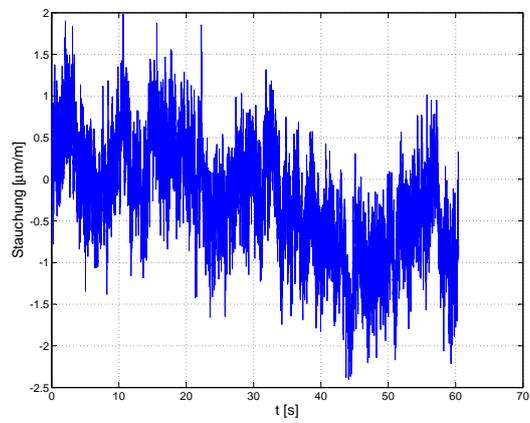
Sensor	$\sigma_{orig}[bar]$	$\sigma_{filt}[bar]$
STAT05	0.096	0.052
STAT03	0.104	0.052

7.2 Verhalten bei Erwärmen

Werden die Sensoren von Raumtemperatur auf $70^{\circ}C$ erwärmt, zeigt sich der gleiche Trend wie schon beim offenen Typ. In Abbildung 7.4 ist eine recht deutliche Temperaturdrift zu erkennen. Die Drift ist beim Sensor STAT03 mit dem Gehäusekurzschluss aber wesentlich stärker, wodurch gezeigt ist, dass eine bessere Schirmung auch gleichmäßigere Erwärmung zur Folge hat und somit das Driftverhalten verbessert. Die Temperaturdrift des STAT05 Sensors findet in einem Bereich von etwa $20\frac{\mu m}{m}$ statt, was einem Druck von 3 bar entspricht. Bei einer Temperatur von $560^{\circ}C$ wäre die Drift unakzeptabel hoch.

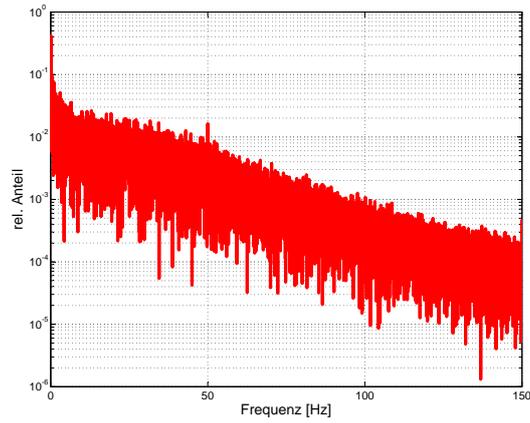


(a) Rauschen des Sensors STAT05

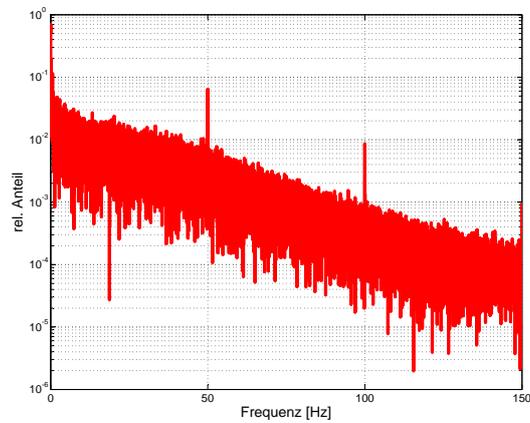


(b) Rauschen des Sensors STAT03

Abbildung 7.1: Reine Rauschsignale der Sensoren.

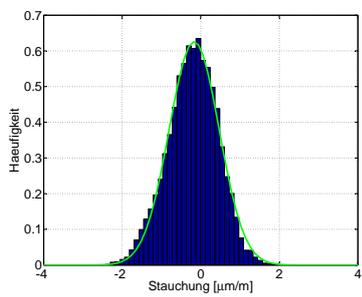


(a) Frequenzspektrum des Sensors STAT05

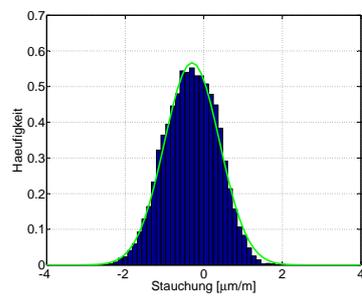


(b) Frequenzspektrum des Sensors STAT03

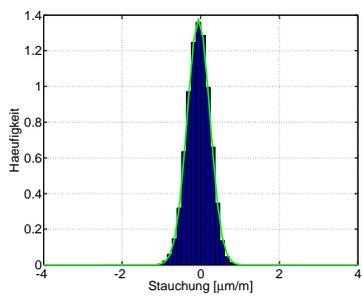
Abbildung 7.2: *Frequenzspektren der Sensoren in halblogarithmischer Darstellung.*



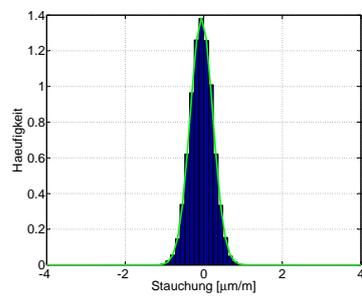
(a) Messpunkteverteilung STAT05



(b) Messpunkteverteilung STAT03



(c) Gefilterte Verteilung STAT05



(d) Gefilterte Verteilung STAT03

Abbildung 7.3: Verteilungen der Messpunkte der Rauschsignale.

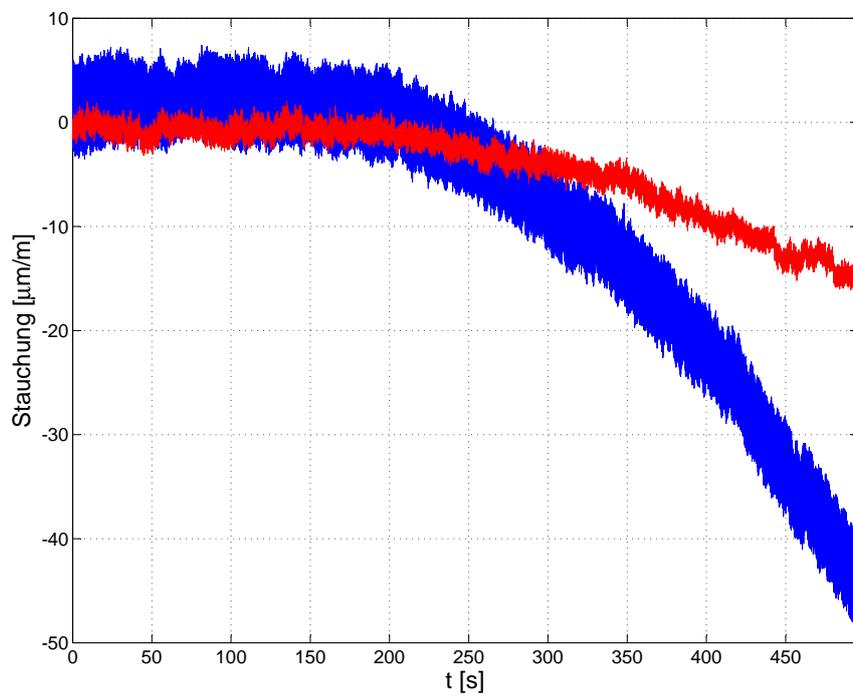


Abbildung 7.4: Verhalten der Sensoren STAT05 und STAT03 bei Erhitzen auf 70°C mit einer Heizrate von 0.1K s^{-1} .

