

Sensorintegration in Sandwichverbundstrukturen für Luftfahrtinnenkomponenten

Masterarbeit

verfasst von

Andreas Lang

erstellt am 11. 06. 2018

Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen

Department Kunststofftechnik

Montanuniversität Leoben



**VERARBEITUNG VON
VERBUNDWERKSTOFFEN**

Betreuung: Silvia Lloret-Pertegás Lic.

Begutachtung: Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski

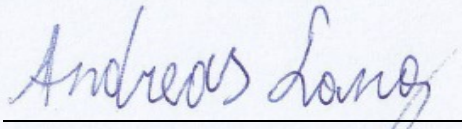
Leoben, Juni 2018

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

27.07.2018

Datum



Unterschrift

Danksagung

Ich möchte an dieser Stelle Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. Ralf Schledjewski für die Ermöglichung dieser Masterarbeit am Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen und für die Vermittlung dieses Themengebiets meinen Dank aussprechen. Gleichfalls bedanke ich mich auch bei Frau Silvia Lloret-Pertegás Lic. für die Betreuung der praktischen Arbeiten und der Handhabung bei der Beschaffung der bei den Experimenten verwendeten Materialien. Desweiterem bedanke ich mich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Ewald Fauster für seine Hilfe bei der Herstellung einer funktionierenden Signalverarbeitung mit den Piezowiderstandssensoren. Ich möchte mich bei Dr. Ralf Höper, CEO der Firma Proton Mikrotechnik GmbH für die technische Unterstützung bei der Handhabung von seine Firma hergestellten kapazitiven Sensoren bedanken. Außerdem bedanke ich mich bei Ass. Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Markus Ellersdorfer für seine Unterstützung bei der Arbeit mit dem Autoklaven. Desweiterem möchte ich mich bei der Firma FACC AG bedanken, ohne deren Arbeit die das Thema dieser Arbeit gar nicht erst relevant geworden wäre. Schließlich möchte ich mich für die finanzielle Unterstützung dieser Arbeit beim Lehrstuhl für Verarbeitung von Verbundwerkstoffen bedanken.

Kurzfassung

Sandwichverbundstrukturen werden in vielen Bereichen eingesetzt wie zum Beispiel in der Luftfahrt. Sie haben den Vorteil, dass sie hervorragende physikalische Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit mit sehr geringem Gewicht kombinieren. Im Fall von Sandwichverbundstrukturen mit Wabenkernen kann es nach der Verarbeitung zur Blasenbildung im Harz zwischen Kern und Deckschicht kommen. Diese Blasen schwächen lokal die Verbindung zwischen Kern und Deckschicht und somit die Gesamtintegrität des Verbundes, was zu einem Lösen der Deckschicht vom Kern führen kann. Als Ursache dieser Blasenbildung wird ein lokaler Überdruck innerhalb der Zellen an den betroffenen Stellen angenommen. Es ist daher für Ingenieure von Interesse, diesen Zelleninnendruck zu messen, um zum einen diese Annahme zu bestätigen und zum anderen Maßnahmen entwickeln zu können, welche die Blasenbildung einschränken können.

Im Zuge dieser Arbeit wurde recherchiert, wie man eine solche Druckmessung im Inneren einer Sandwichverbundstruktur zu Stande bringen kann und welche Sensoren am Markt verfügbar sind, um solch eine Messung durchzuführen. Desweiterem wurden mit geeigneten Sensoren solche Druckmessungen durchgeführt.

Abstract

Sandwich composite structures are used in many fields of engineering especially aerospace engineering. They have the advantage over traditional materials of exceptional properties in regards to stiffness combined with very low specific weight. In the case of sandwich composites with honeycomb cores the occurrence of air bubbles in the resin that binds the core and the fibre sheets together has been observed after the curing. These bubbles weaken the connection between core and fibre layers locally and the overall integrity of the composite. It is assumed the source of these bubbles is an overpressure of the air inside the cells of the core which occurs during curing. As such engineers are interested in measuring this internal air pressure during curing in order to verify this assumption and to develop measures to counteract the creation of air bubbles.

During the course of this work it was researched how to facilitate such measuring and which sensors are capable of doing so. Furthermore experiments with suitable sensors in measuring the internal pressure of sandwich composite structures with a honeycomb core were done.

Inhalt

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik	3
2.1	Druckmessung im Zelleninnenraum von Sandwichfaserverbunden mit Honigwabenkern.....	4
2.2	Faseroptische Messmethoden.....	6
2.2.1	Faser-Bragg-Gitter (FBG).....	6
2.2.2	Fabry-Pérot-Interferometer.....	25
2.3	Elektrische Messmethoden:.....	30
2.3.1	Piezowiderstandsdrucksensoren.....	30
2.3.2	Kapazitive Drucksensoren.....	38
3	Verwendete Geräte, Materialien und Methoden	40
3.1	Testaufbauten.....	40
3.1.1	Prepreg.....	40
3.1.2	Wabenkern.....	40
3.1.3	Kapazitive Sensoren.....	40
3.1.4	Piezowiderstandssensoren.....	40
3.1.5	Verkabelung.....	41
3.2	Presse.....	41
3.3	Autoklav.....	42
3.4	Signalauswertung.....	42
3.4.1	Kapazitive Sensoren.....	42
3.4.2	Piezowiderstandsdrucksensoren.....	42
3.5	Wärmeschrank.....	43

4	Experimentelles	44
4.1	Kapazitive Sensoren	44
4.2	Piezowiderstandssensoren	48
4.3	Kalibrierung.....	51
5	Ergebnisse und Diskussion	54
5.1	Kalibrierung der kapazitiven Sensoren.....	54
5.2	Ergebnisse der Experimente mit kapazitiven Sensoren	63
5.2.1	Offsetmessungen	63
5.2.2	Messkurven Sensor 1.....	64
5.2.3	Messkurven Sensor 2.....	66
5.2.4	Messkurven Sensor 3.....	68
5.2.5	Messkurve Sensor 4.....	69
5.2.6	Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 1 bis 4 und Umrechnung auf Druckwerte.....	70
5.2.7	Messkurve Sensor 10.....	74
5.2.8	Messkurve Sensor 11.....	75
5.2.9	Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 10 und 11 und Umrechnung auf Druckwerte.....	76
5.2.10	Messkurve Sensor 12	78
5.2.11	Messkurve Sensor 13	80
5.2.12	Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 10 und 11 und Umrechnung auf Druckwerte.....	81
5.3	Piezowiderstandssensoren	85
6	Zusammenfassung	86
7	Abbildungsverzeichnis	90

8	Tabellenverzeichnis	94
9	Literaturverzeichnis	95

1 Einleitung

Sandwichverbundstrukturen werden in vielen Bereichen eingesetzt wie zum Beispiel in der Luftfahrt. Sie haben den Vorteil, dass sie hervorragende physikalische Eigenschaften in Bezug auf Steifigkeit mit sehr geringem Gewicht kombinieren. Im konkreten Anwendungsfall werden Sandwichfaserverbundstrukturen vor allem in der Innenausstattung von Flugzeugen verwendet. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass es während der Verarbeitung dieser Materialien bisweilen zur Bildung von Luftblasen innerhalb des Harzes an der Klebefläche mit den Kernmaterialien kommt, was dann zu lokalem Lösen von der Deckschichten vom Kern führen kann und schlussendlich zur generellen Schwächung der strukturellen Integrität des Verbundes führt. Im Fall von Wabenkernen wird angenommen, dass die Bildung dieser Blasen durch während der Verarbeitung auftretende Gaseinschlüsse und dem daraus resultierenden Überdruck innerhalb der Wabenzellen hervorgerufen wird.

Die Ursache für diese Gaseinschlüsse und den resultierenden Überdrücken kann mehrere verschiedene Gestalten annehmen. Zu aller erst muss gesagt werden, dass die Zellen von Haus aus schon mit Luft gefüllt sein können, da bei Pressverfahren die Bauteile üblicherweise nicht vor dem Pressen evakuiert werden. Diese Luft innerhalb der Zellen dehnt sich beim Erwärmen in der Presse aus, was zu einer Erhöhung des Zelleninnendruckes führt. Ein weiterer Grund für die Entstehung eines Überdruckes kann das Verdampfen von eventuell vorhandenen Spuren von Feuchtigkeit in Form von Wasser während des Pressvorganges sein. Die dritte Annahme die auf Bezug der Ursache des Überdruckes innerhalb der Zellen des Wabenkernes getroffen wird, ist die Bildung von gasförmigen Reaktionsprodukten während des Aushärtens des Harzes, beziehungsweise das Entweichen von während der Verarbeitung verdampften Rückständen aus dem Harz in die Zellen des Verbundes. Es ist deshalb von Interesse herauszufinden wie groß der Druck in den Zellen während der Verarbeitung wird, und wie sich der Druck über die Gesamtheit des Verbundes verteilt.

Um diesen Zelleninnendruck während der Verarbeitung zu messen gibt es eine Reihe von Sensorsystemen und Messmethoden, die in Betracht gezogen werden können. Zum einen gibt es faseroptische Messmethoden, wo durch Druckeinwirkung auf die Glasfaser direkt oder indirekt eine Änderung im Lichtsignal hervorgerufen wird. Zum anderen gibt es elektrische Messmethoden, wo die Einwirkung von Druck auf den Sensor eine Änderung in einer elektrischen Größe bewirkt. Diese Größen sind beispielsweise die Kapazität eines Kondensators oder der elektrische Widerstand des Sensors.

Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, welche Sensorsysteme auf dem Markt erhältlich sind um die Messung des Zelleninnendrucks von Sandwichverbundstrukturen mit Honigwabenkern zu bewerkstelligen und dann mit einem geeigneten Sensorsystem eine Methode zu erarbeiten um diese Messungen durchzuführen um einen Überblick zu bekommen, wie groß der Druck im Inneren der Zellen tatsächlich ist.

2 Stand der Technik

Bei der Recherche zur Integration von Drucksensoren in einen Sandwichfaserverbund mit Honigwabenkern und zur Druckmessung im inneren selbiger wurden sowohl elektrische als auch faseroptische Messsysteme untersucht. Dabei wurden sowohl verschiedene Umsetzungen der einzelnen Messprinzipien als auch auf dem Markt verfügbare Systeme in Betracht gezogen. Die Systeme wurden vor allem auf folgende Kriterien untersucht:

- Temperaturbeständigkeit und Funktionsfähigkeit bei 160°C
- Die Waben sind gleichseitige Sechsecke mit Seitenlänge von 2 mm und einer Höhe von 5 mm.
- Für die Erhöhung des Innendrucks aufgrund der Temperaturzunahme der eingeschlossenen Luft kann folgende Annahme getroffen werden. Die Luft verhält sich wie ein ideales Gas, wodurch sich die Druckzunahme mit folgender Gleichung berechnen lässt.

$$p = \frac{nRT}{V} \quad 2.1$$

Mit dieser Gleichung ergibt sich, dass sich der Zelleninnendruck bei einer Erwärmung von Raumtemperatur (20 bis 23 °C) auf 160°C von ca. 1 bar auf 1,46 bis 1,48 bar erhöhen muss. Wie sich die anderen genannten Einflussfaktoren auf die Druckzunahme auswirken kann von vorneherein nicht gesagt werden, wodurch der benötigte Messbereich nicht genau bekannt ist.

Das erste Kriterium schließt einen Großteil aller möglichen auf dem Markt erhältlichen Sensoren von vorneherein aus. Das zweite Kriterium beschränkt die maximale Größe der Sensoren erheblich. Das dritte Kriterium gewichtet die Auswahl in Richtung von Sensoren mit möglichst großem Messbereich. Weitere

Schwierigkeiten ergeben sich beim Finden geeigneter Methoden zur Signalverarbeitung und beim Herstellen einer geeigneten Verbindung zwischen Sensor und Signalverarbeitung.

2.1 Druckmessung im Zelleninnenraum von Sandwichfaserverbunden mit Honigwabenkern

Messungen des Innendrucks von Sandwichfaserverbunden mit Honigwabenkern wurden bereits im Zuge von Permeabilitätstests und der Verarbeitung von derartigen Verbunden außerhalb des Autoklaven im Vakuumbeutelverfahren durchgeführt.^{[1],[2]} Bei diesem Verfahren wirkt sich der Zelleninnendruck wesentlich stärker auf die strukturelle Integrität des Verbundes aus, da wesentlich weniger Druck als bei Verfahren mit Autoklav oder Presse von außen auf den Verbund einwirkt und so die Deckschichten und den Kern bis zum Aushärten des Polymerharzes zusammenpresst. Die in den Zellen eingeschlossene Luft und der dadurch entstehende Innendruck wirken sich stark auf die Qualität der Klebung aus. Aus diesem Grund besteht das Interesse, diesen Innendruck während und nach der Verarbeitung zu messen und dadurch Zusammenhänge zwischen Zelleninnendruck und Qualität der Klebung herzustellen. Hierbei wurde sich des in Abbildung 2.1 beschriebenen Versuchsaufbaus bedient:

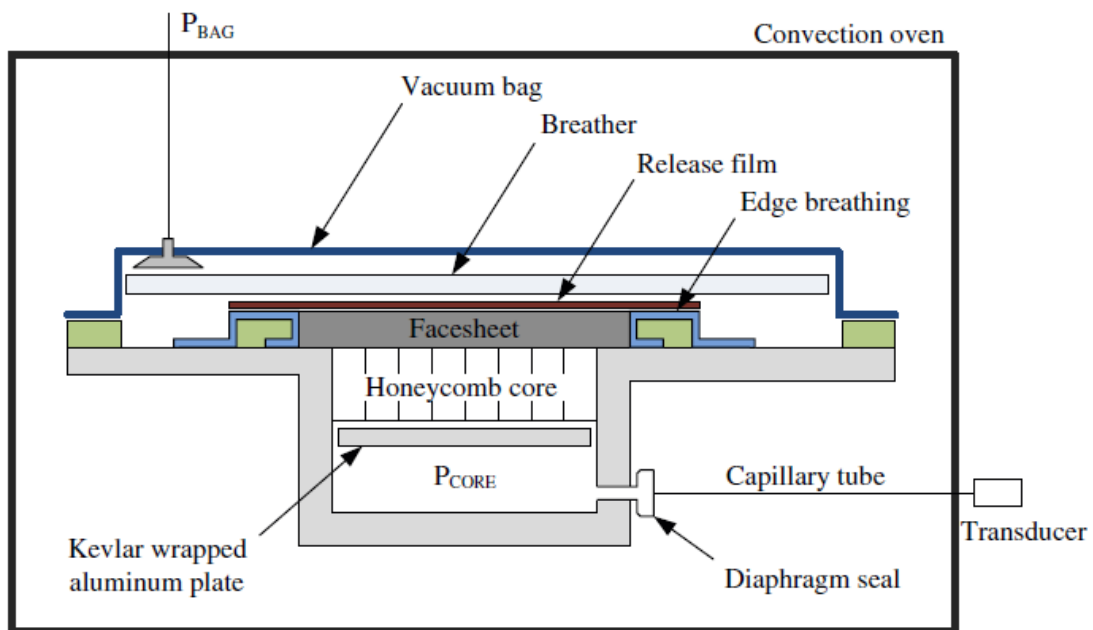


Abbildung 2.1: Messung des Zelleninnendruckes eines Honigwabensandwichfaserverbundes [1]

Wie in der Abbildung gut zu sehen ist, bedient man sich bei dieser Methode eines Verfahrens, das den Durchschnittsdruck innerhalb des gesamten Verbundes misst. Desweiterem wird dabei nur eine Seite des Kerns mit einer Deckschicht verklebt. Die andere Seite ist zur Messkammer hin mit einer mit Kevlar umwickelten Aluminiumplatte verschlossen. Diese Platte ist beweglich. Jede Änderung des Zelleninnendruckes bewirkt eine Verschiebung der Platte, was zu einer Druckveränderung in der Messkammer führt. Diese Druckänderung wird von einem Sensor gemessen.

Während dieses Verfahren Erkenntnisse über Druckverlauf während Verarbeitung und Deckschichtpermeabilität liefert, so ist es an konkreten Bauteilen nicht anwendbar. Die Messvorrichtung ist recht groß und somit umständlich zu handhaben, mal von der Tatsache abgesehen, dass die meisten Bauteile üblicherweise eine obere und untere Deckschicht benötigen, und man diese Vorrichtung somit an deren fertigen Zustand nicht anwenden kann. Desweiterem kann mit so einer Messvorrichtung nicht auf die genaue

Druckverteilung eingegangen werden, da die Zellen der Messproben einseitig offen sind und alle Zellen unter stetigem Druckausgleich stehen.

2.2 Faseroptische Messmethoden

Faseroptische Messmethoden haben im Vergleich zu elektrischen Messmethoden den Vorteil, dass sie gegen elektromagnetische Störungen unempfindlich sind. Im Bereich der faseroptischen Messmethoden wurde im Zuge der Recherche Faser-Bragg-Gitter (FBG) und Michelson Interferometer untersucht. FBG haben den Vorteil, dass sie pro Glasfaserkabel mehrere Messpunkte besitzen und somit mehrere Messkurven pro Versuchsexemplar liefern. Michelson Interferometer liefern im Gegensatz zu FBG nur einen Messpunkt pro Kabel.

Bei der Suche wurde zunächst nach FBG in Verwendung in Drucksensoren gesucht. Dabei wurden diverse Publikationen gefunden, in denen FBG in Drucksensoren eingebaut wurden. Es wurde dabei schnell klar, dass FBG generell mechanische Konstruktionen benötigen, welche Druckeinwirkung auf die entsprechende Konstruktion in axiale Dehnung der Faser umwandeln. FBG selbst sind an sich nicht auf Druck empfindlich. Ihr hauptsächliches Einsatzgebiet liegt in der Detektion von mechanischer Dehnung.

2.2.1 Faser-Bragg-Gitter (FBG)

Ein Bragg-Gitter ist eine Struktur innerhalb des Kerns einer optischen Faser, welche durch periodische Veränderung des Refraktionsindex gekennzeichnet wird. Durch diese Struktur innerhalb des Kerns der optischen Faser werden bestimmte Teile des Lichts, welches sich durch die Faser bewegt, reflektiert, während sich der Rest des Spektrums ungehindert durch bewegt. Die Wellenlänge des Lichts, welche durch das Gitter reflektiert wird, wird Bragg Wellenlänge (λ_B) genannt und durch folgende Formel beschrieben:

$$\lambda_B = 2 * n_{eff} * \Lambda \quad 2.2$$

Hierbei ist n_{eff} der effektive Refraktionsindex und Λ die Gitterkonstante. [3]

Sensoren, die auf Faser Bragg Gitter basieren funktionieren üblicherweise, indem eine mechanische Beanspruchung auf die Sensoren einwirkt. Diese Sensoren sind mechanisch mit der optischen Faser verbunden, was die Beanspruchung auch auf die Faser und somit auf das Bragg Gitter überträgt. Dadurch kommt es im Gitter zu einer Veränderung der Bragg Wellenlänge. Diese Veränderung kann über Detektoren an den Enden der Faser als eine Verschiebung des Peaks gemessen und aufgezeichnet werden.

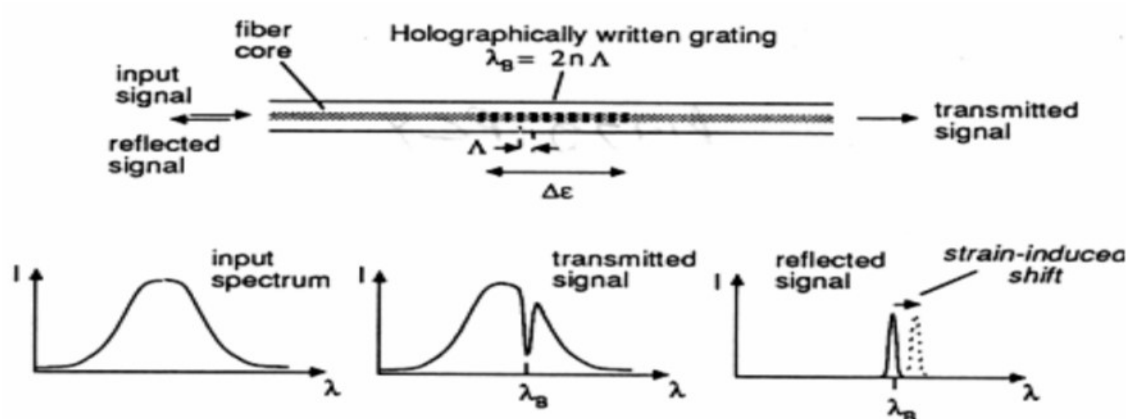


Abb. 2.2: FBG, Funktionsweise [3]

FBG sind inhärent empfindlich gegen Temperaturänderungen und Dehnung. Abhängig von der Verarbeitung der FBG in den Sensorvorrichtungen können diese Empfindlichkeiten verstärkt oder abgeschwächt werden und somit eine Anzahl an verschiedenen Sensoren hergestellt werden. Um die Temperaturempfindlichkeit zu erhöhen kann man als einfachste Methode das FBG auf eine Basis aus Material mit hohem Temperatureausdehnungskoeffizienten

kleben. Dadurch kommt zur Eigenausdehnung des FBG durch Temperatur auch die mechanische Dehnung durch die Basis, zu betrachten in Abbildung 2.3. [4]

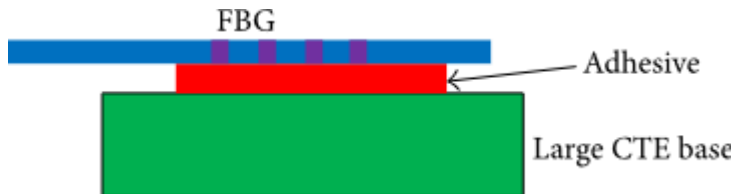


Abb. 2.3: FBG verbunden mit Basis aus Material mit hohem Temperaturausdehnungskoeffizient (Coefficient of thermal expansion CTE) [4]

Hier sei allerdings zu bemerken, dass die erreichbare Erhöhung der Empfindlichkeit durch den Temperaturausdehnungskoeffizienten der Basis beschränkt ist. Um diese Einschränkung zu überwinden wurde die Bimetallmethode (siehe Abbildung 2.4) erfunden. Angenommen die Länge eines Stabes mit niedrigem Temperaturausdehnungskoeffizienten (CTE) ist L und die Distanz zwischen den beiden fixierten Enden des FBG ist d . Wenn sich die Temperatur verändert, so wird die Längenänderung der Basis mit hohem CTE auf das FBG transferiert. Um die Dehnung des FBG zu ermitteln wird die kleine Längenänderung des Stabes mit niedrigem CTE hierbei vernachlässigt. Das FBG dehnt sich somit im Vergleich zur Basis in einem Verhältnis von $(1+L/d)$. Die Dehnungsänderung des FBG ist somit nicht mehr alleine vom CTE der Basis abhängig. [4]

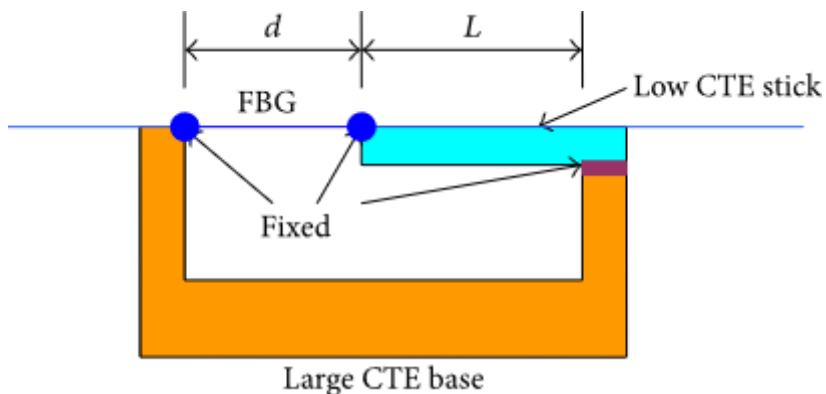


Abb. 2.4: Bimetallmethode zur Erhöhung der Temperaturempfindlichkeit eines FBG [4]

Die Bimetallmethode kann so abgeändert werden, dass man FBG-Sensoren mit veränderlicher Messreichweite erhält indem man die Verbindung zwischen Basis und Stab mit niedrigem CTE nicht fest sondern z.B. über eine Stellschraube herstellt. Dies ist in Abbildung 2.5 zu sehen. [4]

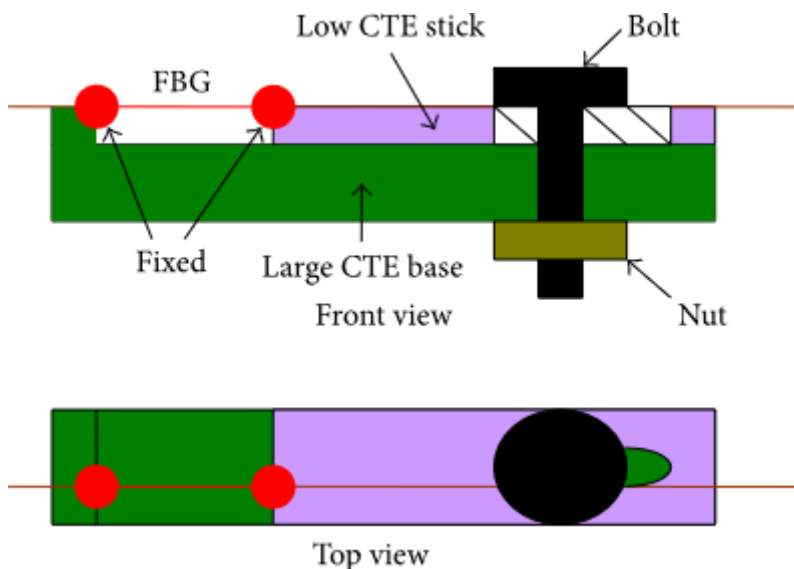


Abb. 2.5: Bimetallmethode mit veränderlicher Messreichweite [4]

Desweiterem ist es ebenfalls möglich, Sensoren herzustellen, deren Temperaturkoeffizient negativ ist. Das bedeutet, dass das FBG bei steigenden

Temperaturen entspannt und bei tiefen Temperaturen gedehnt wird. Dies erreicht man, indem man die Basis aus einem Material mit niedrigem CTE fertigt und den Stab aus Material mit hohem CTE (siehe Abbildung 2.6). [4]

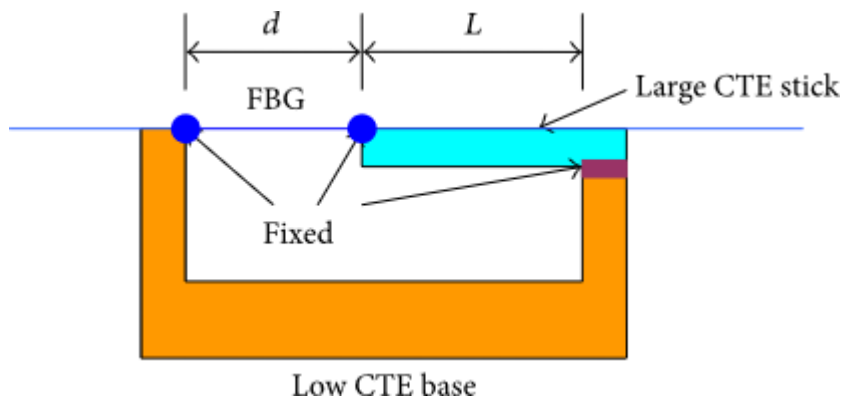


Abb. 2.6: Bimetallmethode für tiefe Temperaturen [4]

Durch geeignete Wahl der Materialien in der Bimetallmethode ist es außerdem möglich die inhärente Temperaturempfindlichkeit des FBG zu kompensieren und so temperaturunabhängige Sensoren herzustellen.

Faser Bragg Gitter eignen sich auch um Dehnungen und Verschiebungen zu messen. Da allerdings sowohl Dehnung als auch Temperatur in vielen Anwendungen als quasistatisch angesehen werden können müssen Methoden entwickelt werden um die Längenänderung des FBG zufolge der Temperatur und die zufolge von mechanischer Beanspruchung zu unterscheiden. Die Grundsatzüberlegung um dies zu bewerkstelligen ist in Abbildung 2.7 zu sehen. Bei dieser Methode werden zwei FBG verwendet. Eines ist fest mit dem zu messenden Objekt verbunden, das andere ist frei. Sollte nun rein mechanische Dehnung vorliegen, so spricht nur das FBG an, welches mit dem Objekt verbunden ist. Bei thermischer Beanspruchung sprechen beide an. Mit Hilfe der Reaktion des freiliegenden FBG kann so die Temperaturreaktion des festen FBG eliminiert werden. Man erhält somit die rein mechanische Dehnung des festen FBG. [4]

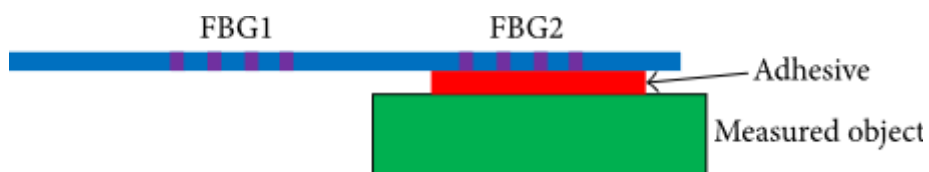


Abb. 2.7: Gleichzeitige Messung von Temperatur und Dehnung ^[4]

Temperatur kann auch kompensiert werden, indem man einen Stab mit einem FBG unter Zugspannung verbindet und beide dann mit dem zu messenden Objekt verbunden werden (Abbildung 2.8). Hierbei wird die temperaturinduzierte Längenänderung des Stabes ausgenutzt um die reflektierte Wellenlänge des FBG unter thermischer Belastung konstant zu halten. Dadurch repräsentieren Änderungen in der Wellenlänge nur mechanische Dehnungen des Objekts. Wenn sich die Länge des Objekts aufgrund von mechanischer Beanspruchung ändert, so bleibt die Länge des Stabes unverändert. [4]

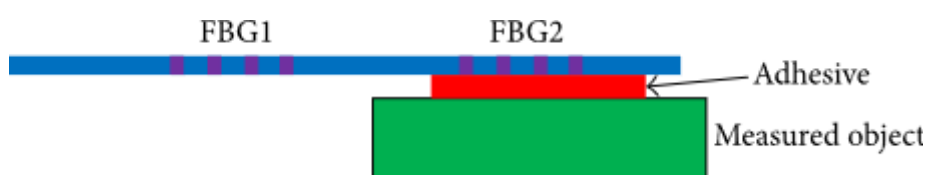


Abb. 2.8: Dehnungsmessung mittels FBG mit inhärenter Temperaturkompensation ^[4]

Es besteht auch die Möglichkeit, die Dehnung eines FBG ungleichmäßig zu verändern. Hierbei kann die Dehnung des zu messenden Objektes anhand Breite des Peaks des reflektierten Lichtes festgestellt werden. Dabei gilt, je größer die ungleichmäßige Verteilung, desto größer ist die Breite des reflektierten Lichtpeaks. Bei Änderung der Temperatur ändert sich die Breite des Peaks nicht, jedoch seine Position auf der horizontalen Achse. Ein Nachteil dieser Methode ist der Verlust der Möglichkeit der Frequenzmodulation, da sie auf der Intensität und nicht Resonanzfrequenz basiert. Dadurch wird diese Methode anfällig gegenüber Störsignalen, die beispielsweise von Krümmungen in der Faser produziert werden.

Neben Dehnungs- und Temperaturmessgeräten ist es auch möglich Neigungsmessgeräte mittels Faser Bragg Gitter anzufertigen. Hierbei löst die Änderung eines Neigungswinkels eine Änderung der Dehnung eines FBG aus. Man kann hier Systeme anfertigen, die entweder auf gleichmäßiger oder auf ungleichmäßiger Dehnung des FBG basieren. Systeme basierende auf ungleichmäßiger Dehnung haben wieder den Nachteil des Verlustes der Frequenzmodulation.

Neigungsmessgeräte basierend auf gleichmäßiger Dehnung des FBG erreicht man indem man ein Trägheitsobjekt mit einem FBG verbindet. Temperaturkompensation kann beispielsweise mithilfe der Bimetallmethode erreicht werden. Abbildung 2.9 zeigt ein FBG-Neigungsmessgerät, wo ein Trägheitsobjekt direkt mit einem FBG verbunden ist. [4]

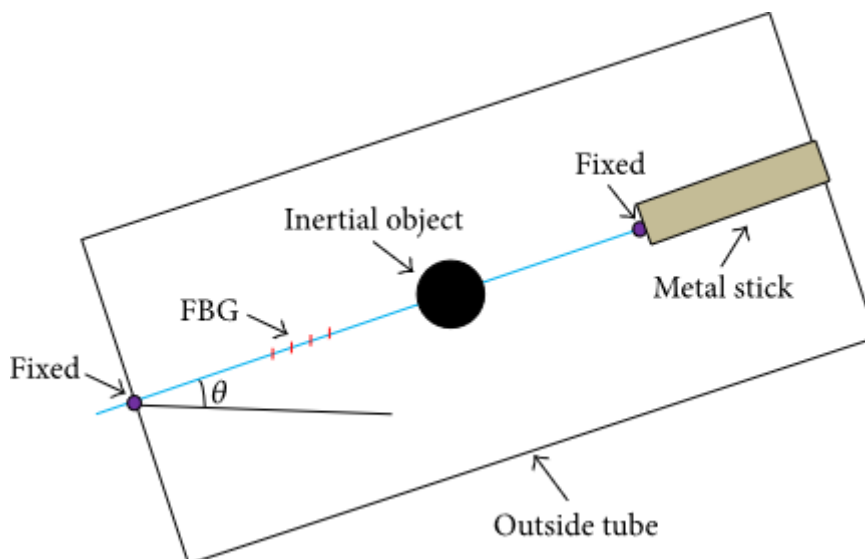


Abb. 2.9: Einachsiges Neigungsmessgerät [4]

Abbildung 2.10 zeigt ein ebenes bi-axiales Neigungsmessgerät, wo ein Trägheitsobjekt mit mehreren FBG verbunden ist. Diese Variante verlässt sich auf die Differenz zwischen den Wellenlängen der FBG welche aus der Änderung der

Neigung entsteht. Sie hat den Vorteil, dass diese Differenz immun gegen Temperatureinflüsse ist. [4]

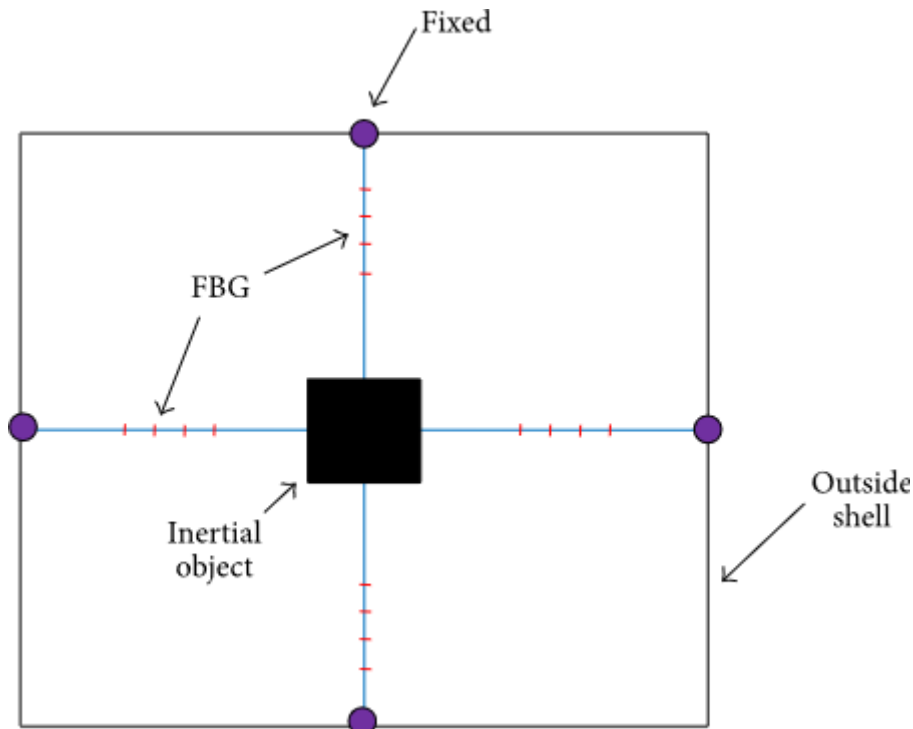


Abb. 2.10: Bi-axiales Neigungsmessgerät [4]

Beschleunigungssensoren auf Basis von FBG werden ähnlich wie Neigungsmessgeräte angefertigt. Hierbei reagieren die Trägheitsobjekte der jeweiligen Sensoren auf die vorherrschenden Beschleunigungsvorgänge, wodurch sich die Längen der daran befestigten FBG ändern. Ähnlich wie bei der in Abbildung 2.10 gezeigten schematischen Darstellung sind auch die in Abbildung 2.11 und 2.12 gezeigten Sensoren immun gegenüber Temperatureinflüssen. [4]

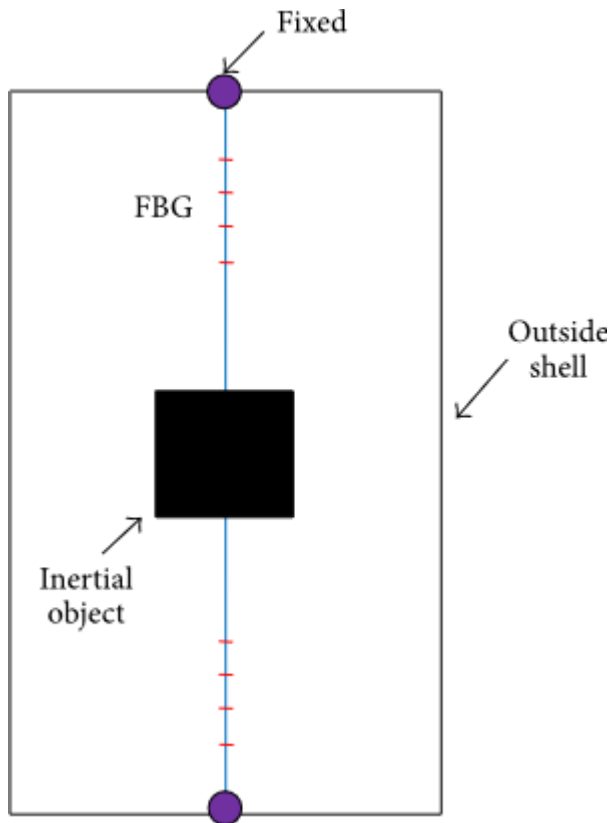


Abb. 2.11: Einachsiger FBG-Beschleunigungssensor ^[4]

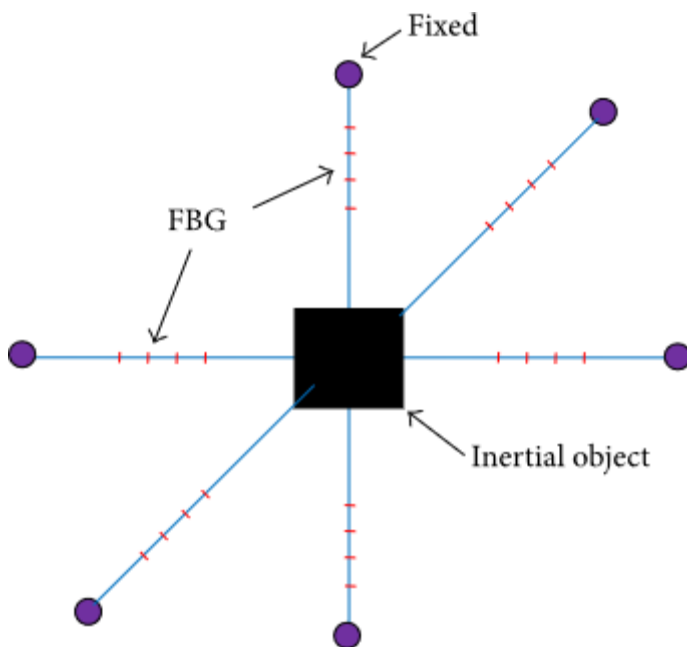


Abb. 2.12: Dreiachsiger FBG-Beschleunigungssensor ^[4]

Die Verwendung von FBG als Drucksensor geht mit deren Eigenschaft einher, dass sich bei Einwirkung von Druck deren Dehnung ändert. Diese Änderung folgt nachstehendem Zusammenhang:

$$\Delta\varepsilon = -\frac{P(1-2\nu)}{E} \quad 2.3$$

Hierbei ist P der angelegte Druck, E der Elastizitätsmodul und ν die Querkontraktionszahl. Es ist allerdings zu beachten, dass die inhärente Druckempfindlichkeit mit nur 3,14 pm/MPa zu klein ist, um aus FBG ohne weitere Modifikationen wirksame Drucksensoren herzustellen. Die Druckempfindlichkeit kann beispielsweise durch Einbetten des FBG in eine Polymerhülle auf 60 pm/MPa erhöht werden. Dies ist dennoch noch ein sehr kleiner Wert.