7.3 Rauschen bei erhöhter Temperatur

Nach dem Erhitzen wird die Temperatur des Ofens auf $70^{\circ}C$ gehalten. Ein Rauschen wird erneut aufgenommen und damit analog verfahren wie in Abschnitt 7.1. Die erhaltenen Verteilungen sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Die Störeinstreuung von Sensor STAT03, der mit dem Gehäuse kurzgeschlossen ist, ist bereits erheblich. Dieser Sensor wird für die folgenden Messungen nicht mehr verwendet. Die erhaltenen effektiven Rauschstärken betragen:

Sensor	$\sigma_{orig}[bar]$	$\sigma_{filt}[bar]$
STAT05	0.133	0.049
STAT03	-	0.049

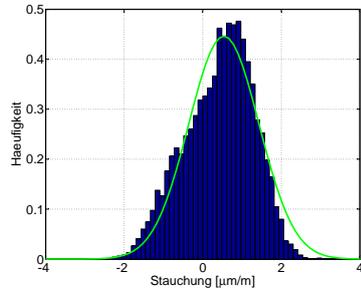
Mit entsprechender Schirmung wären also auch bei erhöhten Temperaturen ein recht gutes Auflösungsvermögen zu erreichen. Betrachtet man die gfilterten Werte hätten auch hohe Temperaturen keinen großen Einfluss auf die Rauschstärke. Geht man allerdings von einer linearen Steigerung der ungefilterten Rauschstärke aus, würde das Auflösungsvermögen bei $560^{\circ}C$ nur mehr 0.44 bar betragen.

7.4 Verhalten bei Drucksprüngen

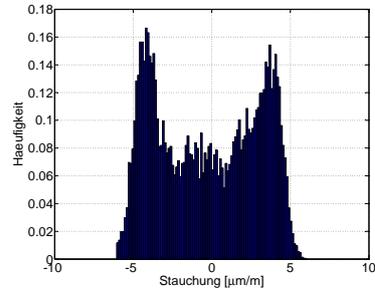
An einer Druckwaage kann hydraulisch durch Verwenden von Gewichten ein genau definierter Druck angelegt werden, gefolgt von einer sprunghaften Entlastung. Der Drucksprung bei dieser Entlastung kann gemessen und verglichen werden. Die gemessenen Druckverläufe für 2, 6 und 20 bar sind im Folgenden dargestellt. Es werden die relativen Längenänderungen für die Dehnungsmessstreifen und die Ladung für die Messelemente gemessen und anschließend mit den Gleichungen 3.14 und 3.21 auf Druck umgerechnet. Somit wird die Kohärenz der beiden Signale sowie die Genauigkeit der Messung verifiziert.

7.4.1 Drucksprung 2 bar

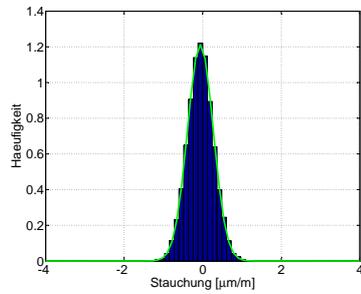
Abbildung 7.6 zeigt die Druckverläufe von DMS- und piezoelektrischem Signal bei Drucksprüngen von 2 bar. Zuerst ist das Anlegen der Drücke zu sehen, was wegen der manuellen Schraubbewegung ein unregelmäßiger Verlauf ist, gefolgt von schnellen Drucksprüngen. Der Prozess wird drei mal wiederholt. Die Drucksprünge werden vermessen und verglichen, wie in Tabelle 4 zu sehen.



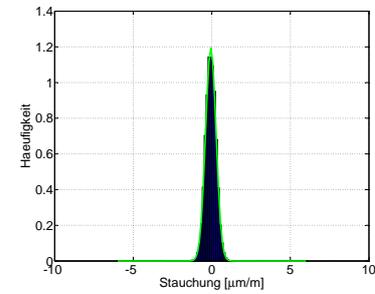
(a) 70°C STAT05



(b) 70°C STAT03



(c) 70°C gefiltert STAT05



(d) 70°C gefiltert STAT03

Abbildung 7.5: Verteilungen der Messpunkte der Rauschsignale bei 70°C. Zu beachten ist die vergrößerte Skala auf der rechten Seite wegen der großen Störeinflüsse.

$\epsilon [\frac{\mu m}{m}]$	$p_{DMS} [bar]$	Q [pC]	$p_{Piezo} [bar]$
13.6	2.03	175	1.86
14	2.09	186	1.98
13.5	2.01	182	1.94

Tabelle 4: Gemessene Werte und daraus berechnete Drücke für einen Drucksprung von 2 bar.

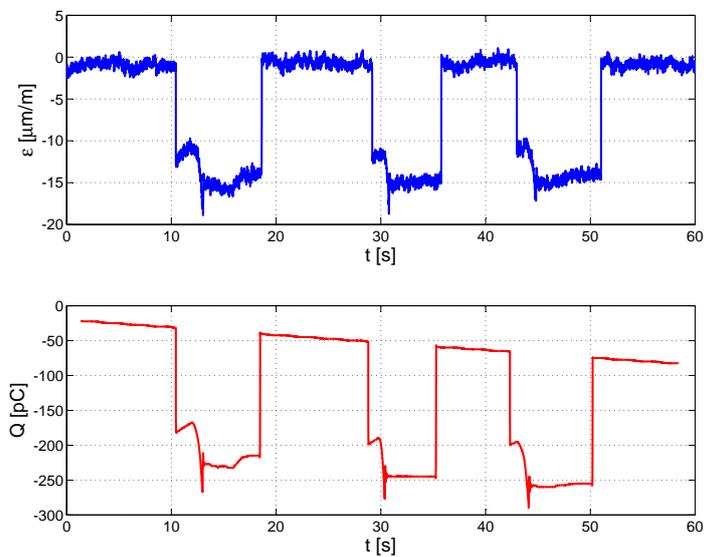


Abbildung 7.6: Druckverlauf bei Anlegen von 2 bar und schneller Entlastung. Beim piezoelektrischen Signal ist aufgrund mangelhafter Isolation eine Drift zu erkennen, was für das Vermessen der Drucksprünge aber unbedeutend ist. Das Vorzeichen der Ladung wurde der Übersichtlichkeit halber an die Längenänderung angepasst. Drucksprünge finden bei 18, 35, und 50 Sekunden statt.