Die Empfindlichkeit kann dramatisch verbessert werden, indem man die beiden Enden des FBG fixiert und die axiale Distanz der beiden Enden ändert. Es entstehen so beispielsweise Druckempfindlichkeiten von ca. 33,876 nm/MPa. Auch hier kann der Temperatureinfluss wieder durch die Bimetallmethode kompensiert werden. [4]

Verschiedene Personen haben diverse Lösungen entwickelt um mittels Faser Bragg Gitter Druckmessungen vorzunehmen.

Ian P. Johnson et. al. haben sich mit der Verwendung von optischen Fasern mit FBG aus Kunststoff als Drucksensoren beschäftigt. Im Zuge der Experimente wurden mikrostrukturierte optische Multimoduspolymerfasern aus Polymethylmethacrylat (PMMA) verwendet. Die Fasern wiesen folgenden Querschnitt vor. [8]

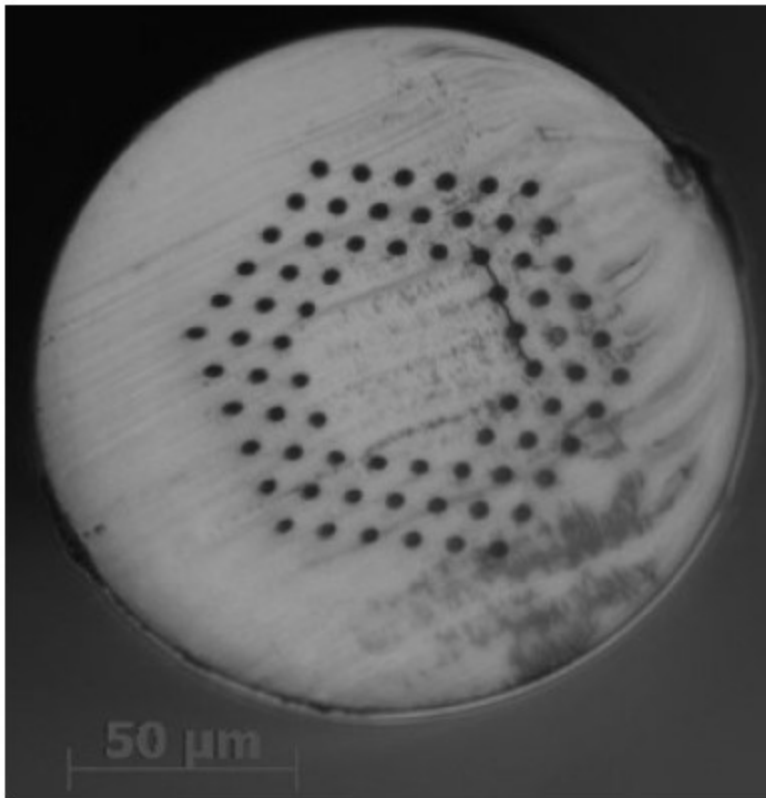


Abb. 2.13: Mikroskopaufnahme der mikrostrukturierten optischen Multimoduspolymerfaser, Außendurchmesser von 150 μm , Kerndurchmesser von 50 μm [8]

Die Fasern wurden in folgendem Testaufbau auf Druck belastet.

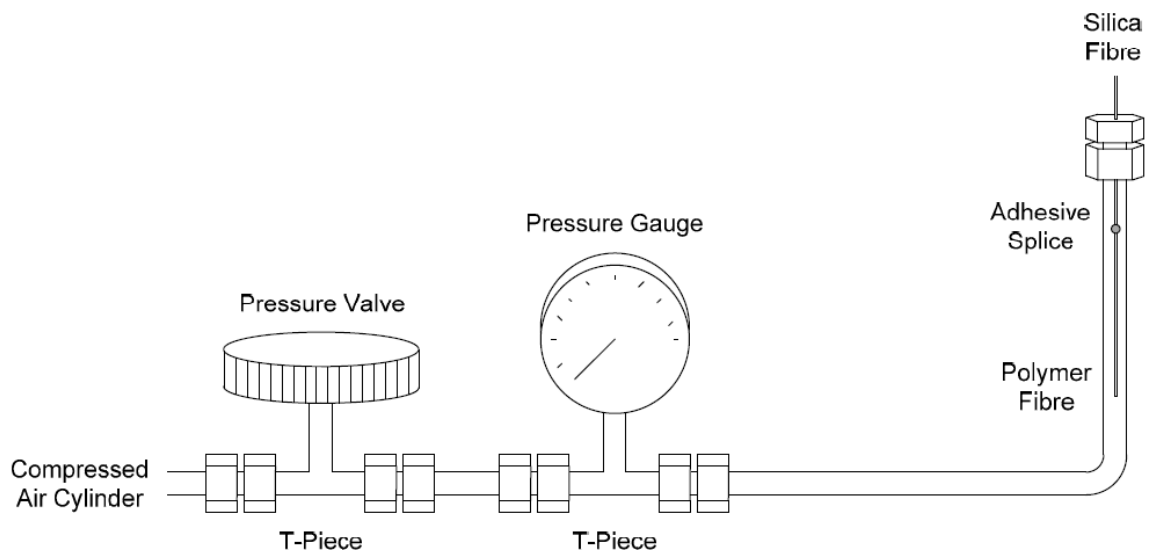


Abb. 2.14: Experimentales Setup um die Empfindlichkeit von optischen Polymerfasern auf hydrostatischen Druck zu prüfen [8]

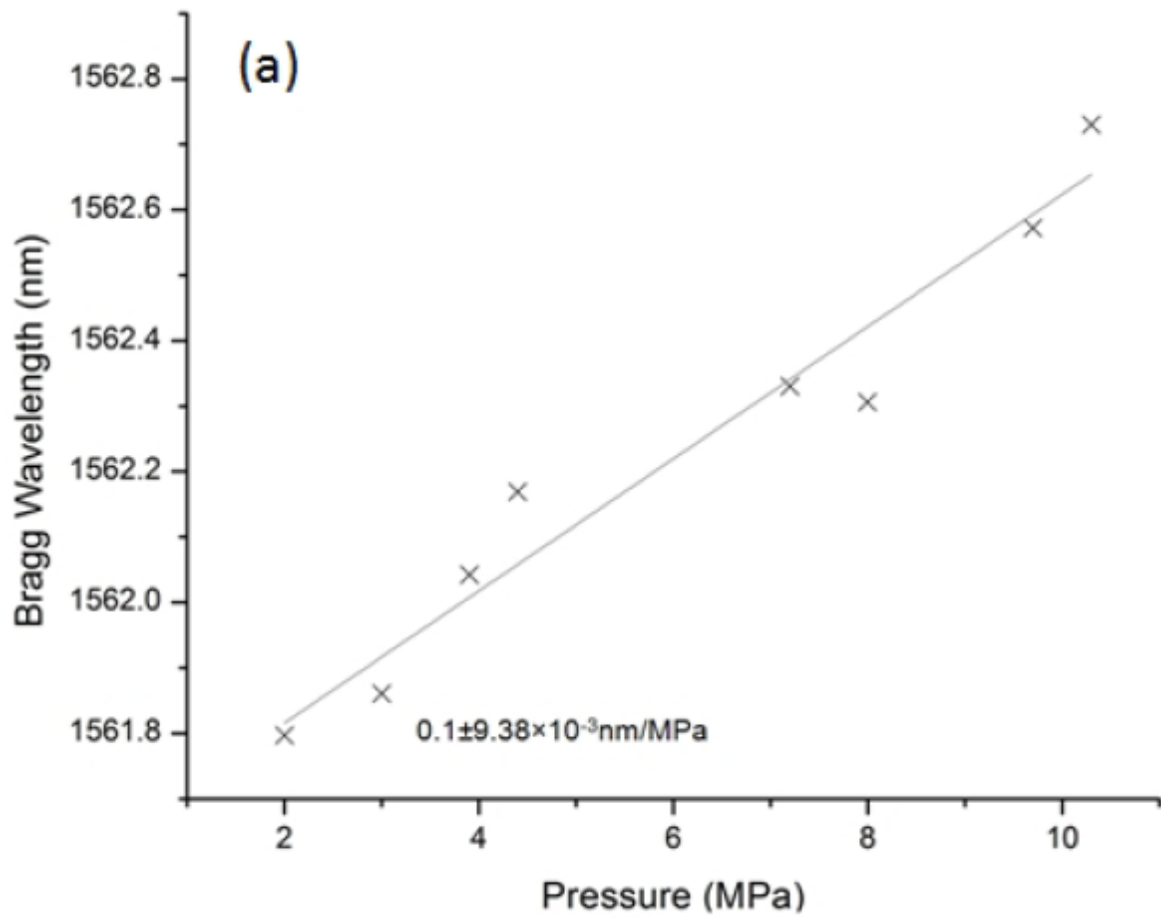


Abb. 2.15: Bragg-Wellenlänge der mikrostrukturierten optischen Multimoduspolymerfaser unter Einwirkung von Druck [8]

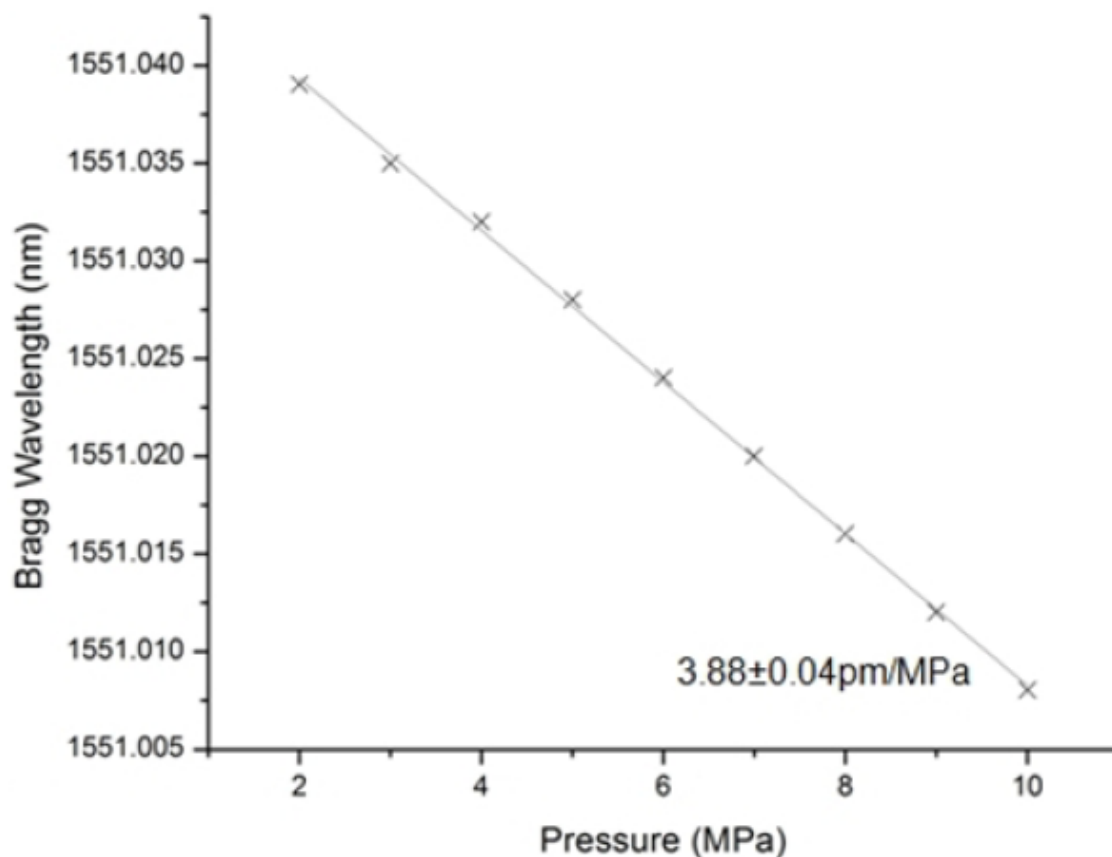


Abb. 2.16: Bragg-Wellenlänge einer optischen Glasfaser mit FBG unter Einwirkung von Druck [8]

In den obigen Abbildungen (3.3 und 3.4) ist deutlich zu sehen, dass die Polymerfaser mit $100 \pm 9.38 \text{ pm/MPa}$ eine wesentlich größere Empfindlichkeit in der Änderung der Bragg-Wellenlänge unter Einwirkung von hydrostatischem Druck aufweist, als die optische Glasfaser mit nur $3,88 \pm 0,04 \text{ pm/MPa}$. Desweiterem ist zu erkennen, dass die Polymerfaser eine positive Korrelation zwischen Druck und Bragg-Wellenlänge aufweist, während die Korrelation bei der Glasfaser negativ ist. [8]

Yen-Te Ho et. al. veröffentlichte eine Arbeit, in der sie die Entwicklung eines Drucksensors, in dem FBG an strategischen Positionen auf einer kreisförmigen biegsamen Platte angebracht wurden, beschreiben. ^[9]

Bei diesem Sensordesign wird die von Druck verursachte Biegedehnung entweder von einem einzelnen FBG erfasst, welches einen neutralen Punkt radial kreuzt. Oder die Biegedehnung wird von zwei FBG gemessen (Differentialkonfiguration), wobei diese FBG an Positionen angebracht sind, wo die Dehnung unterschiedliche Vorzeichen hat. Beim Design mit nur einem FBG korreliert die Druckänderung mit der Änderung in der Bandbreite des reflektierten Signals des FBG. Beim der Differentialkonfiguration korreliert die Druckänderung mit der Differenz der zentralen Wellenlängen beider FBG. In beiden Fällen ist der Sensor immun gegen Temperaturschwankungen. Eine schematische Darstellung des Sensors mit nur einem FBG ist in Abbildung 2.17 zu sehen. Die Darstellung der Differentialkonfiguration ist in Abbildung 2.18 zu sehen.

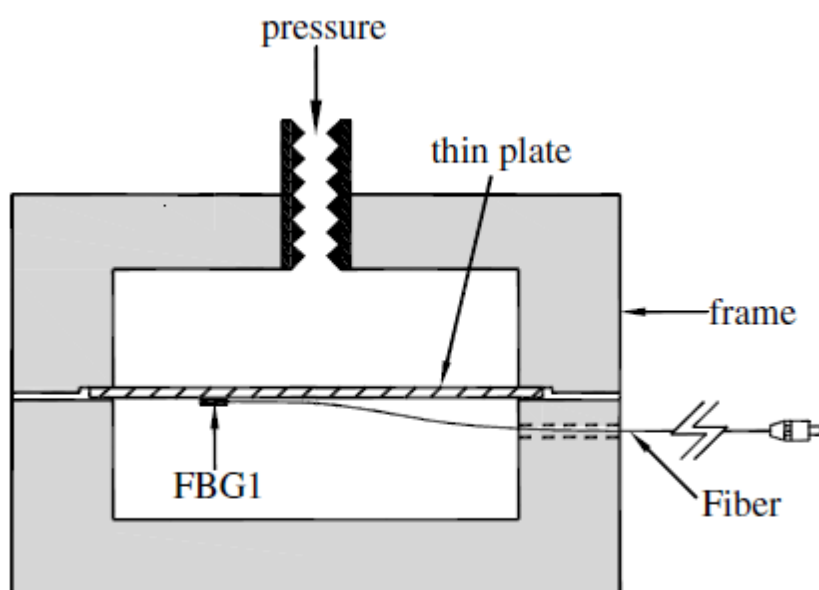


Abb. 2.17: Schematische Darstellung eines Drucksensors mit nur einem FBG ^[9]

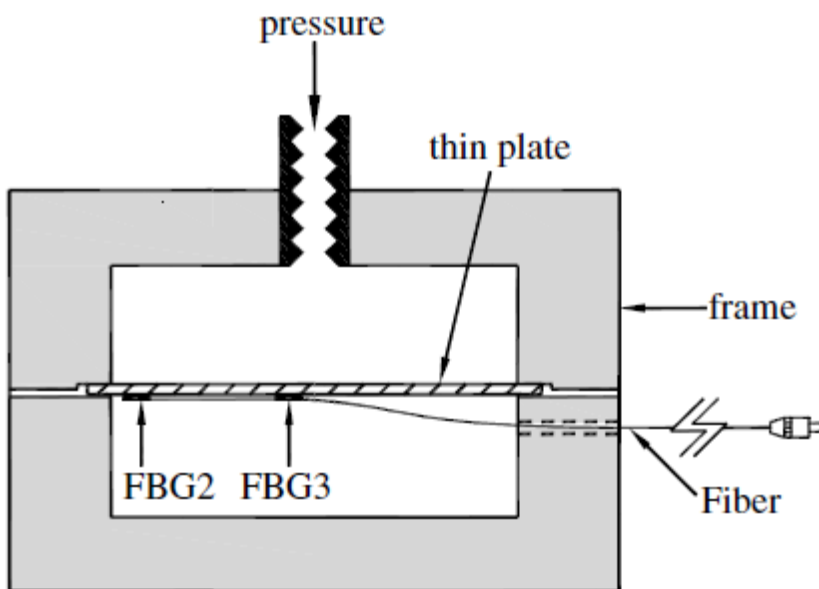


Abb. 2.18: Schematische Darstellung eines Drucksensors mit zwei FBG in Differentialkonfiguration [9]

Das Verhalten dieser Beiden Sensorkonfigurationen mit Änderung des Drucks in der Kammer ist in den Abbildungen 2.19 und 2.20 dargestellt.

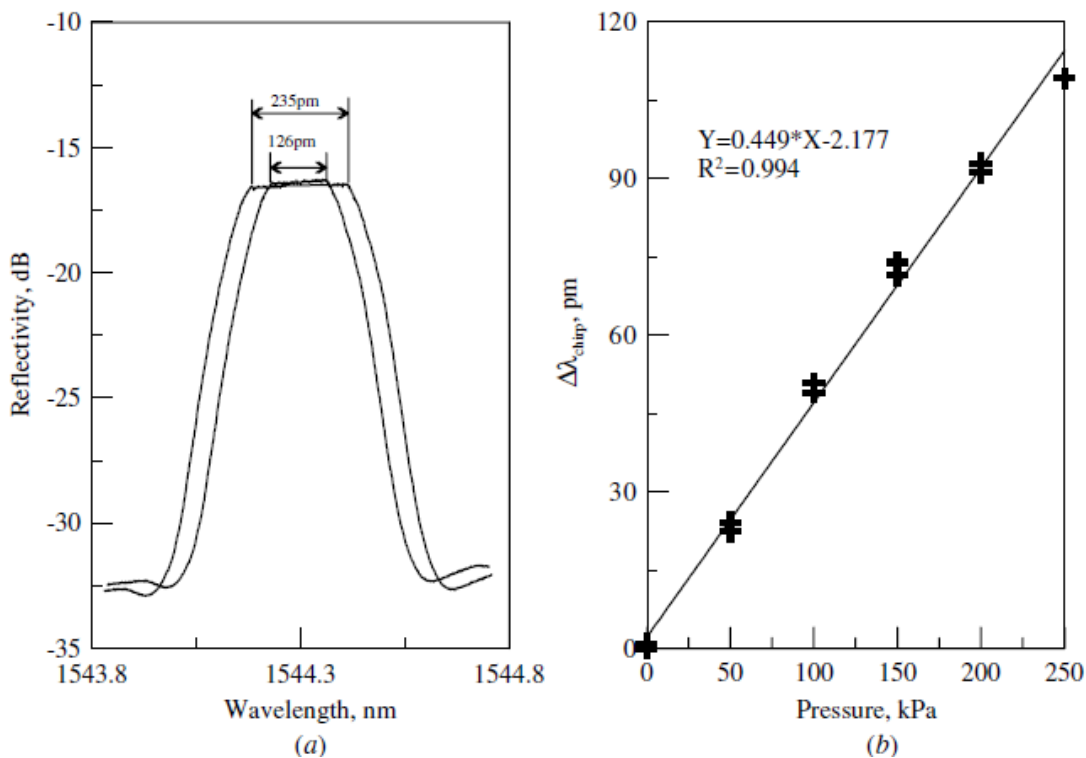


Abb. 2.19: Sensor mit nur einem FBG; a) Wellenform bei 0 (schmälere Kurve) und 250 kPa (breitere Kurve); b) Änderung der Wellenformbreite mit Änderung des Drucks [9]

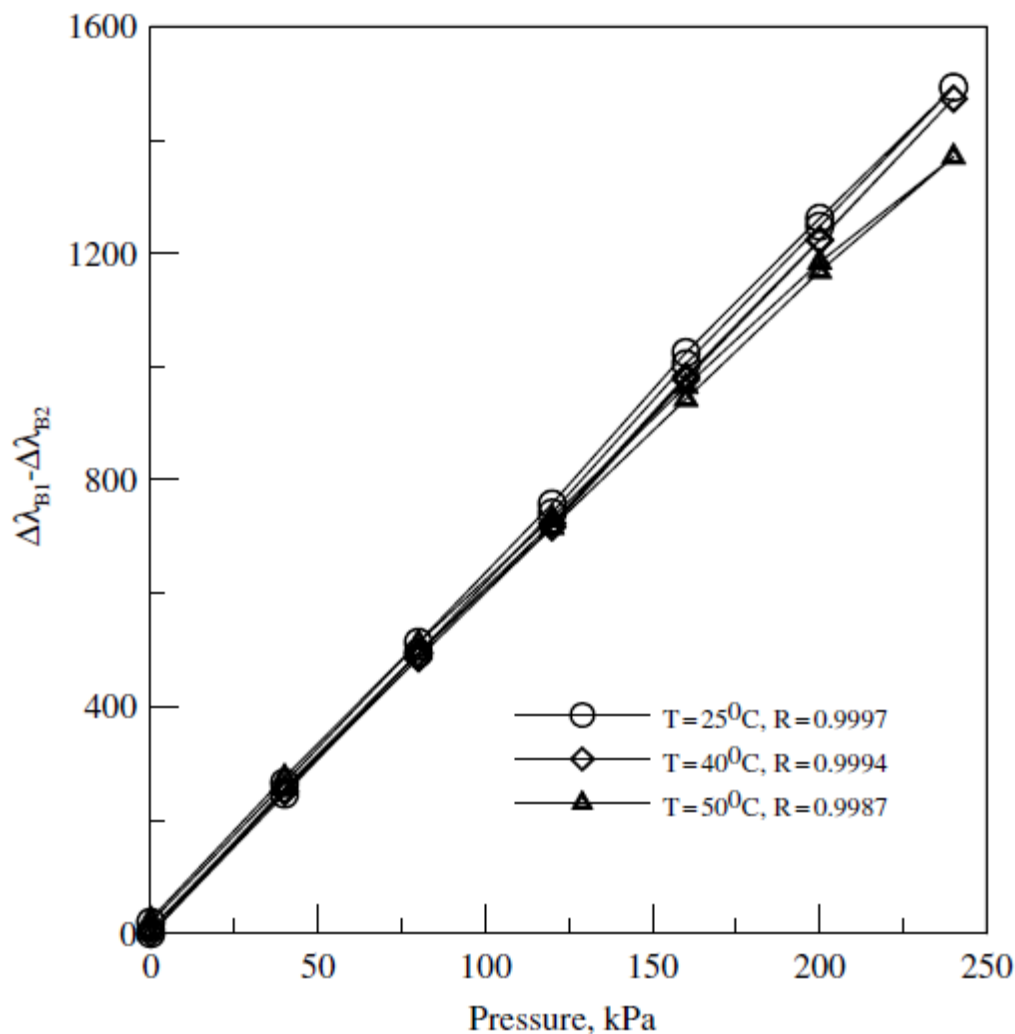


Abb. 2.20: Sensor in Differentialkonfiguration bei unterschiedlichen Temperaturen. [9]

Der große Nachteil und auch Hauptgrund, warum derartige Sensoren nicht für die weitere Integration in Sandwich-Verbundwerkstoffen in Frage kommen ist deren Größe. Die Sensoren lassen sich einfach nicht in die kleinen Wabenzellen des Kerns einbauen. [9]

David Hsiao-Chuan Wang et. al. beschreiben eine Methode Miniatursensoren aus FBG zu fertigen, indem man zwei Fasern miteinander verdreht und die Sensorelemente in spezielle Kapseln einschließt, wobei diese Kapseln zur Aufnahme des Drucks dienen. ^[10]

Bei einer einseitigen Belastung weisen die verdrehten FBG inhärent entgegengesetzte Antworten auf. Eines der beiden erfährt Stauchung während das andere gedehnt wird, wodurch sich die Bragg-Wellenlängen in entgegengesetzte Richtungen verschieben. Aus der Differenz dieser Wellenlängenverschiebungen können dann Rückschlüsse über den einwirkenden Druck gezogen werden. Darüber hinaus bewirkt diese Differenz, dass der Sensor inhärent immun gegen Temperaturschwankungen ist. Eine Darstellung des schematischen Aufbaus des Sensors ist in Abbildung 2.21 dargestellt.

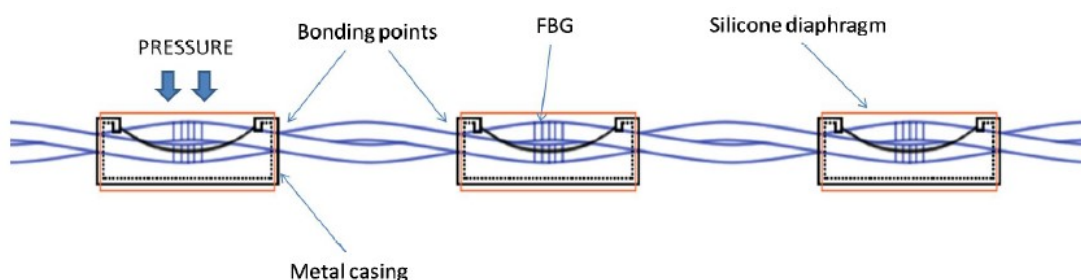


Abb. 2.21: Darstellung des Sensoraufbaus ^[10]

Die Ergebnisse der Kalibrierung dieses Sensors sind in Abbildung 2.22 dargestellt.

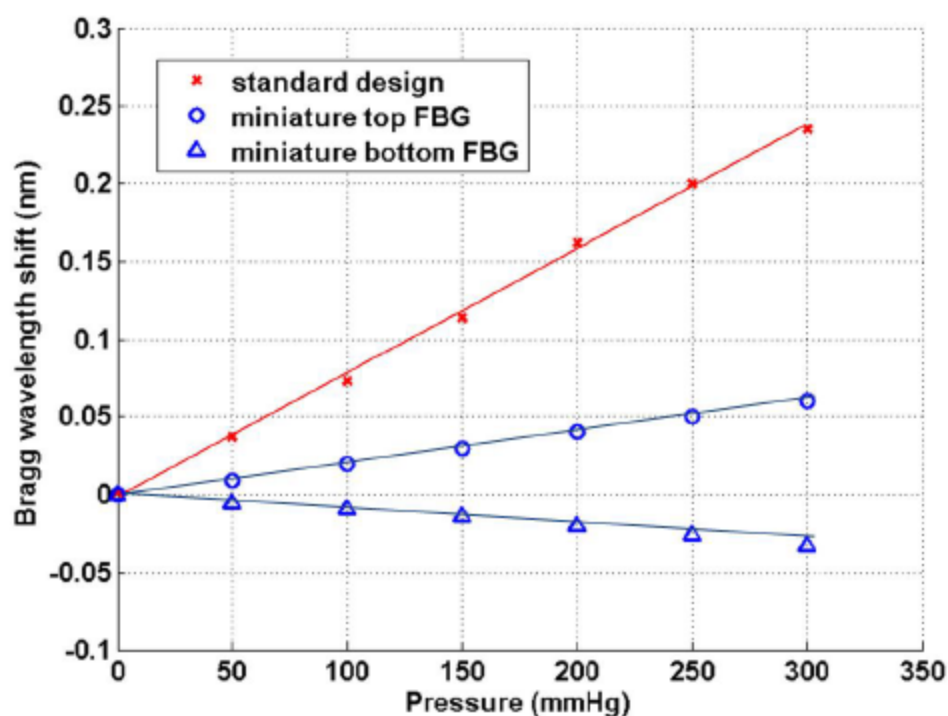


Abb. 2.22: Veränderung der Bragg-Wellenlänge unter Einfluss von Druck ^[10]

Schlussendlich wurde der Versuch FBG zur Druckmessung in Sandwichverbundstrukturen mit Honigwabenkern zu verwenden eingestellt. Bei einem FBG alleine ohne weitere Konstruktionen zur Druckaufnahme sind nicht empfindlich genug um Druckmessungen praktikabel zu machen. Die meisten Möglichkeiten die Druckempfindlichkeit von FBG zu verstärken oder die Druckempfindlichkeit von Konstruktionen in eine Dehnung des FBG umzuwandeln sind nicht klein genug um diese in einen Verbund zu integrieren. Desweiterem wurde keinerlei kommerziell verfügbarer Sensor auf Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers gefunden, welcher sowohl klein genug und Temperaturbeständigkeit bei 160°C aufweist.

2.2.2 Fabry-Pérot-Interferometer

Das Fabry-Pérot-Interferometer wurde 1897 von den französischen Physikern Charles Fabry und Alfred Pérot entwickelt. Es handelt sich um einen aus zwei teildurchlässigen Spiegeln bestehenden optischen Resonator. Für den Fall, dass der Spiegelabstand unveränderbar ist (bspw. Glas mit aufgedampften Spiegeln), werden diese Aufbauten als Fabry-Pérot-Etalon bezeichnet. Ein Fabry-Pérot-Etalon beispielsweise als Maßverkörperung benutzt. Ein eintreffender Lichtstrahl wird nur dann durch den Interferometeraufbau geleitet (transmittiert), wenn er die Resonanzbedingung erfüllt. Aus diesem Grund lässt sich das Fabry-Pérot-Interferometer unter anderem auch als optischer Filter einsetzen, der aus einer breitbandigen Strahlung ein schmalbandiges Spektrum herausfiltert. Spiegelverschiebungen ermöglichen es darüber hinaus, die spektralen Eigenschaften der transmittierten Strahlung einzustellen. Das Transmissionsverhalten lässt sich mit der Airy-Formel berechnen.

Das Transmissionsspektrum eines Fabry-Pérot-Interferometers zeigt mittels konstruktiver Interferenz schmale Transmissions-Maxima für Wellenlängen, welche die Resonanzbedingung erfüllen. Gleichzeitig werden andere Spektralbereiche in der Transmission durch destruktive Interferenz der Teilstrahlen nahezu vollständig ausgelöscht. Den Abstand $\Delta\lambda$ der Transmissionsmaxima nennt man freien Spektralbereich des Resonators. Der Frequenzabstand Δf ist vom Spiegelabstand L und dem Brechungsindex n abhängig:

$$\Delta f = \frac{c}{2*n*L} \quad 2.4$$

Die so genannte Finesse F dient der Charakterisierung des Resonators. Sie ist definiert als Verhältnis zwischen dem freien Spektralbereich $\Delta\lambda$ und der Halbwertsbreite $\delta\lambda$ eines einzelnen Maximums:

$$F = \frac{\Delta\lambda}{\delta\lambda} \quad 2.5$$

Eine größere Finesse bedeutet, dass mehr Strahlenbündel miteinander interferieren und damit schärfere Interferenzringe ausbilden. Einfache Ausführungen von Fabry-Pérot-Interferometer erreichen bei Licht im sichtbaren Bereich Finessen von ungefähr 30. Bei hohen Reflektivitäten R der Spiegel und bei geringer Dämpfung im Resonator nimmt die Finesse F große Werte an.

$$F = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad 2.6$$

Unter Verwendung von dielektrischen Dünnschichtbelägen und gekrümmten Spiegeln lassen sich Finessen von bis zu $4,1 \cdot 10^5$ erreichen. Dabei wächst mit steigender Finesse bei Resonanz die Intensität bzw. Feldstärke der Lichtwellen innerhalb des Interferometers bzw. Resonators auf Werte an, die wesentlich höher sind als diejenigen des durchtretenden Lichtes. Diese Tatsache muss bei Anwendungen, bei denen die Leistung im Vordergrund steht, berücksichtigt werden (z. B. bei Laser-Resonatoren und -Modulatoren).^[5]

Bei der Verwendung von Interferometern als Drucksensoren benötigt man eine optische Faser, an deren Ende sich eine biegsame reflektierende Membran befindet. Das Licht wird an dieser Membran reflektiert und interferiert mit dem einfallenden Licht. Durch Einwirkung von Druck auf die Außenseite der Membran verändert sich die Phase der reflektierten Lichtwelle, wodurch es zu einer Veränderung im Interferenzmuster kommt. Durch Messung dieser Veränderung kann dann die Änderung des Drucks bestimmt werden.

Auch mit diesem Konzept wurden reale Sensoren entwickelt.

Bing Sun et. al fertigten einen faseroptischer Druck- und Temperatursensor auf Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers an. Bei diesem Sensor wurde das Ende

einer optischen Faser mit einem Polymertropfen versehen. Das andere Ende wurde mit einer Lichtquelle und einem optischen Analysegerät ausgestattet. ^[11]

Bei diesem Sensor gibt es zwei reflektierende Interfaces, zum einen am Übergang Faser-Polymer und zum anderen am Übergang Polymer-Umgebung. Teile des Lichts werden beim Medienwechsel an diesen Schnittstellen reflektiert und interferieren beim Durchqueren der Faser mit einander. Dieses Interferenzmuster wird am anderen Ende der Faser detektiert. Der Aufbau dieses Sensors ist zu sehen in Abbildung 2.23.

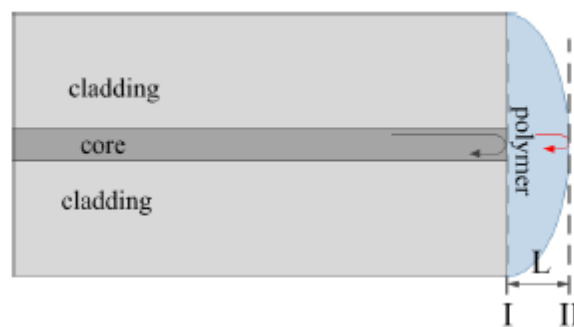


Abb. 2.23: Fabry-Pérot-Interferometer mit Polymerkappe am Ende einer optischen Faser ^[11]

Durch Einwirken von Druck und Temperatur auf die Polymerkappe verändert sich deren Form, wodurch es zu einer Veränderung im Interferenzmuster kommt. Die Einflüsse von Druck und Temperatur auf das Interferenzmuster können in Abbildungen 2.24 und 2.25 respektive gesehen werden.

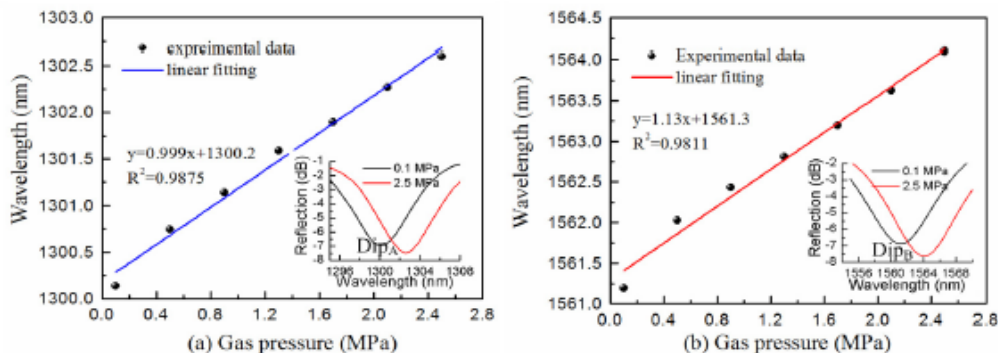


Abb. 2.24: Einfluss von Druck (0,1 bis 2,5 Mpa) auf FPI mit unterschiedlichen Interferenzwellenlängen [11]

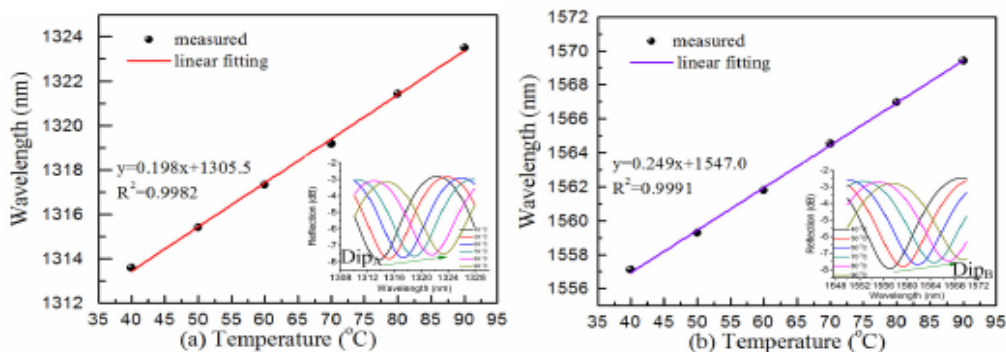


Abb. 2.25: Einfluss von Temperatur (40 bis 90°C) auf FPI mit unterschiedlichen Interferenzwellenlängen [11]

Die Firma opSens produziert Miniatorsensoren vom Typ OPP-M auf Basis des Fabry-Perot-Interferometers. Dieser Sensor ist dafür konzipiert, Druck in physiologischen Umgebungen zu messen. Der Sensor hat einen Messbereich von -0,40 bar bis 0,47 mmHg relativ zu Atmosphärendruck. Der Sensorkopf ist mit einem Druckmesser von 0,25 mm sehr klein. Das Problem mit diesem Sensor ist der geringe Einsatztemperaturbereich. Dieser liegt bei nur 10 bis 50 °C, was nicht den geforderten Anforderungen entspricht. Der Sensor ist in Abbildung 2.26 zu sehen. [12]



Abb. 2.26: Sensor von opSens ^[12]

Dieser Hersteller ist der einzige Hersteller von Sensoren basierend auf Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers deren Sensorköpfe klein genug sind, um sie in den Verbund zu integrieren. Da der Hersteller auch auf Anfrage keine Produkte verfügt, welche auch bei 160 °C funktionsfähig sind, wird damit auch der Ansatz verworfen, Sensoren deren Funktionsweise auf dem Prinzip des Fabry-Perot-Interferometers basiert, zu verwenden.