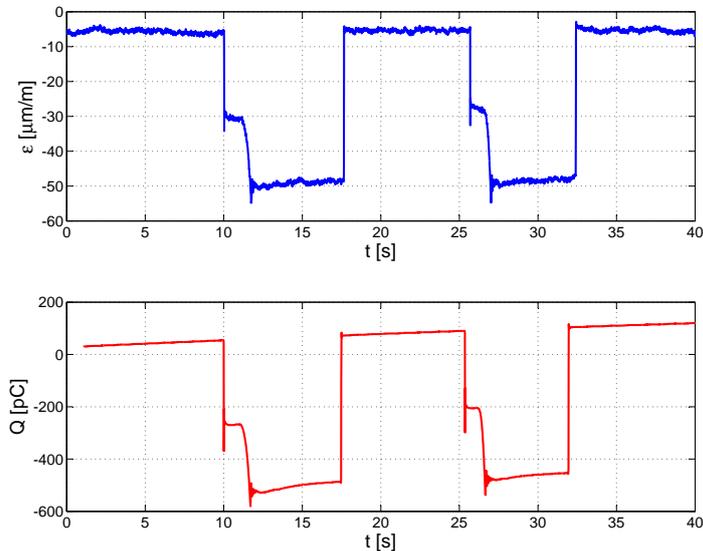


Abbildung 7.7: Druckverlauf bei Anlegen von 6 bar und schneller Entlastung. Die Drift ist relativ zum Drucksprung vermindert. Drucksprünge finden bei 17 und 32 Sekunden statt.

$\epsilon \left[\frac{\mu m}{m} \right]$	$p_{DMS} [bar]$	Q [pC]	$p_{Piezo} [bar]$
43.0	6.42	565	6.01
43.6	6.51	560	5.96

Tabelle 5: Gemessene Werte und daraus berechnete Drücke für einen Drucksprung von 6 bar.

7.4.2 Drucksprung 6 bar

Es wird gleich vorgegangen wie bei den Messungen mit 2 bar. Allerdings wurden hier nur 2 Drucksprünge vermessen, wie in Abbildung 7.7 dargestellt. Die ermittelten Drücke sind in Tabelle 5 angeführt.

7.4.3 Drucksprung 20 bar

Der höchste Druck der korrekt vermessen werden kann, bevor die Dichtung des Sensors ein Austreten von Öl nicht mehr verhindern kann und ein aussagekräftiges Messen unmöglich wird. Ein interessantes aber belangloses Detail in Abbildung 7.8 ist, dass sich beim Anlegen des Druckes eine gedämpfte Schwingung ausbildet, die sowohl bei der DMS- als auch bei der piezoelek-

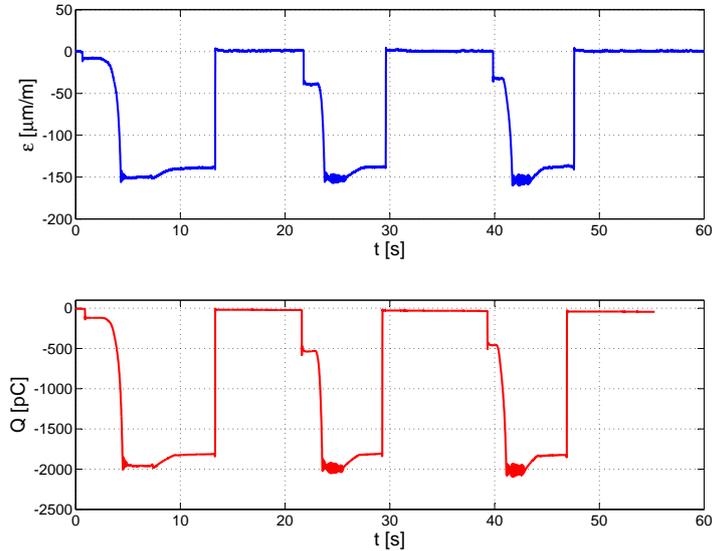


Abbildung 7.8: Druckverlauf bei Anlegen von 20 bar und schneller Entlastung. Aufgrund des hohen Drucksprunges ist die Drift fast nicht mehr zu erkennen. Drucksprünge finden bei 13, 29, und 47 Sekunden statt.

$\epsilon \left[\frac{\mu\text{m}}{\text{m}} \right]$	$p_{DMS} [\text{bar}]$	$Q [\text{pC}]$	$p_{Piezo} [\text{bar}]$
141	21.04	1792	19.06
141	21.04	1788	19.02
140	20.90	1783	18.96

Tabelle 6: Gemessene Werte und daraus berechnete Drücke für einen Drucksprung von 20 bar

trischen Messung sichtbar ist und die auf das Schwingen der Messmasse auf dem Ölbad zurückzuführen ist. Die ermittelten Drücke sind in Tabelle 6 angeführt.

Bei allen Messungen zeigt sich eine sehr gute Kohärenz zwischen den beiden Signalen. Ebenfalls stimmt die Höhe der Drucksprünge sehr gut mit dem tatsächlich angelegten Wert überein. Der von den DMS erhaltene Druck ist leicht erhöht. Mögliche Fehlerquellen dafür sind:

- Ablesen der Drucksprünge aus den Messungen
- Berechnungen aus Abschnitt 3.1, alle Materialkonstanten und Dimensionen sind fehlerbehaftet

$\epsilon [\frac{\mu m}{m}]$	$p_{DMS} [bar]$	Q [pC]	$p_{Piezo} [bar]$
6.5	0.97	93.8	1.00

Tabelle 7: Messung von 1 bar im Vakuum. Zur Berechnung der Drücke wurden wieder die Gleichungen 3.14 und 3.21 herangezogen.

- Umrechnen des Messverstärkers der Spannungsänderung in eine Längenänderung. Alle Kabel und Lötstellen in der Schaltung verfälschen die wahre Widerstandsänderung. Zudem hat der k-Faktor der DMS einen Fehler von $\pm 1.5\%$.

7.5 Messen mit Vakuum

Der Sensor wird an eine Vakuumpumpe adaptiert, in der ein Hochvakuum erzeugt wird (etwa 10^{-7} bar). Daraufhin lässt man Luft einströmen, wodurch ein Drucksprung von 1 bar gemessen werden kann. Ein Unterschied zu den Drucksprungmessungen besteht außer der Höhe des Drucks darin, dass an der Membran des Sensors gezogen und nicht gedrückt wird. In Abbildung 7.9 ist zu sehen, dass der Drucksprung von 1 bar noch sehr gut aufgelöst werden kann.

In Abbildung 7.10 ist das sehr gute lineare Verhalten des Sensors am Beispiel der abgegebenen Ladungen bei den Drucksprüngen verdeutlicht. Die Mittelwerte der jeweiligen Drucksprünge in Druckwaage und Vakuum wurden geplottet und linear gefittet.

7.6 Druckgenerator für dynamische Drücke

Mit dem Turbinentester ist es möglich an den Sensor einen statischen Basisdruck anzulegen und mithilfe eines Frequenzgenerators Druckschwankungen bestimmter Höhe zu erzeugen. Allerdings sind diese Schwankungen in Frequenz nicht konstant und der Verlauf nicht sinusförmig. Mit 2 Referenzsensoren wird zur Kontrolle der mittlere statische Druck (mit einem DMS-Sensor) und die Schwankungen (mit einem piezoelektrischen Referenzsensor) aufgezeichnet, während die piezoelektrischen Signale und die der DMS gemessen werden.