2.3 Elektrische Messmethoden:

Bei den elektrischen Messmethoden wurde primär in Bezug auf kapazitive und piezoresistive Sensoren recherchiert. Im Bereich der piezoresistiven Sensoren hat sich das Temperaturlimit als entscheidend herausgestellt.

Im Folgenden wird die Funktionsweise von kapazitiven und piezoresistiven Drucksensoren dargestellt. Desweiterem werden diverse Hersteller von piezoresistiven Sensoren und deren Produkte aufgelistet.

2.3.1 Piezowiderstandsdrucksensoren

Um einen Piezowiderstandsdrucksensor herzustellen, braucht man zwei Dinge. Diese sind eine Membran mit bekannter Fläche und ein Detektor, welcher auf die angelegte Kraft reagiert. Beides kann aus Silizium hergestellt werden. Der Drucksensor besteht aus einer dünnen Siliziummembran, an der eine Reihe von Piezowiderständen angebracht ist, welche durch Dotierung direkt in die Membran eingebracht werden können. Diese Widerstände werden üblicherweise als Wheatstonebrücke geschaltet. Das Signal dieser Sensoranordnung ist relativ klein, weshalb so ein Sensor eine Signalverstärkung benötigt. Desweiterem sind Siliziumsensoren stark temperaturempfindlich. Die Messschaltung sollte daher zu einer Temperaturkompensation befähigt sein.

Wenn eine Spannung an einen Halbleiterwiderstand aufgebracht wird, ändert sich der Widerstand R durch Piezowiderstandseffekte um ΔR folgendermaßen:

$$\frac{\Delta R}{R} = \pi_l \sigma_l + \pi_t \sigma_t \quad 2.7$$

Hierbei sind π_l und π_t die Piezowiderstandskoeffizienten in Longitudinal- und Transversalrichtung und σ_l und σ_t die entsprechenden Spannungen. Die π -Koeffizienten sind dabei von der Orientierung der Widerstände auf dem Siliziumkristall abhängig. Für p-dotierte Widerstände in (110)-Richtung auf einer

quadratischen n-dotierten Siliziummembran mit einer (100)-Oberflächenorientierung sehen diese Koeffizienten beispielsweise so aus:

$$\pi_l = -\pi_t = \frac{1}{2} \pi_{44} \quad 2.8$$

Diese Anordnung ist in Abbildung 2.27 zu sehen. [6]

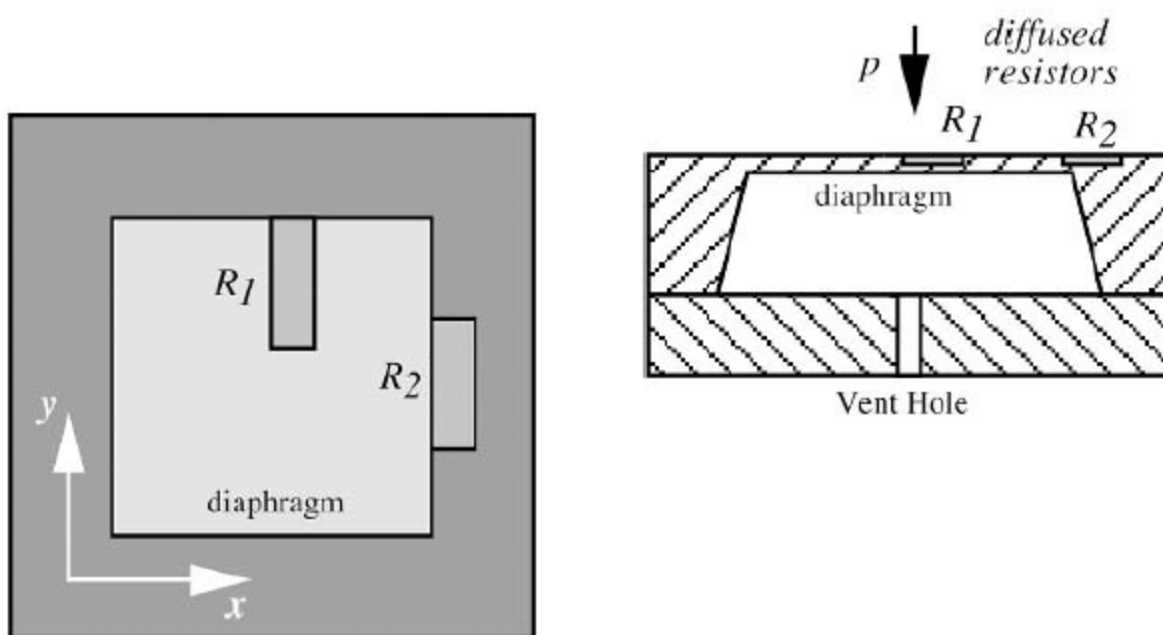


Abb. 2.27: Piezowiderstandsdrucksensor, schematischer Aufbau [6]

Eine Änderung im elektrischen Widerstand ist proportional einer an der Membran angelegten mechanischen Spannung (Druck). Für die in Abbildung 2.27 dargestellten Widerstände R_1 und R_2 bedeutet das, dass sich die Widerstände ΔR_1 und ΔR_2 in entgegengesetzte Richtung ändern.

$$\frac{\Delta R_1}{R_1} = -\frac{\Delta R_2}{R_2} = \frac{1}{2} \pi_{44} (\sigma_{1y} - \sigma_{1x}) \quad 2.9$$

Für die Druckabhängigkeit (a_p) und Temperaturabhängigkeit (b_T) des Sensors gelten folgende Zusammenhänge:

$$a_p = \frac{\pi_{44}}{4} \frac{\partial(\sigma_{1y} - \sigma_{1x})}{\partial p} \quad 2.10$$

$$b_T = \frac{1}{a_p} \frac{\partial a_p}{\partial T} = \frac{1}{\pi_{44}} \frac{\partial \pi_{44}}{\partial T} \quad 2.11$$

Da $\frac{\partial \pi_{44}}{\partial T}$ einen negativen Wert annimmt, heißt das, dass mit steigender Temperatur die Empfindlichkeit des Sensors abnimmt.

Piezowiderstandsdrucksensoren ähnlich wie kapazitive Drucksensoren können in drei verschiedene Messausführungen gefertigt werden. Diese wären zumal Absolut-Druckmessung, wo sich auf der anderen Seite der Siliziummembran eine Vakuumkammer befindet, die Differenzdruckmessung, wo beide Seiten der Membran mit unterschiedlichen Drücken belastet werden und Relativdruckmessung, bei der der gemessene Druck mit dem Atmosphärendruck verglichen wird.

Eine für diese Arbeit relevante Methode Siliziumdrucksensoren herzustellen ist die Methode des silicon fusion bonding (SFB). Mit dieser Methode können einkristalline Siliziumwafer verlässlich mit nahezu perfekten Schnittstellen aneinander gebunden werden, ohne dabei Zwischenschichten zu verwenden. Es lassen sich hiermit besonders kleine Sensoren herstellen. Die Sensorfläche kann dabei bis zu achtmal kleiner sein als bei der Verwendung von konventionellen Herstellungsverfahren. ^[6]

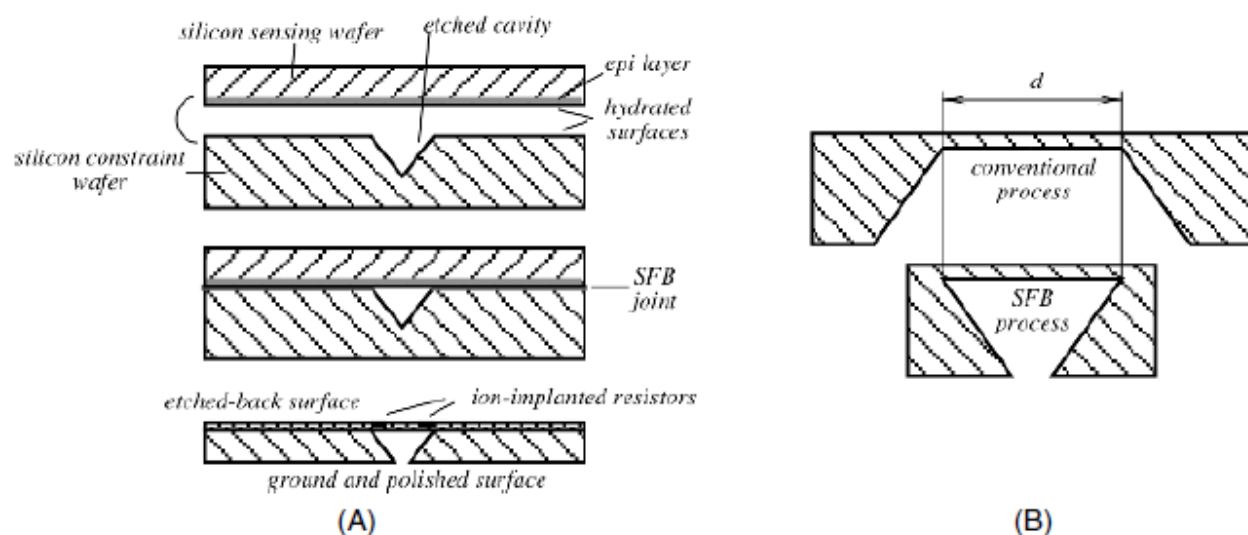
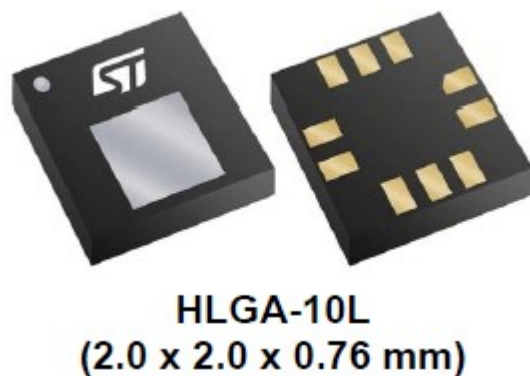


Abb. 2.28: Silicon fusion bonding; Produktionsschritte (A); Vergleich SFB und konventionelle Methode (B) [6]

Für diese Art von Drucksensoren gibt es eine Reihe von Herstellern. Einige davon sind exemplarisch im Folgenden angeführt.

Die Firma STMicroelectronics N. V. produziert den Sensor Typ LPS22HB einen MEMS (micro-electro-mechanical system) Piezowiderstandsdrucksensor mit einem absoluten Messbereich von 0,26 bis 1,26 bar. Der Sensor liefert ein 24-bit digitales Drucksignal und ein 16-bit digitales Temperatursignal. Er ist einsatzfähig in einem Temperaturbereich von -40 bis 85 °C. Die Abmessungen des Sensors sind in der Abbildung 2.29 unterhalb. Aufgrund der niedrigen oberen Betriebstemperatur und des eher eingeschränkten Messbereichs kommt dieser Sensor nicht für die Experimente in Frage. [13]



HLGA-10L
(2.0 x 2.0 x 0.76 mm)

Abb. 2.29: LPS22HB Sensor [13]

Die Firma Acal BFi Germany GmbH bietet die NPP-301-Serie von Piezowiderstandsdrucksensoren zum Verkauf an. Diese Sensoren sind Siliziumsensoren in einem Kunststoffgehäuse mit Kontaktpins. Der Sensor liefert ein Analogsignal und besitzt einen Messbereich von bis zu 7 bar. Die Einsatztemperaturen liegen zwischen -40 und 125°C. Desweiterem ist der Sensor mit Abmessungen von 6,1*5,1*2,8 mm eher groß. Aufgrund der niedrigen Temperaturobergrenze kommt dieser Sensor nicht für weitere Betrachtung in Frage. Der Sensor ist in untenstehender Abbildung zu sehen. [14]



Abb. 2.30: NPP-301 Serie von Acal BFi Germany GmbH [14]

Die Firma SMi (Silicon Microstructures) produziert eine Vielzahl von Piezowiderstandsdrucksensoren. Diese Sensoren kommen in Varianten mit oder ohne Kunststoffgehäuse und Kontaktpins, mit Digital- oder Analogsignal bzw. Absolut- oder Differenzdruckmessung. Im Folgenden sind Beispiele für die Sensoren aus dem Sortiment der Firma angeführt. ^[15]

Der Typ SM6250 ist ein analoger Differenzdrucksensor mit einem Messbereich von -0,7 bis 0,7 psi was einem Bereich von ca. -0,05 bis 0,05 bar entspricht. Dieser Sensor ist für Anwendungen im Niederdruckbereich ausgelegt. Der Sensor hat ein Gehäuse mit Kontaktpins und kann in einem Temperaturbereich von -40 bis 85 °C eingesetzt werden. Die Abmessungen betragen 10,26*7,52*2,34 mm. Der Sensor fällt wegen der geringen Einsatztemperatur, den großen Abmessungen und dem geringen Druckbereich aus der Auswahl. Er ist in Abbildung 2.31 zu sehen.

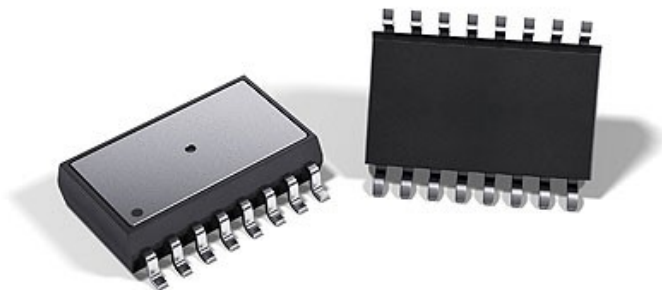


Abb. 2.31: SM6250 von SMi ^[15]

Bezüglich der Temperaturbereiche sind die meisten Sensoren von SMi in einem Bereich von -40 bis 85 oder 125 °C zu finden. Einige haben jedoch maximale Einsatztemperaturen von bis zu 150 °C.

Hervorzuheben davon ist der Sensor vom Typ SM98A. Dieser Sensor ist ein Absolut-Drucksensor ohne Gehäuse. Er kann in Ausführungen mit Messbereichen von 0 bis 10 oder 20 bar erworben werden. Der Einsatztemperaturbereich liegt zwischen -45 und 150 °C. Der Sensor hat Abmessungen von 1,2*1,33*0,56 mm. Aufgrund der Tatsache, dass die maximale Einsatztemperatur „nur“ 10 Grad unterhalb der geforderten 160 °C liegt, der Sensor sehr klein und der Druckbereich groß ist, kann dieser Sensor für Experimente in Betracht gezogen werden. Zu sehen ist der Sensor in Abbildung 2.32.

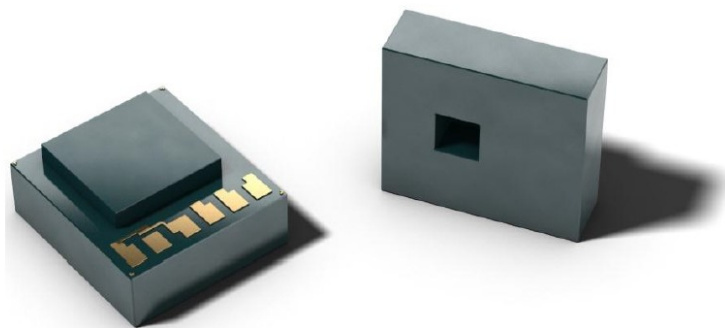
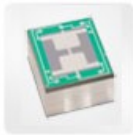
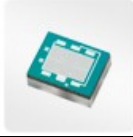


Abb. 2.32: SM98A von SMi [16]

Die Firma Merit Sensor produziert diverse Serien von Sensoren für verschiedenste Messbereiche und Umgebungstypen, sowohl zur Messung von Absolut-Druck als auch von Relativdruck. Die Einsatzbereiche dieser Serien sind in untenstehender Tabelle aufgeführt. [17]

L-Series Low Pressure		-40 bis 150 °C	0,01 bis 0,345 bar Relativ	3,3*3,3*2,66 mm
3000-Series Low Pressure		-40 bis 150 °C	0,34 bis 7 bar Absolut, Relativ	3,3*2,5*1,3 mm


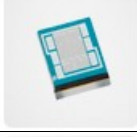
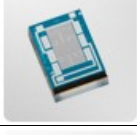


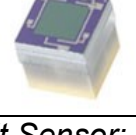
AP301-Series Medium Pressure		-40 bis 150 °C	6,9 bis 68,9 bar Absolut, Relativ	2,8*2,2*1,27 mm
5000-Series High Pressure		-40 bis 150 °C	69 bis 689 bar Absolut	1,9*1,6*0,89 mm
7000-Series Broad Pressure		-40 bis 150 °C	1 bis 34,5 bar Absolut, Relativ	2,2*1,6*0,89 mm
Hm-Series Harsh Media		-40 bis 150 °C	7 bis 34,5 bar Absolut	2,07*2,07*1,4 mm
K-Series High Pressure		-40 bis 150 °C	68,9 bis 1034 bar Absolut	1,4*1,4*0,89 mm
J-Series Low Pressure		-40 bis 150 °C	0,21 bis 21 bar Absolut, Relativ	1,91*1,91*1,9 mm

Tabelle 2.1: Merit Sensor; Sensorserien [17]

Von den in obiger Tabelle angeführten Sensorserien kommen sowohl die 3000-Serie als auch die J-Serie in Frage, wobei die J-Serie wegen ihres erweiterten Messbereichs den Vorzug hat. Auch hier tritt wieder das Problem auf, dass die maximalen Einsatztemperaturen von nur 150 °C unter den geforderten 160 °C liegen.

2.3.2 Kapazitive Drucksensoren

Das Messprinzip von kapazitiven Sensoren ist folgendermaßen erklärt. Zwei Elektroden bilden einen Kondensator mit messbarer Kapazität. Durch Änderung der Messgröße ändert sich die Kapazität des Kondensators. Diese Änderung kann durch Verändern des Abstandes oder Form der Kondensatorplatten erfolgen, durch einbringen eines Dielektrikums zwischen die Platten, oder durch Veränderung der wirksamen Plattenfläche bei Drehkondensatoren. Im Falle des Drucksensors ist eine der Elektroden eine biegsame Membran, deren Krümmung sich durch Einwirken eines Drucks ändert und damit eine Veränderung in der messbaren Kapazität des Sensors hervorruft. Drucksensoren verwenden einen Referenzdruck, welcher je nach Messmodus intern entweder 0 oder 1 bar beträgt, beziehungsweise können diese Sensoren auch als Differentialdrucksensoren arbeiten, wo zwei unterschiedlich Drücke miteinander verglichen werden. [6], [7]

Eine mögliche Konstruktionsausführung für kapazitive Drucksensoren ist die Verwendung einer Siliziummembran. Es ist möglich einen vollständigen Sensor aus einem einzigen Stück Silizium zu fertigen. Dadurch wird die Anwendungsstabilität maximiert. Die Membran kann so ausgelegt werden, dass sich die Kapazität um bis zu 25% über den gesamten Messbereich ändert. Im Gegensatz zu Piezowiderstandsdrucksensoren, welche auf die Maximierung der Spannung in den Membranrändern ausgelegt werden, verwendet man bei kapazitiven Sensoren die Lageänderung der Mittelsektion der Membran. Die Membran kann dabei durch mechanische Stopper gegen Überdruck geschützt werden. Kapazitive Drucksensoren können dadurch Überdruckstöße von bis zu 1000-mal des maximal messbaren Druckwertes überstehen, ohne Schäden davonzutragen. Kapazitive Sensoren sind besonders für Anwendungen geeignet, wo generell kleine Drücke vorherrschen, es allerdings gelegentlich zu hohen Druckspitzen kommt. [6], [7]

Die Firma Proton Mikrotechnik produziert kapazitive Drucksensoren vom Typ „Proton Pressure Sensor“. Diese Sensoren können sowohl mit oder ohne Keramikschutzgehäuse geliefert werden. Das Schutzgehäuse verfügt an der Unterseite Lötstellen. Sie arbeiten üblicherweise in einem Messbereich von 0,3 bis 1,3 bar Absolut-Druck, können aber auch für das Messen von Drücken von bis zu 8 bar verwendet werden. Beim Übergang von Drücken unter 1,3 bar zu Drücken über 1,3 bar kommt es zu einem Wechsel des Messmodus, wodurch die Sensoren hier eine Änderung der Druck/Kapazitätskurve aufweisen. Die Sensoren selbst haben Abmessungen von 1,2*0,6*0,5 mm. Das Gehäuse hat Abmessungen von 3*3*1,5 mm. Laut Anfrage beim Hersteller sind diese Sensoren auch bei Temperaturen von über 200 °C noch voll einsatzfähig. Dieser Typ von Sensor kommt für die Durchführung von Experimenten im Zuge dieser Arbeit in Frage. ^[18]

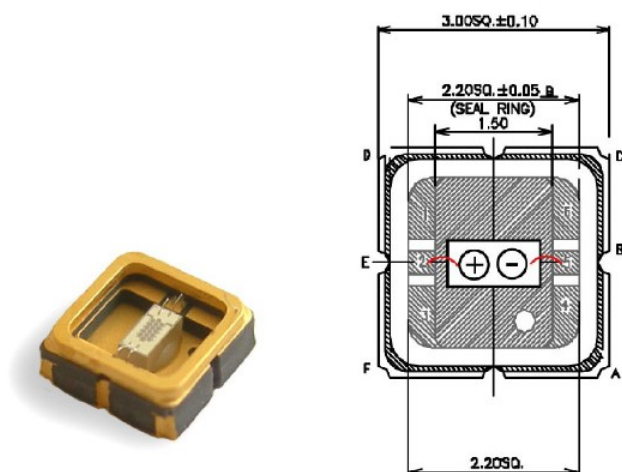


Abb. 2.33: Kapazitiver Drucksensor von Proton Mikrotechnik ^[18]

3 Verwendete Geräte, Materialien und Methoden

3.1 Testaufbauten

3.1.1 Prepreg

Für den Testaufbau wurden Prepregs vom Typ Airpreg PY 2843 als Decklagen verwendet. Die Prepregs wurden mittels Schere auf Ausmaße von 105 * 105 mm zugeschnitten.

3.1.2 Wabenkern

Als Kern wurde Aramidverstärktes Papier in Hexagonwabenform mit 5mm Höhe auf 100 * 100 mm zugeschnitten. In der Mitte wurde eine dreistrahlige Verstrebung herausgeschnitten um mehr Platz für den Sensor zu erhalten.

3.1.3 Kapazitive Sensoren

Für die Experimente mit kapazitiven Drucksensoren wurden Sensoren vom Typ „Proton Pressure Sensor“ in einem Keramikgehäuse verwendet. Diese Sensoren bestehen aus einer Anordnung von Kondensatoren mit insgesamt 16 ultrakleinen Polysilikonmembranen über isolierten Elektroden. Diese Anordnung dient der Minimierung von parasitären Kapazitäten. Die Sensoren können in einem normalen Modus arbeiten für geringe Druckverhältnisse (0,3 bis 1,3 bar Absolutdruck) und in einem Berührungsmodus für höhere Drücke. Die Sensoren selbst haben Abmessungen von 1,2*0,6*0,5 mm. Sie sind mittels Golddrahtbonden mit dem Keramikgehäuse verbunden. Das Gehäuse hat Abmessungen von 3*3 mm.

3.1.4 Piezowiderstandssensoren

Als Piezowiderstandsdrucksensoren wurden Sensoren vom Typ „ J-Series J1PH-105-VT“ vom Hersteller Merit Sensors verwendet. Dieser Sensor verwendet eine Piezowiderstände in Wheatstonebrückenschaltung in einem Design, welches Glas anodisch mit einer geätzten Siliziummembran verbindet. Dieser Sensor insbesondere ist ein Absolutdrucksensor mit einer Messspanne von bis zu 10 bar. Die Messbrücke bedient sich einer halboffenen Konfiguration, welche aber leicht geschlossen werden kann, indem man zwei der fünf Kontaktflächen miteinander verbindet. Die Abmessungen betragen 1,95*1,95*1,9 mm und der Sensor kann in einem Temperaturbereich von -40 bis 150 °C eingesetzt werden.

3.1.5 Verkabelung

Die Sensoren wurden mittels Kabel vom Typ „SDC-36T-1B“ der Vishay Measurements Group GmbH mit dem Board verbunden. Beim Verwenden von den kapazitiven Sensoren wurden zwei Kabel miteinander verdreht und an einem Ende mit den Kontaktflächen am Evaluation Board verlötet. Am anderen Ende wurden die verdrehten Kabel mit den Kontaktflächen am Keramikgehäuse des Sensors verlötet. Die Kabel wurden verdreht, um den Kapazitätsoffset resultierend aus dem Abstand der Kabel möglichst konstant zu halten.

Bei der Verwendung mit Piezowiderstandsdrucksensoren wurden zunächst die Kontakte des Sensors mittels leitfähigem „Polytec EC 101“-Zweikomponentenepoxidharzkleber mit kleineren Stücken des Drahtes verklebt. Diese Stücke dienten dann als Träger für die Verlotung von Kabel und Sensor.

Das Kabel selbst ist ein versilbertes Kupferkabel mit Teflon-Isolierung. Der Außendurchmesser des Kabels mitsamt Isolierung beträgt $0,27 \pm 0,025$ mm mit einem Leiterdurchmesser von 0,13 mm. Das Kabel weist einen Widerstand von $1,4 \Omega/m$ und ist einsatzfähig in einem Temperaturbereich von -190 bis 200 °C.

3.2 Presse

Während der Experimente wurde eine Presse vom Typ WKP 3500 S von Wickert Maschinenbau GmbH verwendet. Die Presse besitzt eine Schließkraft von 0 bis 393 kN, eine Presskraft von 100 bis 3800 kN mit einem Kraftanstieg von 1 bis 750 kN/sec und einen Öffnungsweg von 0 bis 600 mm. Die Presse verfügt über ein Heizsystem, ein Vakuumsystem und die Möglichkeit verschiedene Werkzeuge zu verwenden.

3.3 Autoklav

Zum Kalibrieren der Sensoren wurde ein Autoklav der Firma Estanit GmbH verwendet. Der Autoklav ist eine Sonderanfertigung mit einem Fassungsvermögen von 0,6 l, einer Heizleistung von 3kW einem Temperaturbereich von bis zu 350 °C und einem Druckbereich von 0 bis 350 bar.

3.4 Signalauswertung

3.4.1 Kapazitive Sensoren

Zur Aufnahme und zum Auswerten der Signale der kapazitiven Sensoren wurde ein Arduino UNO Board mit Zusatzelektronik (Arduino Microcontroller Board und AD7745 ASIC Evaluation Board von Analog Devices) zum Messen von Kapazitäten und Temperatur vom Hersteller Proton Mikrotechnik verwendet. Die dazugehörige Software stammte ebenfalls von diesem Hersteller. Die Datenaufzeichnung erfolgte über die Terminalsoftware HTerm.

3.4.2 Piezowiderstandsdrucksensoren

Zur Aufnahme und zum Auswerten der Signale der Piezowiderstandsdrucksensoren wurde ein Demo Board der Firma Elmos verwendet. Die zugehörige Software ist Elmos Calibration Control.

3.5 Wärmeschrank

Zum Aushärten des Harzes zur Herstellung einer Verbindung zwischen Kabel und Piezodrucksensor wurde ein Sicherheitstrockenschrank vom Typ FDL 115 der Firma BINDER GmbH verwendet. Das Gerät hat eine Nennleistung von 2,90 kW, eine Nenntemperatur von 300 °C und einen Innenraum von 0,115 m³.

4 Experimentelles

4.1 Kapazitive Sensoren

Folgende Materialien wurden bei der Durchführung der Versuche mit kapazitiven Sensoren verwendet:

Sensor:	Proton Mikrotechnik E1.3N mit Keramikgehäuse
Kabel:	Vishay Measurements Group GmbH SDC-36T-1B
Auswertung:	Analog Devices AD7745 ASIC Arduino Uno
Prepreg:	Airpreg PY 2843
Kern:	Aramidverstärktes Papier, Hexagonwabenform 5mm Höhe
Presswerkzeug:	Aluminiumplatten; Abstandhalter 5mm Höhe

Zwei Kabel von der Länge von 31 ± 1 cm wurden von Hand verdrillt. Ein Ende wurde mittels Lötzinn mit dem Sensor verbunden. Am anderen Ende wurde das verdrillte Kabel mit dem AD7745 verlötet. Im von Proton zur Verfügung gestellten Programm wurde CAP_DAC_A in Programmzeile 47 mit B11111111 festgelegt. Je nach Kabellänge sollte sich ein Kapazitätsoffset von 17,2 bis 18,5 pF einstellen. Dieser Wert schwankt recht stark abhängig von Kabelgeometrie und wie stark die Kabel zusammengepresst sind. Der Sensor mit Kabel und Board ist in Abbildung 4.1 zu sehen.

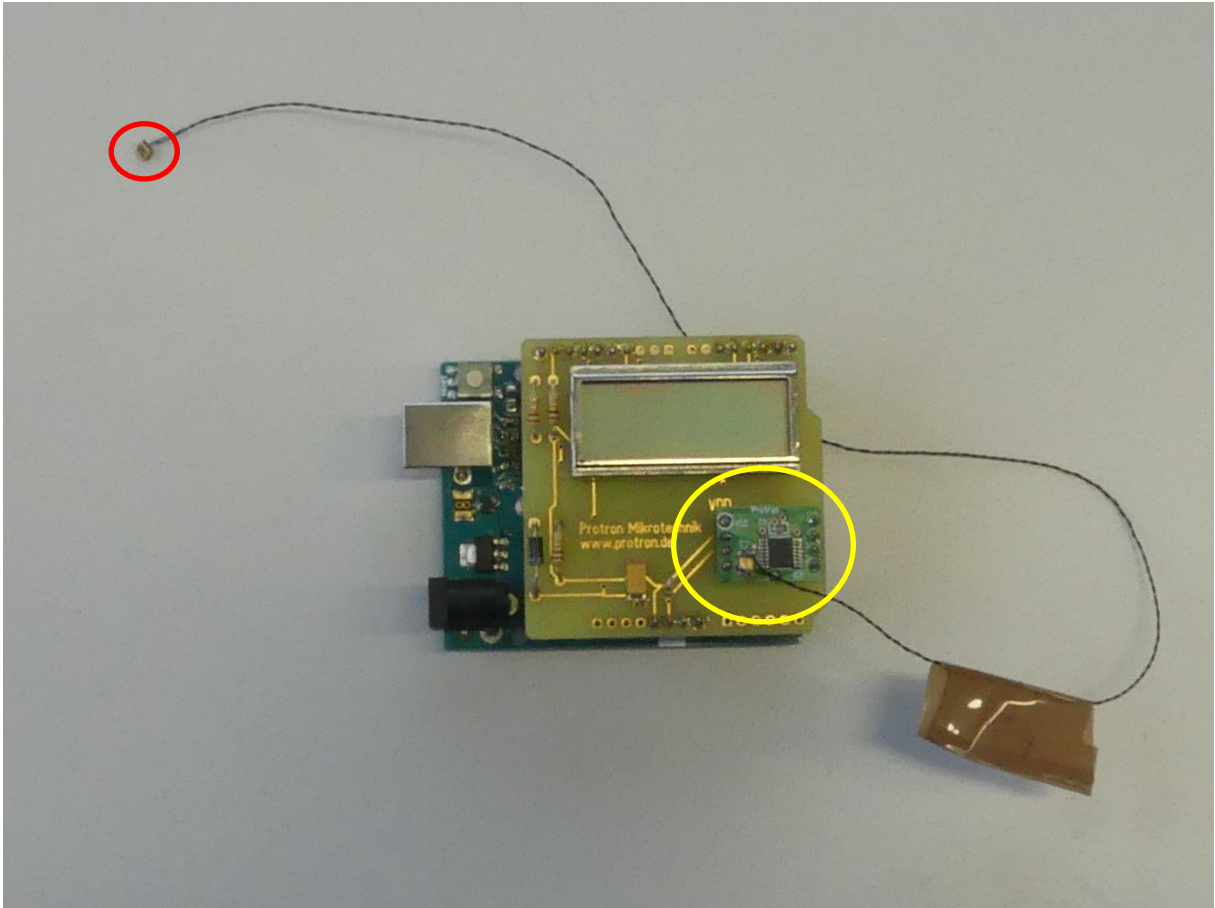


Abb. 4.1: Sensor (rot eingekreist) mit Kabel und Board mit AD7745 ASIC (gelb eingekreist)

Das Board wurde mittels USB-Kabel mit dem Computer verbunden. Die Datenerfassung erfolgte mittels HTerm 0.8.1beta Software.

Anschließend wurde der Sensor in den Versuchsverbund eingebracht. Dazu wurde der Sensor mit dem Kabel auf das untere Prepreg gelegt. Aus dem Kern wurde in der Mitte ein dreistrahliges Verbindungsstück herausgeschnitten, sodass drei angrenzende Waben verbunden wurden. Der Kern wurde dann so platziert, dass der Sensor in der vergrößerten Wabe Platz fand. Das Kabel wurde zwischen unterem Prepreg und Wabenkern eingeklemmt. Darüber kam das obere Prepreg. Die Abmessungen des Aufbaus betragen 100×100 mm. Die Höhe war 5 mm. Der Sensor befand sich in der Mitte des Aufbaus in 50×50 mm. Der Kern mit Deckschicht ist in Abbildung 4.2 zu sehen.

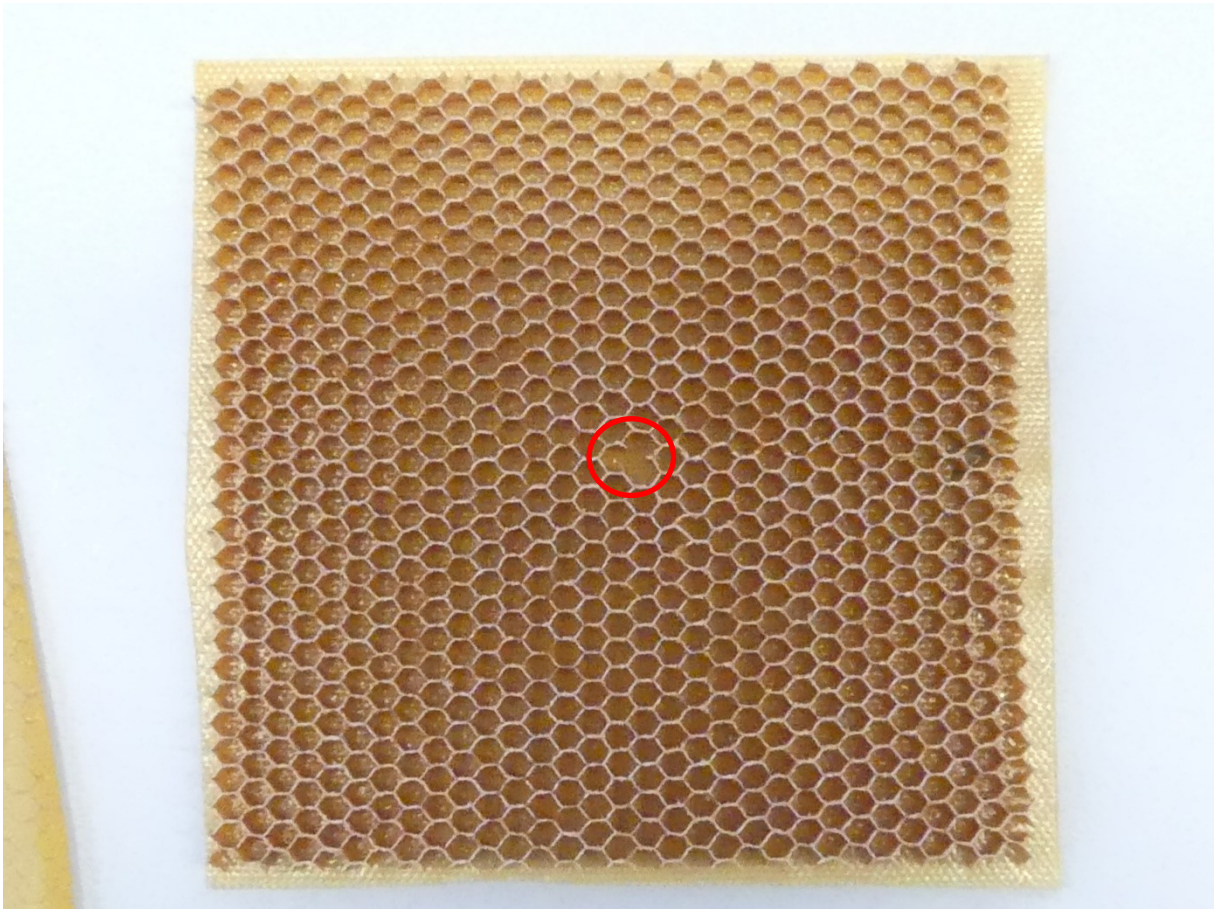


Abb. 4.2: Kern mit Deckschicht; der Sensor wird innerhalb der roten Markierung platziert

Zur Messung des grundlegenden Offsets wurde eine direkte Verbindung in der Verbundebene vom Zentrum wo der Sensor platziert wurde zur Umgebungsatmosphäre hergestellt, indem die Wände zwischen den Waben herausgeschnitten wurden. Das Kabel wurde dabei gegenüberliegend dem Kanalverlauf geführt. Dieser Aufbau ist in Abbildung 4.3 zu sehen.