7.6.1 Frequenzverhalten der DMS

Referenzsensoren und piezoelektrisches Signal werden an das vorhandene Modul angeschlossen, das wiederum mit einem INDICOM Modul verbunden ist.

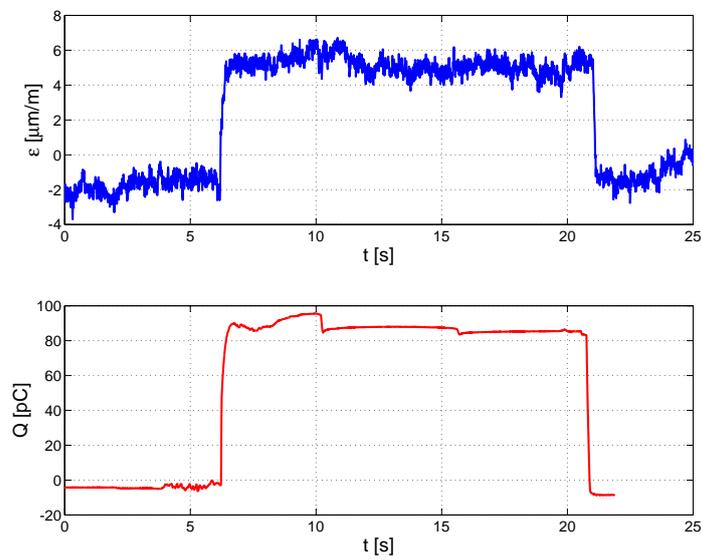


Abbildung 7.9: Druckverlauf bei Anlegen und lösen eines Vakuums. Da an der Membran gezogen wird bewegt sich der Ausschlag im Unterschied zu den Druckwaagenmessungen in positive Richtung. Der Ladungsverlauf wurde im Vorzeichen wiederum an die Längenänderung angepasst.

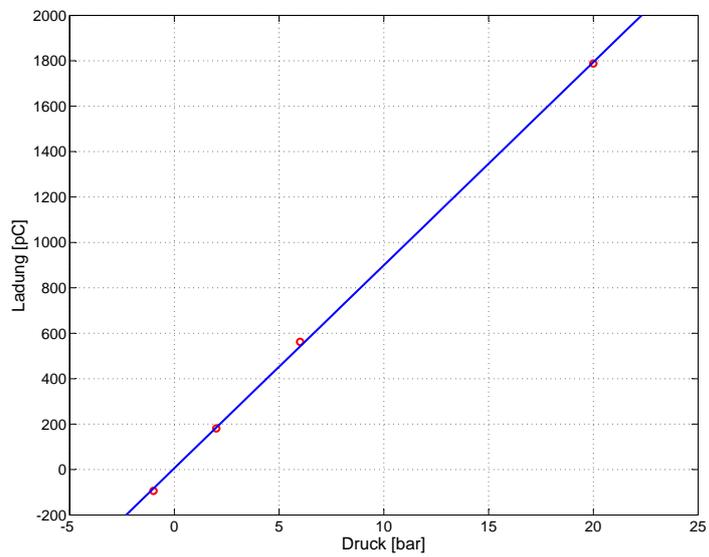


Abbildung 7.10: Die am Sensor gemessene Ladung über den tatsächlich angelegten Druck. Ein sehr gut lineares Verhalten des Sensors über den vermessenen Druckbereich ist zu erkennen.

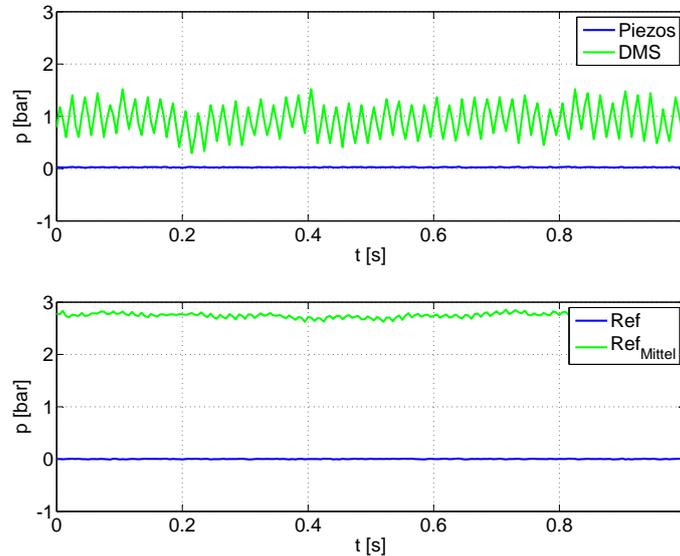


Abbildung 7.11: Druck im Druckgenerator ohne Frequenzgenerator. Oben ist Piezo- und DMS-Signal zu sehen, unten der Referenzsensor und der statische Referenzsensor.

Der Analogausgang des MX410 wird direkt mit dem INDICOM Modul verbunden (Skalierung: $1V/200\mu m$ am MX410 und $1V/1V$ am INDICOM). Für das piezoelektrische Signal sind somit Verstärkung und Filter vordefiniert und optimiert, während die Filterung, die bei diesem Versuch entscheidend ist, am MX410 mit dem QuantumX Assistenten definiert. Es wird ein 20 Hz Bessel-Tiefpassfilter verwendet. Ein solch niedriger Tiefpass ist wegen der recht schlechten Schirmung des Sensors und auch des Analogausganges nötig.

Ein statischer Druck wird angelegt. Hier zeigt sich, dass die DMS den Druck auf längere Zeitdauer anzeigen, während der Piezo-Verstärker das Signal rasch wieder auf 0 abgleicht. Die Messung eines rein statischen Drucks ist in Abbildung 7.11 gezeigt, wobei die Höhe des Drucks bei den DMS nicht der Realität entspricht, da die hohen Störeinstreuungen in Kombination mit dem Filter das Signal verfälschen. Daraufhin wird die Frequenz der Druckschwankungen sukzessive gesteigert.

Begonnen wird mit etwa 0.13 Hz, wobei bei einer so kleinen Frequenz die erzeugten Druckschwankungen noch sehr inkonstant sind. Dennoch ist in Abbildung 7.12 erkennbar, dass die Messung mit DMS den statischen Druck

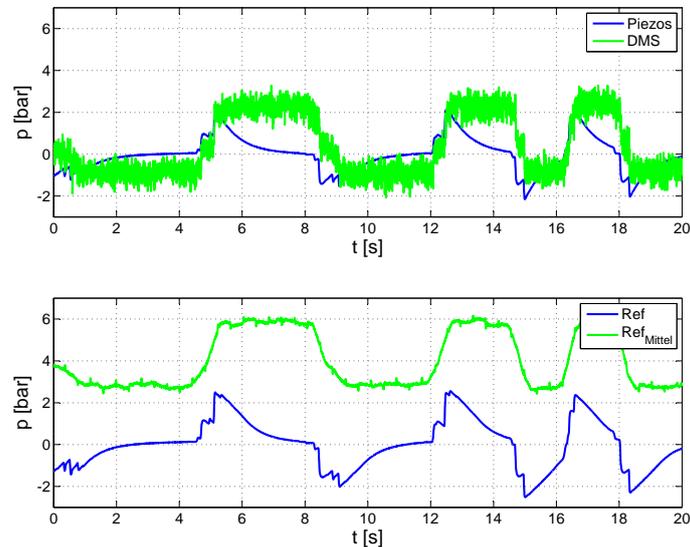


Abbildung 7.12: Sehr niedrige Druckschwankungen von etwa 0.13 Hz. Hier kann mit DMS der Druck noch besser gemessen werden als mit den piezoelektrischen Messelementen.

anzeigen kann, während der Piezo-Verstärker rasch abgleicht.

Bei einer Messung mit Druckschwankungen von 3 Hz ist ein Messen mit Messelementen und DMS sehr gut möglich, wie in Abbildung 7.13 gezeigt. Eine leichte Inkohärenz des DMS-Signals ist aber bereits zu erkennen.

Kommt man in den Frequenzbereich des Bessel-Filters (Abbildung 7.14) ist ein verlässliches Messen mit DMS nicht mehr möglich. Piezo- und Referenzsignal zeigen noch immer hohe Kohärenz während die applizierten DMS deutlich davon abweichen. Durch eine höhere Tiefpassfrequenz würde sich dieses Verhalten natürlich bessern allerdings würde das Rauschen durch den Einfluss der 50 Hz Einstreuung aus dem Stromnetz rasch zunehmen. Es gilt also zwischen Rauschen und Frequenzverhalten abzuwiegen.

Die Störeinflüsse sind in Abbildung 7.15 gut zu erkennen. Die Druckfrequenz liegt bei etwa 54 Hz. Die Schwebung mit der Netzfrequenz ist deutlich zu beobachten. Theoretisch ergibt sich die Schwebungsfrequenz aus:

$$f_s = \frac{f_1 - f_2}{2} = \frac{54 - 50}{2} = 2Hz \quad (7.1)$$

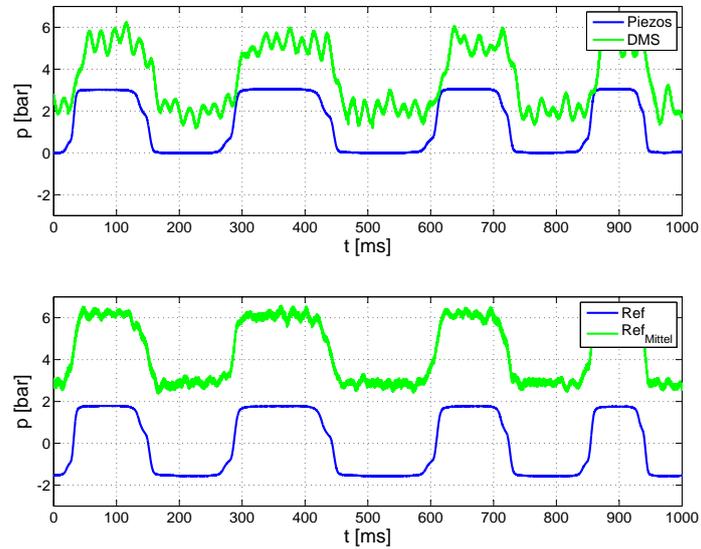


Abbildung 7.13: Generierte Frequenz von ca. 3 Hz. Die statische Messung mit den DMS funktioniert noch sehr gut.

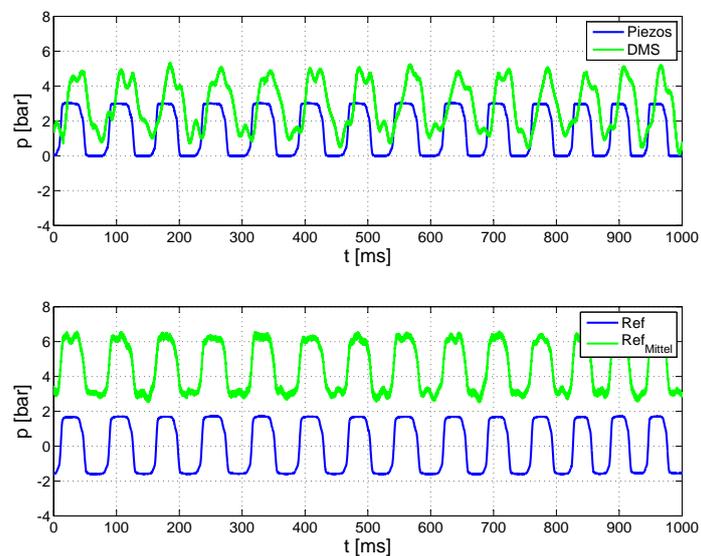


Abbildung 7.14: Bei etwa 13 Hz ist man in der Nähe der Filterfrequenz. Hier ist eine deutliche Inkohärenz des DMS-Signals zu erkennen. Der Referenz-DMS-Sensor (unten) zeigt noch sehr gutes Verhalten.

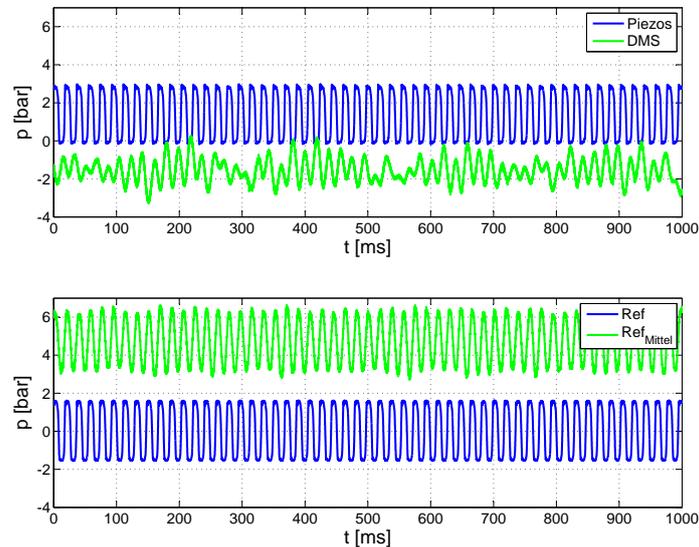


Abbildung 7.15: Deutliche Abweichung der DMS bei 54 Hz. Zusätzlich ist eine Schwebung einer Frequenz von etwa 2.2 Hz zu beobachten.

Das passt sehr gut zu der aus der Messung abgelesenen Frequenz von etwa 2.2 Hz.

7.6.2 Filteralternative

Um zu Prüfen ob sich das Signal der DMS verbessern lässt, wurde eine Messung bei 100 Hz Druckschwankungen durchgeführt. Als Filter am MX410 wurde ein Bessel-Tiefpassfilter mit 1000 Hz verwendet. Die Messung ist in Abbildung 7.16 dargestellt. Tatsächlich ist das Frequenzverhalten des DMS-Signals sehr gut kohärent mit dem piezoelektrischen. Im Gegenzug ist das Rauschen sehr stark erhöht. Somit ist gezeigt, dass DMS physikalisch gesehen bis zu sehr hohen Frequenzen messen können. Allerdings sind die Störeinflüsse im verwendeten Aufbau zu groß. Es gilt hier also abzuwiegen zwischen dem Rauschen, das man in Kauf nehmen kann und den Druckschwankungsfrequenzen, die man mit den DMS messen will.