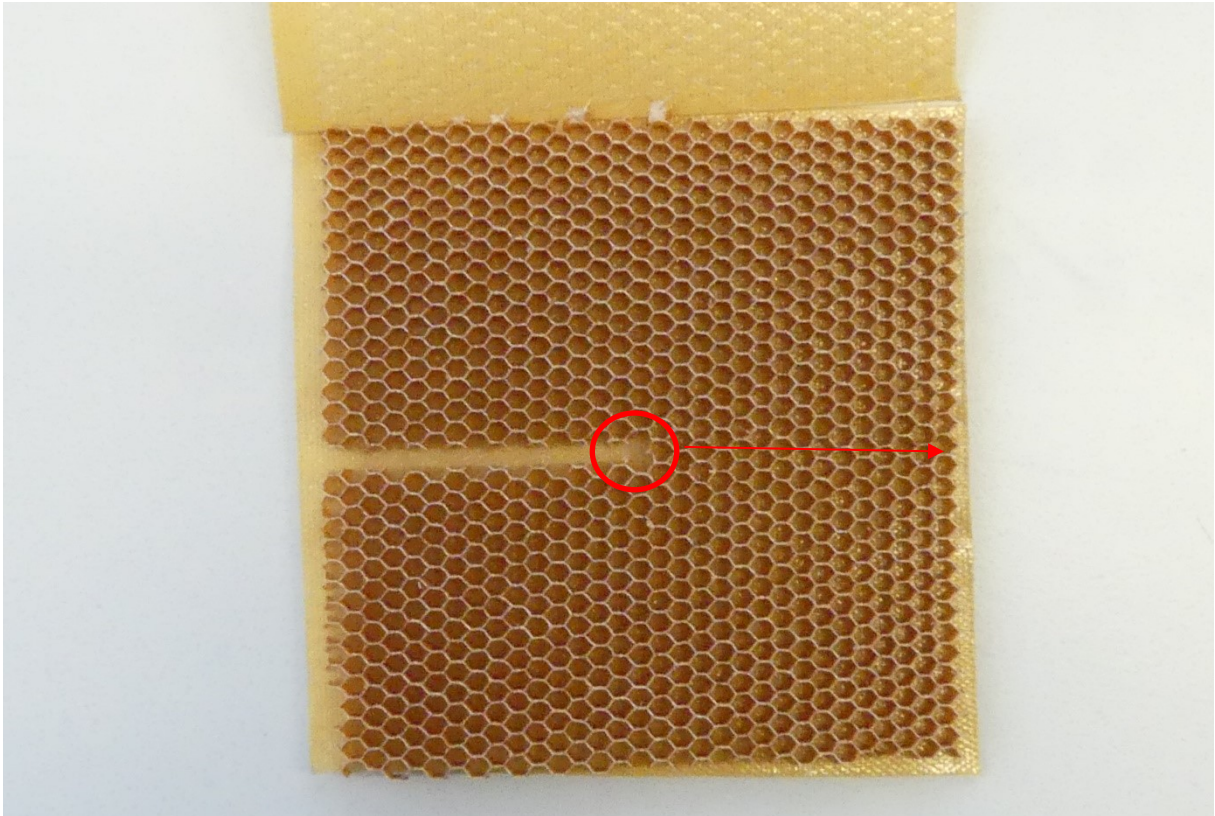


Abb. 4.3: Kern für Offsetmessung; der Sensor wird innerhalb der roten Markierung platziert, das Kabel wird entlang des roten Pfeils geführt

Dieser Aufbau (Prepreg, Kern mit Sensor und Kabel, Prepreg) wurde anschließend oben und unten mit Antihaffolie bedeckt und dann in die Presse gegeben. Dabei wurde der Verbundaufbau auf die untere Aluminiumplatte gelegt. Anschließend wurde die obere Aluminiumplatte manuell daraufgelegt und die Presse geschlossen. Platzhalter zwischen den Platten von 5 mm Höhe verhinderten ein Kollabieren des Kerns. Das Board war außerhalb der Presse neben dem Werkzeug.

Die Presse fuhr folgendes Programm:

Die Temperatur betrug 155 °C, die Presskraft betrug 100 N, die Pressdauer betrug 22 Minuten, während dieser die Kraft entweder konstant gehalten wurde, oder mit einem Programm gefahren wurde, wo nach dem Schließen die Presse 3-mal im Abstand von 30 Sekunden für 10 Sekunden geöffnet wurde. Die Aluminiumplatten wurden vorher vorgeheizt.

4.2 Piezowiderstandssensoren

Folgende Materialien wurden bei der Durchführung der Versuche mit Piezowiderstandssensoren verwendet:

Sensor:	Merit Sensor J-Series J1PH-105-VT
Kabel:	Vishay Measurements Group GmbH SDC-36T-1B
Kleber:	Polytec EC 101
Auswertung:	Elmos Demo Board
Prepreg:	Airpreg PY 2843
Kern:	Aramidverstärktes Papier, Hexagonwabenform 5mm Höhe
Presswerkzeug:	Aluminiumplatten; Abstandhalter 5mm Höhe

Der Sensor an den Kontakten wurde mit insgesamt 5 kurzen Drahtstücken verklebt. Der Kleber vom Typ Polytec EC 101 wurde in einem Wärmeschrank bei 130 °C für 15 Minuten ausgehärtet. Acht Kabel von der Länge von 60 cm wurden jeweils an einem Ende mit einer Muffe versehen. Vier dieser Kabel wurden mittels Lötzinn mit den Kontakten am Demo Board verlötet. Die anderen Enden wurden an eine Klemme angeschlossen. Die anderen 4 Kabel wurden mit den Drahtstücken am Sensor verlötet, wobei die Drahtstücke an den Kontakten 3 und 5 mit demselben Kabel verlötet wurden. Anschließend wurden die mit dem Sensor verbundenen Kabel ebenfalls an der Klemme eingespannt, um die richtige Verbindung zwischen Sensor und Board herzustellen. Das Board wurde mittels USB-Kabel mit dem Computer verbunden. Die Datenerfassung erfolgte mittels Elmos Calibration Control Software. Der Sensor ist in Abbildung 4.4, die Klemme in Abbildung 4.5 und das Board in Abbildung 4.6 zu sehen.

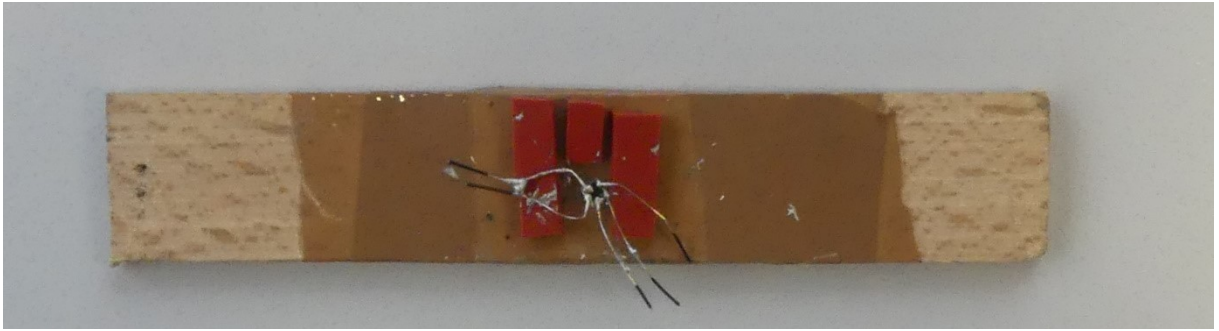


Abb. 4.4: Nichtverbundener Piezowiderstandssensor

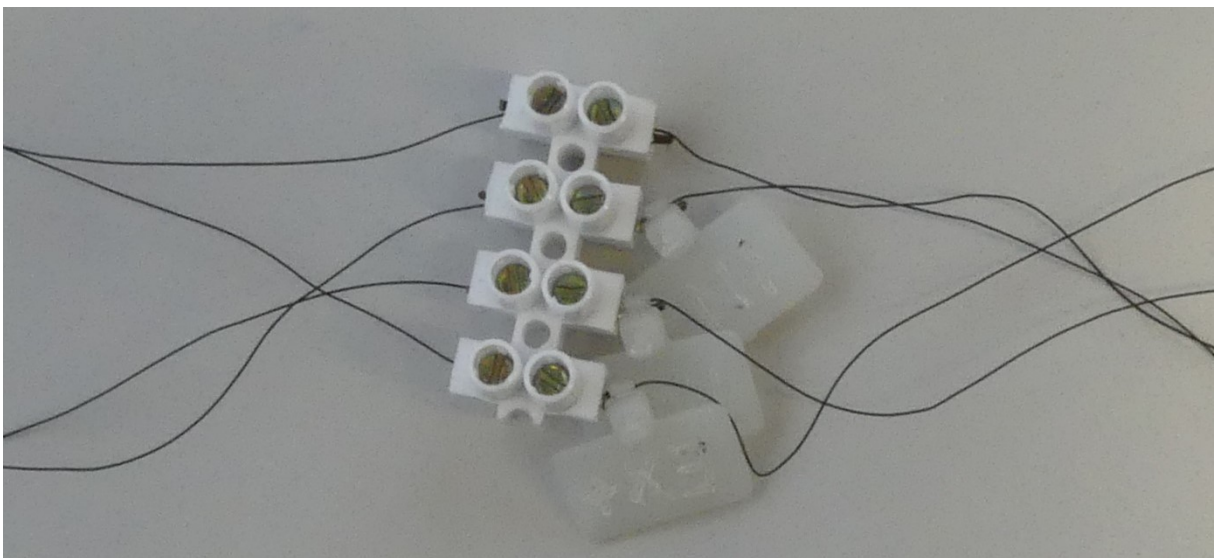


Abb. 4.5: Klemme zur Verbindung von Sensor und Board

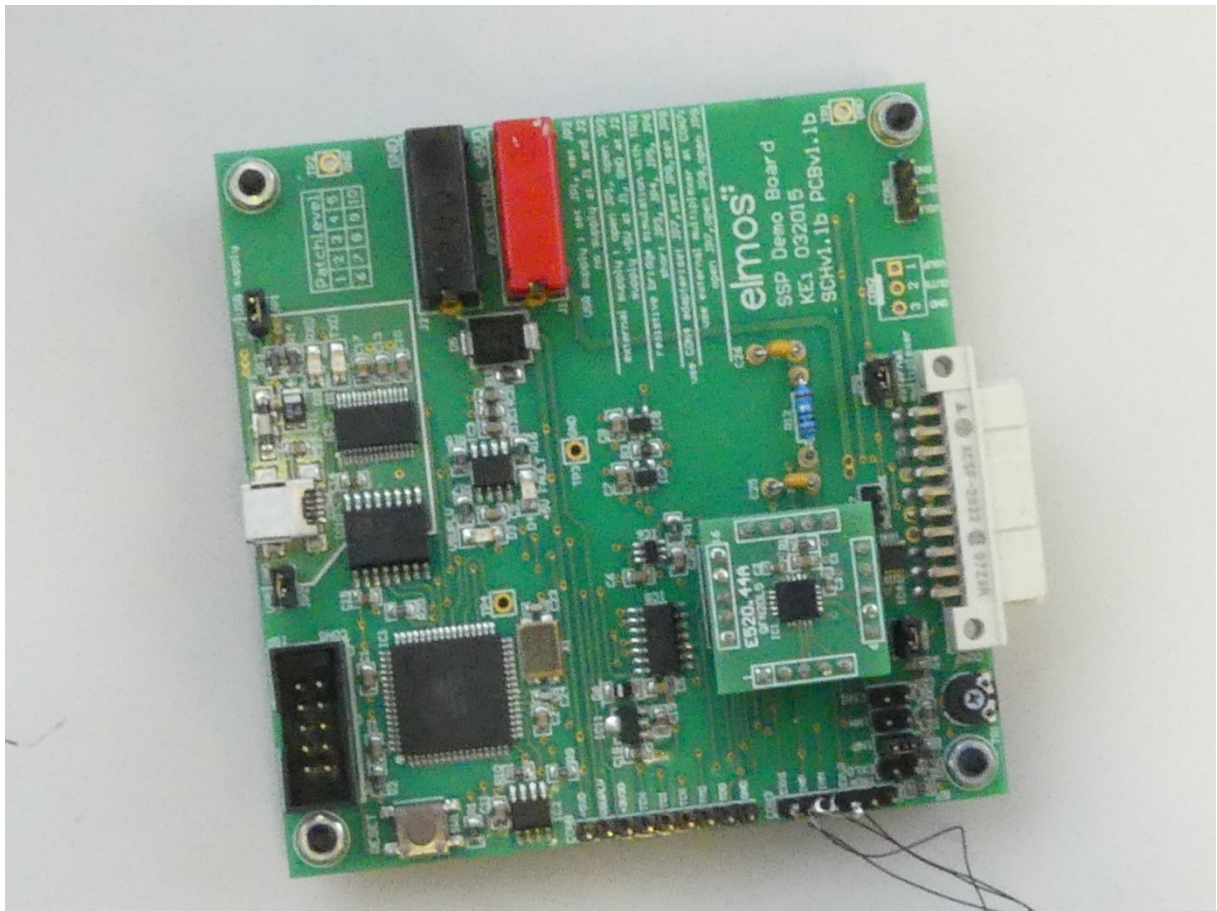


Abb. 4.6: Elmos Demo Board

Anschließend wurde der Sensor in den Versuchsverbund eingebracht. Dazu wurde der Sensor mit dem Kabel auf den Kern gelegt. Aus dem Kern wurde in der Mitte ein dreistrahliges Verbindungsstück herausgeschnitten, sodass drei angrenzende Waben verbunden wurden. Das Kabel wurde zwischen oberem Prepreg und Wabenkern eingeklemmt. Darüber kam das obere Prepreg. Die Abmessungen des Aufbaus betragen 100×100 mm. Die Höhe war 5 mm. Der Sensor befand sich in der Mitte des Aufbaus in 50×50 mm. (Messung des Wabeninnendrucks)

Dieser Aufbau (Prepreg, Kern mit Sensor und Kabel, Prepreg) wurde anschließend oben und unten mit Antihaffolie bedeckt und dann in die Presse gegeben. Dabei wurde der Verbundaufbau auf die untere Aluminiumplatte gelegt. Anschließend wurde die obere Aluminiumplatte manuell daraufgelegt und die

Presse geschlossen. Platzhalter zwischen den Platten von 5 mm Höhe verhinderten ein Kollabieren des Kerns. Das Board war außerhalb der Presse neben dem Werkzeug.

Die Presse fuhr folgendes Programm:

Die Temperatur betrug 155 °C, die Presskraft betrug 100 N, die Pressdauer betrug 22 Minuten, während dieser die Kraft konstant gehalten wurde. Die Aluminiumplatten wurden vorher vorgeheizt.

4.3 Kalibrierung

Zur Kalibrierung der Sensoren wurde ein Autoklav verwendet. Bei diesem Gerät ist die Kammer ein vertikaler Zylinder, welche mit einem Deckel über acht Schraubmuttern verschlossen wird. Zwischen Deckel und die Kammer gibt es im geschlossenen Zustand keine Möglichkeit das Kabel mit dem Sensor in die Kammer zu geben. Um dies dennoch zu erreichen wurden zwischen Kammer und Deckel zwei Dichtungsringe aus Gummi eingefügt, wobei das Sensorkabel zwischen diesen Dichtungsringen geführt wurde. Der Sensor selbst hing frei innerhalb der Kammer. Für die Herstellung des Innendrucks wurde eine Stickstoffgasflasche verwendet. Die Dichtungsringe sind in Abbildung 4.7 zu sehen.

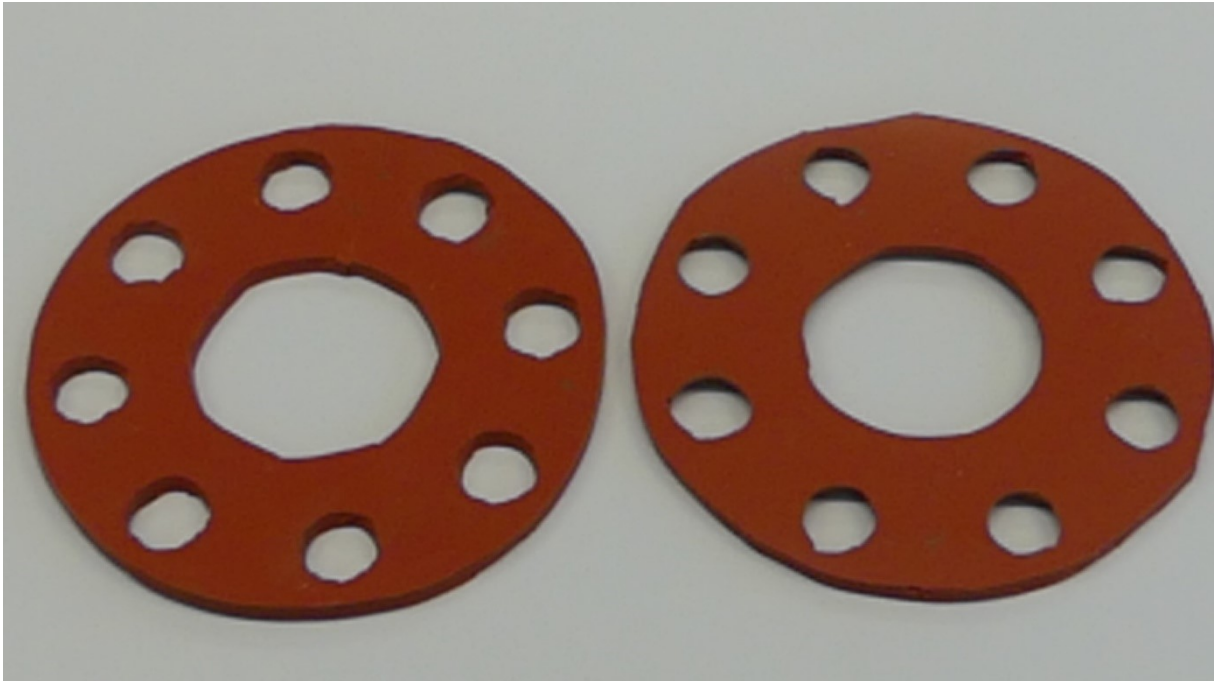


Abb. 4.7: Dichtringe

Für die Kalibrierung selbst wurden mehrere Druckkurven bei unterschiedlichen Temperaturen und mit unterschiedlichen Kabellängen gefahren. Die Druckkurven wurden von Atmosphärendruck (1 bar) bis 3 bar in 0,1 bar Inkrementen gefahren. Das Messsignal bei diesen Inkrementen wurde notiert um anschließend die Druck/Kapazitätskurven zu bestimmen. Die Temperaturkurven wurden bei 23, 60, 110 und 160 °C bestimmt. Hierbei sei zu erwähnen, dass der Autoklav selbst nur bedingt in der Lage ist, die Temperatur zu regeln, wodurch die Temperatur während der Messung über die nominell angegebene Temperatur anstieg und somit die Ergebnisse beeinflusst wurden. Desweiterem ist auch zu erwähnen, dass die Einstellung des Druckes aufgrund der Sensorik des Autoklaven und der vorhandenen Leckage zwischen den eingefügten Dichtringen nicht ganz genau eingestellt werden konnte. Desweiterem ist die Sensorik des Autoklaven darauf ausgelegt Referenzdrücke zu messen, wobei der Atmosphärendruck, welcher tatsächlich ca. 0,98 bar betrug, als Nullpunkt angesehen wird, wo hingegen die Sensoren, die es zu kalibrieren gilt, Absolutdruck messen. Es wurden Versuche unternommen, diese Diskrepanzen manuell auszugleichen.

Aus diesen Kurven wurde dann eine Umrechnungsformel entwickelt, welche es ermöglicht, die Kapazitätssignale des Sensors in Drucksignale umzurechnen.

5 Ergebnisse und Diskussion

5.1 Kalibrierung der kapazitiven Sensoren

Die Kalibrierung der kapazitiven Sensoren fand zeitlich gesehen in der Mitte der Experimente mit den selbigen Sensoren statt. Dabei wurden 3 verschiedene Sensoren verwendet. Diese Sensoren wurden mit den Nummern 5, 6 und 9 benannt. Bei den Sensoren 7 und 8 traten während des Prozesses Schwierigkeiten mit dem Board auf, woraufhin das Board eine Kapazität von 24,92 pF anzeigte, was dem maximal messbaren Wert entspricht. Dies ist üblicherweise ein Indikator dafür, dass die Verbindung zwischen den Lötstellen auf dem Evaluation Board kurzgeschlossen ist. Für die Sensoren 7 und 8 wurden Versuche unternommen, diesen Fehler zu beheben, allerdings ist dieses Vorhaben während der Kalibrierung nicht gelungen.