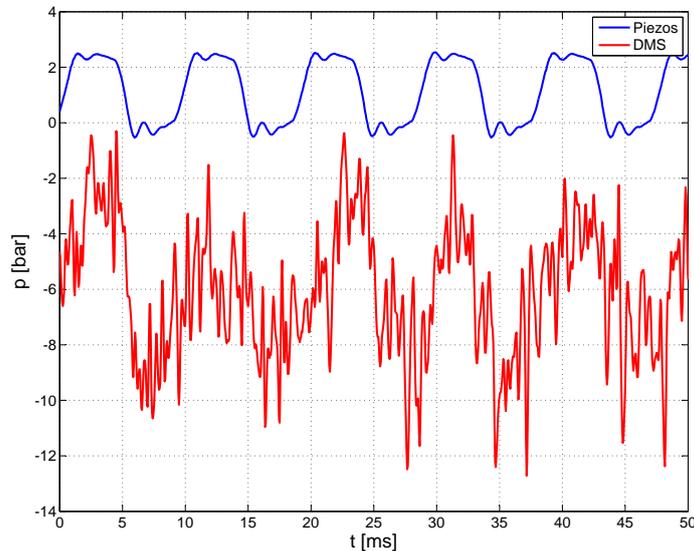


Abbildung 7.16: Messung mit 1000 Hz Bessel-Tiefpassfilter bei 100 Hz Druckschwankungen.

8 Hochtemperatur - Variante

8.1 Generelles

Einige Aussagen über eine Hochtemperatur Variante ($> 500^{\circ}\text{C}$) des piezoelektrischen DMS Sensors lassen sich bereits ohne die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln machen:

- Mit den verwendeten handelsüblichen Folien-DMS ist es nicht möglich Stabilität bei hohen Temperaturen zu gewährleisten. Der Erweichungspunkt des Z70 Schnellklebstoffs liegt bei 165°C und eine Langzeitstabilität ist nur bis 100°C gegeben.
- Eine Alternative Anbringung der DMS muss gefunden werden, zum Beispiel mit Dünnschichtmethoden. Dadurch werden sich Probleme mit den unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten und Leckströmen ergeben [17].

8.2 Erkenntnisse aus den Messungen

Erkenntnisse über das Temperaturverhalten der Dehnungsmessstreifen aus den gemachten Messungen sind:

- Die Temperaturkompensation über eine Halbbrückenschaltung ist prinzipiell möglich, wie der Test mit losen DMS zeigte. Allerdings konnte keine Kompensation der auf den $GaPO_4$ Plättchen aufgeklebten DMS erreicht werden. Das kann von Unregelmäßigkeiten beim Aufklebeprozess herrühren. Durch weitere Versuche sollte geklärt werden ob eine Anpassung oder elektronische Kompensation erreichbar ist. Sollte das nicht möglich sein müsste ein isotrop expandierendes Trägermaterial für die DMS gewählt werden.
- Das Rauschen nimmt bei den getesteten Sensoren stark mit der Temperatur zu. Dies ist aber kein Problem der DMS an sich, sondern basiert auf den starken elektromagnetischen Einstreuungen. Es konnte gezeigt werden, dass durch Verwendung eines Filter das Rauschen mit der Temperatur in einem akzeptablen Maß zunimmt.
- Der Temperaturgradient zwischen Druck- und Kompensationsseite des P5 Sensors führt ebenfalls zu einer Verschlechterung der Signalqualität. Er spielt in den Tests zwar eine untergeordnete Rolle, für eine präzise messende Hochtemperaturvariante wird es aber doch nötig sein die DMS räumlich näher zueinander zu bringen.

8.3 Spezifikationen

In Tabelle 8 angeführten Spezifikationen wurden im Lastenheftantrag angegeben. Es soll eine Einschätzung der Realisierbarkeit gegeben werden. Eine genauere Erläuterung folgt:

- Druckbereich: Es konnten beim geschlossenen Typ aufgrund von mangelnden Dichtungsmöglichkeiten des Prototyps nur maximal 20 bar Druck hydraulisch angelegt werden. Bei offenen Typ wurden im Zuge der Tests in der Kraftkalibrieranlage jedoch problemlos 200 N Kraft gemessen, was umgerechnet einem Druck von etwa 60 bar entsprechen würde.
- Auflösung dynamisch: Wenn die Isolation ausreichend ist, kann man den angestrebten Wert mit piezoelektrischem Messen leicht erreichen.

Spezifikation	Realisierbarkeit
Druckbereich 0-50 bar	ja
Auflösung dynamisch 1 mbar	ja
Frequenzbereich dyn. 1Hz - 10kHz	ja
Auflösung statisch 50 mbar	ja
Abtastrate statisch 50 ms	ja
Ansprechschwelle statisch 0.1 bar	ja
T-Einfluss auf Kennwert: 10% über den Temperaturbereich	nein
Kennlinienabweichung statisch: 10% über die Lebensdauer	unbekannt
Temperaturbereich: $-70^{\circ}C - 560^{\circ}C$	nein
Beschleunigungsempfindlichkeit: < 2 mbar/g	unbekannt
Lebensdauer: 20000 h	unbekannt

Tabelle 8: Spezifikationen und Einschätzung der Realisierbarkeit aus heutiger Sicht

- Frequenzbereich dynamisch: Messungen bis 3 kHz waren problemlos möglich. Auch darüber hinaus gibt es, wenn man vom P5 Sensor ausgeht keine Schwierigkeiten.
- Auflösung statisch: 96 mbar konnten mit dem geschlossenen Typ erreicht werden. Durch numerische Filterung und Faraday-Käfig beim offenen Typ sogar 20 mbar. Eine starke Verbesserung der Isolation und Schirmung wäre jedenfalls nötig.
- Abtastrate statisch: Dieser Wert ist eng mit dem Rauschen und somit dem Auflösungsvermögen verknüpft. Mittelt man das Rauschsignal aus Abbildung 1(a) über die ersten 50 ms ergibt sich ein Wert von 170 mbar. Eine höhere Aufzeichnungsrate als die verwendeten 600Hz wären jedenfalls nötig.
- Ansprechschwelle statisch: Aufgrund der durchgeführten Messungen kann ein Wert von 0.1 bar als problemlos erreichbar angesehen werden.
- Temperatureinfluss auf Kennwert: Eine Temperaturkompensation war nur für das Vermessen der DMS alleine gegeben, aber auch hier mussten Druckschwankungen in einer Bandbreite von 3 bar beim Erwärmen auf $70^{\circ}C$ in Kauf genommen werden. Die Situation verschlimmerte sich bei Aufkleben auf $GaPO_4$, das Signal driftete um umgerechnet fast 7 bar ab. Fast das gleiche Verhalten war beim offenen Typ zu beobachten, außer, dass die kurzfristigen Schwankungen noch zunahmen, wofür der Temperaturgradient zwischen den räumlich getrennten DMS der

Brückenschaltung und die Änderung der Vorspannung des Sensors verantwortlich sind. Zweiterer wird aber aufgrund der abrupten Sprünge des Signals weniger Bedeutung zugeordnet.

Überraschenderweise wies der geschlossene Typ eine verminderte Temperaturdrift von etwa 3 bar auf, was vermutlich durch den Einbau der Membran und die verbesserte Abschirmung (und somit weniger Störeinstreuung und homogenerer Temperatureinfluss) bedingt ist. Der Einfluss solcher Störungen könnte genauer untersucht werden, eine Hochtemperaturvariante mit den DMS auf $GaPO_4$ ist aber nur möglich, wenn der Temperaturgang der DMS an den anisotropen von $GaPO_4$ angepasst werden kann bzw. wenn eine entsprechende elektronische Kompensation eingebaut werden kann.

Ein zusätzlicher Einfluss auf die Temperaturdrift des Sensors kann von Verspannungen herrühren, die sich aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten in den zwischen den Kontaktscheiben eingespannten Messelementen bilden. Diesem Problem könnte mit einer reibungsarmen Schicht auf den Auflageflächen begegnet werden. Mit Bor dotiertes Siliziumkarbid scheint hierfür geeignet zu sein.

- Kennlinienabweichung statisch: Die Lebensdauer des Sensors konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht vermessen werden.
- Temperaturbereich: Es gibt massive Probleme im Sensorsystem und der DMS-Technik zu lösen, wie auch teilweise beschrieben wurde.
- Beschleunigungsempfindlichkeit: Wurde nicht überprüft, für den P5 Sensor bekannt.
- Lebensdauer: Wurde nicht überprüft, für den P5 Sensor bekannt. Es wäre für einen Hochtemperatur-DMS notwendig, Änderungen über die Lebensdauer (zum Beispiel den k-Faktor betreffend) zu untersuchen.

8.4 Anforderungen an einen Hochtemperatur-DMS

Aus durchgeführten Messungen ging eindeutig hervor, dass ein Hochtemperatursensor mit den verwendeten handelsüblichen DMS nicht zu verwirklichen ist. Folgende Anforderungen werden an einen DMS gestellt, der bis zu $560^\circ C$ verwendbar sein soll:

1. Es muss ergründet werden, warum die Temperaturkompensation nach Aufbringen auf $GaPO_4$ versagt hat. Mögliche Gründe sind unpräzises Ausrichten der DMS auf dem Kristall oder ungleichmäßige Haftung

des Klebers, was zu Verspannungen führen kann. Jedenfalls scheint die Verwendung eines thermisch isotropen Trägermaterials als die bessere Alternative.

2. Effektive Rauschstärke bei Raumtemperatur: Maximal $0.3 \frac{\mu m}{m}$, Filterung der Netzfrequenz vorausgesetzt. Dieser Wert ist umso niedriger, je höher k-Faktor, Nennwiderstand und Brückenfaktor.
3. Temperaturgang: Anpassung an das anisotrope Verhalten von $GaPO_4$ (falls als Trägermaterial beibehalten), dh. $\alpha_{11} \approx 12.78 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ und $\alpha_{33} \approx 3.69 \cdot 10^{-6} K^{-1}$ mit möglichst gut angepassten Koeffizienten höherer Ordnung laut Kapitel 3.2. Alternativ kann ein isotropes Trägermaterial gesucht werden, dass unter anderem jedoch etwa die gleiche longitudinale Ausdehnung erfahren muss wie der Kristall.
4. Temperaturdrift ohne Belastung: Im genannten Temperaturbereich darf das Signal um nicht mehr als $0.4 \frac{\mu m}{m}$ abdriften, bzw. darf die Rauschstärke um maximal diesen Wert zunehmen.
5. Lebensdauer: 20000h. Stabilität der Kennwerte des DMS bei Zyklen thermischer und mechanischer Belastung über die Lebensdauer.

Die oben angeführten Punkte 2-4 sind eng miteinander verknüpft und beeinflussen sich gegenseitig, wodurch die angeführten Werte nicht als streng vorgegeben zu sehen sind. Zudem sind diese Anforderungen an des gesamten Messaufbau zu stellen, nicht nur an die DMS. Prinzipiell kann gesagt werden: K-Faktor, Nennwiderstand, Brückenschaltung und ihre Speisespannung müssen so gewählt werden, dass sich das Rauschsignal der Hochtemperatur-DMS ohne Belastung im Temperaturbereich von $20 - 560^\circ C$ in einer Bandbreite von $0.7 \frac{\mu m}{m}$ bewegt.

In der Literatur fand sich Platin als ein geeigneter Kandidat zur Herstellung von Hochtemperatur-DMS. Allerdings weist das Material einen hohen Temperaturkoeffizienten des Widerstands auf und somit eine starke Temperaturabhängigkeit des k-Faktors [17]. Dieser unerwünschte Effekt ließe sich natürlich durch entsprechende Temperaturkompensation eliminieren. Ob die erwünschte Genauigkeit erreicht werden kann muss aber erst in weiteren Experimenten untersucht werden.

9 Zusammenfassung

Das System des piezoelektrischen Sensors P5 wurde analysiert. Durch einfache analytische Annäherungen wurde das Verhalten des Systems berechnet, sowohl im Hinblick auf das Anlegen einer äußeren Kraft als auch auf die thermische Expansion des Sensors. Es ergaben sich für das Anlegen von 1 bar Druck eine abgegebene Ladung von 94 pC und eine relative Widerstandsänderung eines DMS (mit k-Faktor 2) von $1.34 \cdot 10^{-5}$. Bei Erwärmen auf 800°C ergab sich eine Abnahme der Vorspannung des Sensors um 65 N. Die berechneten Werte konnten größtenteils sehr gut mit den experimentellen in Einklang gebracht werden.

Eine Schaltung zur optimalen Messung mit Dehnungsmessstreifen wurde geplant. Einerseits wurde eine Vollbrücke für den Bau eines offenen Typs gewählt, andererseits, hauptsächlich aus Platzgründen, eine Halbbrücke für die Konzipierung eines geschlossenen Typs. Die Dehnungsmessstreifen wurden vor Einbau in den Sensor durch Erwärmen auf 70°C getestet. Nach Aufkleben der DMS auf Galliumorthophosphat traten Schwierigkeiten in Form einer Temperaturdrift von 6 bar auf, was auf das anisotrope Verhalten des Kristalls zurückzuführen ist.

Der offene Typ war eine sehr einfache Ausführung und diente hauptsächlich zur Erprobung experimenteller Techniken und um eine Vergleichsmöglichkeit für den geschlossenen Typ zu erhalten. Bereits hier zeigte sich, dass die elektromagnetischen Störeinstreuungen ein Hauptproblem des Sensors sind. Zudem war es mit dem verwendeten Material nicht möglich das Verhalten bei Temperaturerhöhung in den Griff zu kriegen. Dennoch kann bei ausreichender Schirmung der Leitungen zum Vermeiden eines Signaldrifts und der nahezu vollständigen Elimination der Störeinflüsse aus dem Stromnetz (gegebenenfalls mit numerischem Filter) bei Raumtemperatur ein Auflösungsvermögen der Dehnungsmessstreifen von bis zu 20 mbar erreicht werden.

Der geschlossene Typ wurde hauptsächlich auf Frequenzverhalten und Kohärenz von piezoelektrischem und DMS-Signal getestet. Drucksprünge von 1 bar bis 20 bar konnten problemlos von beiden Systemen gemessen werden. Das Frequenzverhalten kann man in 3 Bereiche unterteilen: Bis zu 1 Hz konnte nur mit DMS gemessen werden, von 1-5 Hz konnten beide Systeme gute Ergebnisse liefern, während über 5 Hz nur mehr die piezoelektrischen Messelemente das Frequenzverhalten verfolgen konnten. Das Versagen der DMS ist aber auf die schlechte Isolation des Sensors zurückzuführen. Physikalisch ist ein Messen mit DMS zu weit höheren Frequenzen hin möglich. In Bezug auf Temperaturdrift zeigte sich eine Verbesserung gegenüber dem offenen Typ bei Erwärmen auf 70°C .

Eine Einschätzung für den Bau einer Hochtemperaturvariante wurde gege-

ben. Hier scheint das angestrebte Auflösungsvermögen erreichbar. Allerdings ist das Verhalten der DMS bei Temperaturerhöhung ein Problem, das mit den hier verwendeten DMS nicht lösbar ist. Spezielle DMS müssten entwickelt werden, deren Temperaturgang an $GaPO_4$ angepasst ist, oder die auf ein anderes Trägermaterial aufgebracht werden, dass allerdings erst in den Sensor integriert werden müsste. Jedenfalls gibt es Möglichkeiten die gemessenen Temperaturdrifts zu kontrollieren, womit aber noch immer die Druckbandbreite von 3 bar aus Abbildung 4.5 bleibt. Diese Schwankungen treten trotz unmittelbarer räumlicher Nähe von 2 unapplizierten DMS auf. Die beschriebenen Probleme stammen hauptsächlich von Messaufbau und Messelektronik. Erst wenn hier wesentliche Verbesserungen gemacht wurden, kann ein Hochtemperatur-DMS sinnvoll auf seine Anwendbarkeit untersucht werden.

A Konstruktionszeichnungen

Hier Bauteile angeführt, die für den Aufbau des geschlossenen Typs konzipiert oder umkonstruiert wurden. Auch Vorrichtungen, die eigens für den Aufbau des Sensors entworfen wurden sind hier zu finden. Die Originalpläne sind nur für firmeninterne Verwendung bestimmt und sollen hier nicht inkludiert werden.

- Isoliering: Es handelt sich um ein Zukaufsteil. Eine dritte Bohrung mit dem Durchmesser von 1mm wurde um 120° zu den beiden anderen versetzt angebracht. Diese dient in Verbindung mit den anderen Bauteilen dazu, die Leitungen von den DMS aus dem Sensor führen zu können. Das Teil ist bereits geläpft und Einbaubereit.
- Rohrfeder: Das sehr aufwendige Bauteil wurde lediglich um eine dritte Bohrung wie beim Isoliering erweitert.
- Seismische Masse: Gleiche Bohrung wie Isoliering. An der unebenen Oberseite sollte eine Fase der zusätzlichen Bohrung genau definiert sein.
- Ausgleichsring: Bohrung wie Isoliering. Es sind 2 Zeichnungen vorhanden, von denen die erste das Drehen beschreibt, die zweite dient für den Beschichtungs- und Lappprozess.
- Ladungsableitungsstecker: Da aufgrund der zusätzlichen Leitungen nicht das Standardkabel verwendet werden kann, müssen die Ladungsableitungshülsen am Sensorausgang alternativ kontaktiert werden. Dazu dienen diese Stecker, die am anderen Ende mit einem Kabel verlötet werden können.
- Halterung: Diese können für die Applikation der Dehnungsmessstreifen auf den Messelementen verwendet werden. Die Messelemente werden in die Vertiefung gelegt. Die Schlitze bringen eine geringe Verformbarkeit um das Messelement mit einem Schraubstock in der Vorrichtung fixieren zu können. Der Originalplan wurde etwas verändert, da die Vertiefung ursprünglich zu schmal für die Messelemente und die Gesamtbreite unpraktisch war. Die Schlitze können eventuell noch breiter gemacht werden um die Stauchbarkeit der Vorrichtung zu verbessern.

Literatur

- [1] P. Profos, Handbuch der Industriellen Messtechnik, Vulkan-Verlag Essen, 1978
- [2] Ch. Kittel, Einführung in die Festkörperphysik, 14. Auflage, Oldenbourg Wissenschaftsverlag, 2006
- [3] P.W. Krempl, Quartz Homeotypic Gallium-Orthophosphate, Proc. 1994 IEEE ULTRASONICS SYMPOSIUM, Cannes, pp. 949-954
- [4] P.W. Krempl, F. Krispel, W.Wallnöfer, Industrial Development and Prospects of $GaPO_4$, Ann. Chim. Sci. Mat., 1997, pp. 623-626
- [5] Piezocryst Advanced Sensorics GmbH - $GaPO_4$ Material Constants, Update 11/2005
- [6] www.piezocryst.com, Stand 02.03.2012
- [7] K. Kosten, H. Arnold, Die III-V-Analoga des SiO_2 , Z. Kristallogr. 152, 119-133, 1980
- [8] K. Jacobs et al., Structural Phase Transformation in Crystalline Gallium Orthophosphate, Journal of Solid State Chemistry, 149, 180-188, 2000
- [9] S. Hirano, P. Kim, Hydrothermal Synthesis of Gallium Orthophosphate Crystals, Bull. Chem. Soc. Jpn, 62, 275-278, 1989
- [10] Gustav Gautschi, Piezoelectric Sensorics, Springer Verlag 2002
- [11] Special Metals Wiggin Limited, <http://www.specialmetalswiggins.co.uk>, Stand 20.11.2011
- [12] Kurt Fink, Grundlagen und Anwendungen des Dehnungsmessstreifens, Verlag Stahleisen mbH/Düsseldorf, 1952
- [13] Accuratus Ceramic Corporation, Aluminium Oxide, <http://accuratus.com/alumox.html>, 2002
- [14] www.matbase.com, Stand 05.11.2011
- [15] Anwendung der Wheatstone'schen Brückenschaltung, Karl Hoffmann, HBM
- [16] Stefan Keil, Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen, CU-NEUS Verlag Zwingenberg, 1995

- [17] Sören Fricke, Funktionale Dünnschichten und deren Anwendungen in Hochtemperatur-Drucksensoren, Shaker Verlag Aachen, 2010
- [18] HBM GmbH, Dehnungsmessstreifen und Zubehör
- [19] HBM GmbH, Bedienungsanleitung QuantumX
- [20] J. Haines et al., Phys. Review B, 73, 014103 (2006)
- [21] International Crystal Database
- [22] E. Philippot et. al., A quartz-like material: gallium phosphate ($GaPO_4$); crystal growth and characterization, J. Crystal Growth 130 (1993) 195-208
- [23] R. Selic, Arbeitsplan Rohrfederbaugruppe CP505, 2011