Die Kalibrierung der kapazitiven Sensoren ergab folgende Druck/Kapazitätskurven:

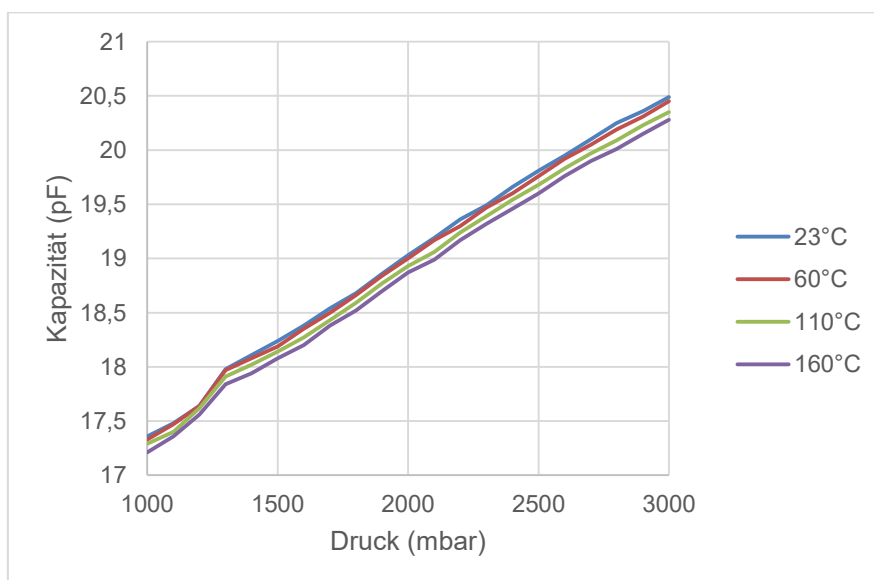


Abb. 5.1: Kalibrierung der Sensoren von Proton Mikrotechnik, Sensor 5

Bei diesen Messkurven ist schön zu sehen, dass bei einem Druck von 1300 mbar eine Änderung des Druck-Kapazitätsverhaltens stattfindet. Dies entspricht einem Wechsel der Funktionsweise des Sensors von normalem Modus bei einem Druck von weniger als 1300 mbar in den Berührungsmodus bei höheren Drücken. Desweiterem kann man erkennen, dass die Kapazitätswerte bei gleichen Druck mit höherer Temperatur sinken.

Für Sensor 6 sehen die Kurven ähnlich aus.

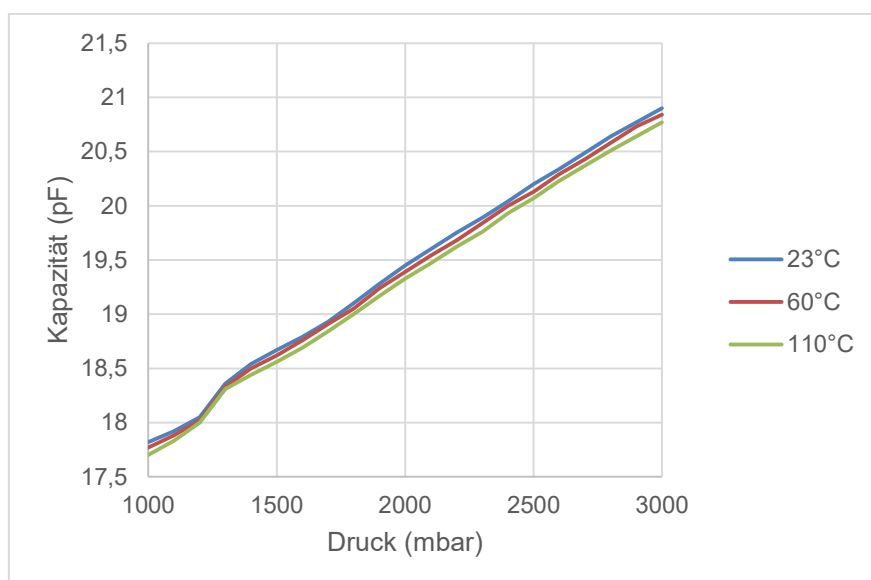


Abb. 5.2: Kalibrierkurven von Sensor 6

Bei Sensor 6 ist anzumerken, dass eine Kabellänge von ca. 31,5 cm verwendet wurde im Vergleich zur Kabellänge von 30,5 cm bei Sensor 5. Dadurch hat sich ein höheres Grundoffset eingestellt. Desweiterem wurde bei dem Versuch die Temperatur von 110 °C auf 160 °C zu erhöhen die Kabelverbindung beschädigt, wodurch der Kalibrierungsvorgang abgebrochen werden musste. Nach der Erneuerung des Kabels hat sich bei Sensor 6 dasselbe Problem ergeben wie bei den Sensoren 7 und 8, wodurch der Versuch eine Kalibrierkurve bei 160 °C mit Sensor 6 zu messen aufgegeben wurde.

Ein Versuch die Druck-Kapazitätskurve bei 160 °C zu reproduzieren wurde mit Sensor 9 durchgeführt.

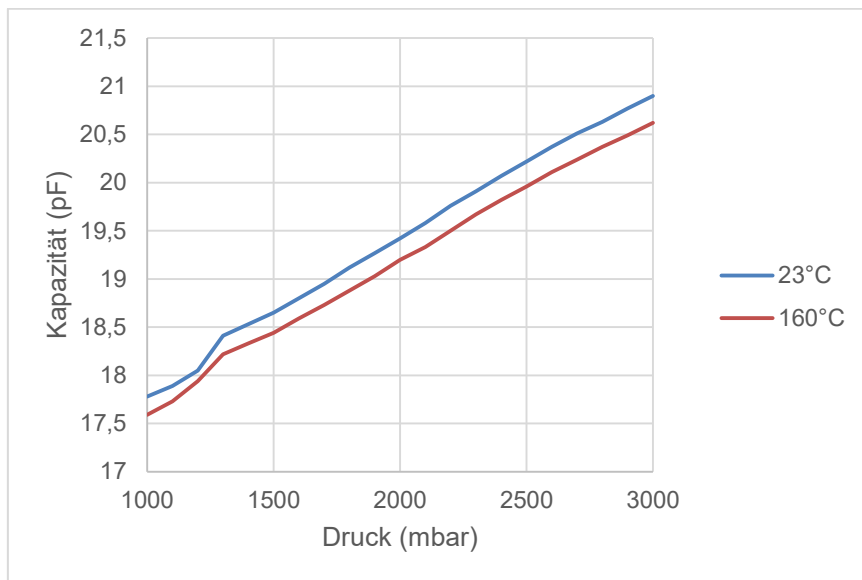


Abb. 5.3: Kalibrierkurven von Sensor 9

Bei gleicher Temperatur können die offsetbereinigten Messkurven der einzelnen Sensoren gegenübergestellt werden. Um dies zu tun werden die Messkurven durch Subtraktion des Kapazitätswertes bei Atmosphärendruck (1000 mbar) zum Nullpunkt verschoben. Es ergeben sich dadurch folgende Diagramme.

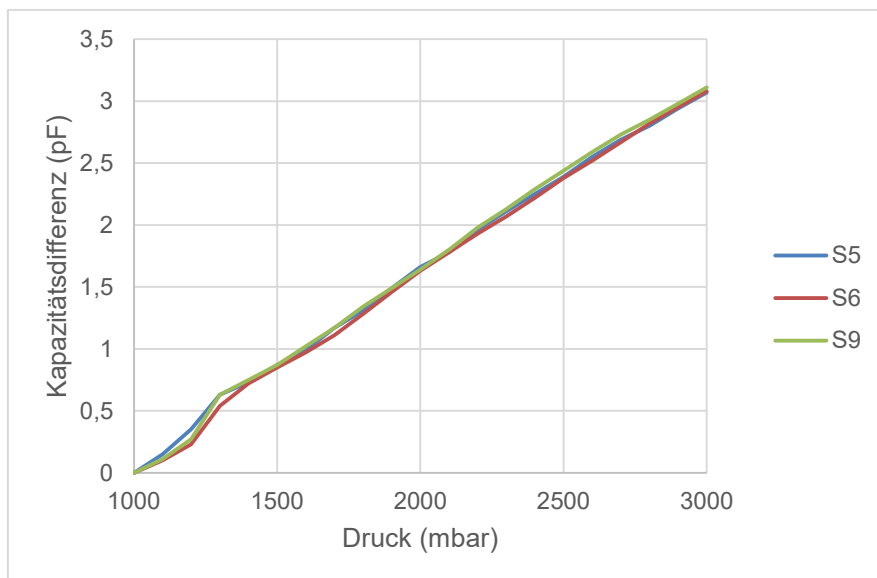


Abb. 5.4: Gegenüberstellung der offsetbereinigten Messkurven bei 23 °C

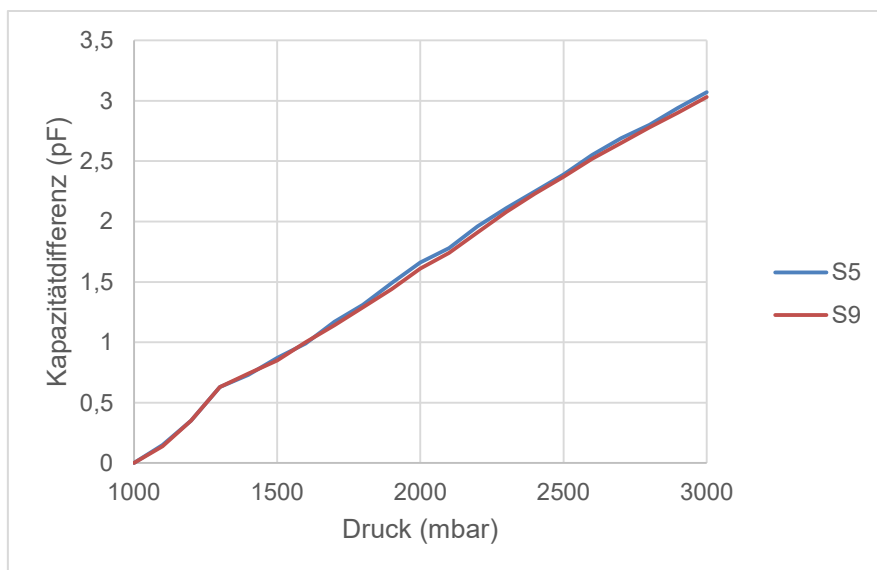


Abb. 5.5: Gegenüberstellung der offsetbereinigten Messkurven bei 160 °C

Da sich die Kurven in den Abbildungen 5.4 und 5.5 jeweils erstaunlich gut decken kann davon ausgegangen werden, dass dieses Verfahren der Offsetbereinigung generell für diesen Sensortyp angewandt werden kann.

Mit Hilfe dieser ermittelten Kalibrierungskurven kann nun eine Methode entwickelt werden, mit der man beliebige Kapazitätssignale des Sensors in Druckwerte umrechnen kann. Hierbei müssen folgende Fakten beachtet werden:

- Der Sensor ändert sein Druck-Kapazitätsverhalten bei einem Druck von 1300 mbar. Die hat zur Folge, dass für die beiden Bereiche unterschiedliche Berechnungsformeln gelten.
- Die Formeln müssen ein Kapazitätssignal in entsprechende Druckwerte umrechnen.
- Das Grundoffset der Sensor-Kabelkonfiguration hängt stark von der Kabelgeometrie ab. Es macht keinen Sinn, die Umrechnungsformel für jeden Offsetwert einzeln zu berechnen.

Die Umrechnung von Kapazität in Druck erfolgt je nach Druckbereich mit unterschiedlichen Formeln. Laut Hersteller entspricht das Verhalten des Sensors bei Drücken von weniger als 1300 mbar einem kubischen Polynom. Bei Drücken von über 1300 mbar wird das Verhalten als linear angenommen. Es ist hierbei zu beachten, dass die Formeln gemessene Kapazitätswerte in Druck umrechnen, also das in Abbildung 5.6 gezeigte Verhalten nachbilden müssen.

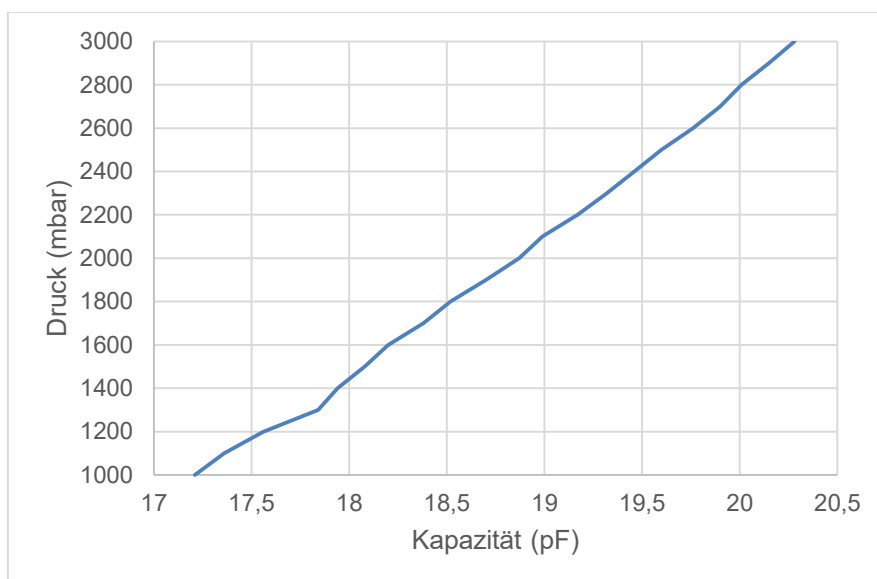


Abb. 5.6: Messkurve Sensor 5 bei 160 °C, Druck über Kapazität

Um eine allgemein gültige Umrechnungsformel für das Verhalten des Sensors zu finden muss die Kapazität vom Offset bereinigt werden in diesem Fall wird für das Offset immer angenommen, dass dieses dem Kapazitätswert bei einem Druck von 1000 mbar entspricht. Die offsetbereinigte Messkurve von Sensor 5 bei 160 °C ist in Abbildung 5.7 zu sehen.

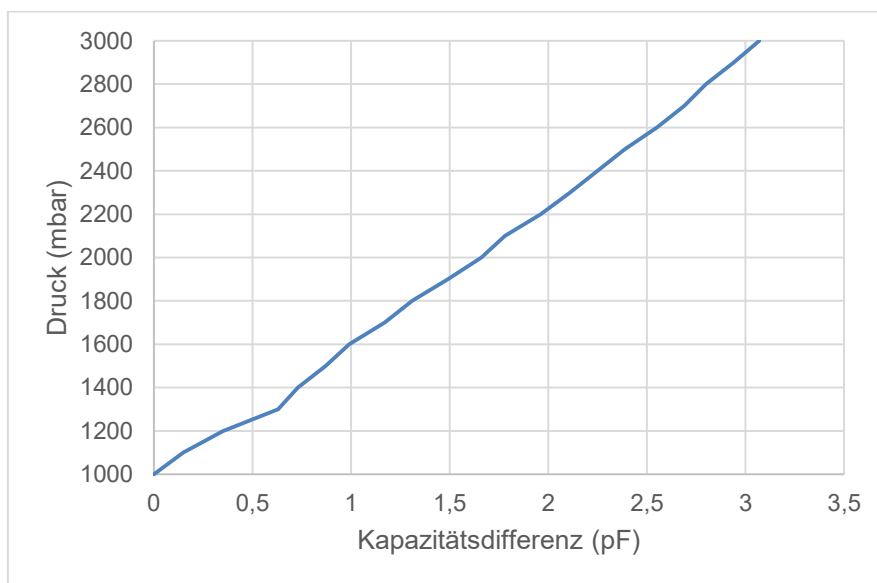


Abb. 5.7: Messkurve Sensor 5 bei 160 °C, Druck über Kapazitätsdifferenz zum Offset

Bei Drücken von bis zu 1300 mbar, was einer Kapazitätsdifferenz von 0,63 pF bei 160 °C entspricht, verhalten sich Druck und Kapazität des Sensors laut folgender Formel.

$$p = d + a * \Delta C + b * \Delta C^2 + c * \Delta C^3 \quad 5.1$$

Hierbei ist p der Druck dem der Sensor ausgesetzt ist, ΔC ist die Differenz der Kapazität des Messsignales des Sensor und der Offsetkapazität. Die Parameter a , b , c und d sind in diesem Fall unbekannt und müssen aus der gemessenen Kurve

errechnet werden. Um diese Parameter zu berechnen benötigt man ein Gleichungssystem mit vier Gleichungen.

$$p_0 = d + a * \Delta C_0 + b * \Delta C_0^2 + c * \Delta C_0^3 \quad 5.2$$

$$p_1 = d + a * \Delta C_1 + b * \Delta C_1^2 + c * \Delta C_1^3 \quad 5.3$$

$$p_2 = d + a * \Delta C_2 + b * \Delta C_2^2 + c * \Delta C_2^3 \quad 5.4$$

$$p_3 = d + a * \Delta C_3 + b * \Delta C_3^2 + c * \Delta C_3^3 \quad 5.5$$

Die Werte für die Drücke und Kapazitätsdifferenzen sind in untenstehender Tabelle angegeben:

Index	p in mbar	ΔC in pF
0	1000	0
1	1100	0,145
2	1200	0,35
3	1300	0,63

Tabelle 5.1: Drücke und Offsetbereinigte Kapazitäten bei 160 °C

Eingesetzt in obiges Gleichungssystem, ergeben sich für die einzelnen Parameter folgende Formeln:

$$d = 1000 \quad 5.6$$

$$c = \frac{1300-d}{0,63*(0,63-0,145)*(0,63-0,35)} + \frac{(1200-d)*(0,145-0,63)}{0,35*(0,35-0,145)*(0,63-0,35)*(0,63-0,145)} + \frac{1100-d}{0,145*(0,63-0,145)*(0,35-0,145)} \quad 5.7$$

$$b = \frac{\frac{1200-d}{0,35} - \frac{1100-d}{0,145}}{0,35-0,145} - c * (0,145 + 0,35) \quad 5.8$$

$$a = \frac{1100-d}{0,145} - b * 0,145 - c * 0,145^2 \quad 5.9$$

Hieraus lassen sich die Werte für die Parameter a, b, c und d berechnen. Sie sind in untenstehender Tabelle aufgelistet.

Parameter	Wert
a	798,034305
b	-818,172118
c	487,791902
d	1000

Tabelle 5.2: Parameter für die Umrechnung von Kapazität in Druck bei niedrigen Drücken und einer Temperatur von 160 °C

Bei Drücken von über 1300 mbar, entsprechend einer Kapazitätsdifferenz größer als 0,63 pF, gilt im Falle der Annahme von linearem Verhalten die folgende Formel.

$$p = e + k * \Delta C \quad 5.10$$

Hierbei ist wie schon oben p der Druck und ΔC die Differenz von gemessener Kapazität und Offsetkapazität. In diesem Fall sind die Parameter e und k zu berechnen. Dies erfolgt durch Lösen von folgendem Gleichungssystem:

$$p_0 = e + k * \Delta C_0 \quad 5.11$$

$$p_1 = e + k * \Delta C_1 \quad 5.12$$

Die Werte für die Drücke und Kapazitätsdifferenzen sind in untenstehender Tabelle angegeben:

Index	p in mbar	ΔC in pF
0	1300	0,63
1	3000	3,05

Tabelle 5.3: Drücke und Offsetbereinigte Kapazitäten bei 160 °C

Wenn man diese Werte in obiges Gleichungssystem einsetzt ergibt sich folgendes.

$$k = \frac{3000-1300}{3,05-0,63} \quad 5.13$$

$$e = 1300 - k * 0,63 \quad 5.14$$

Die Werte für die Parameter k und e sind in untenstehender Tabelle angeführt.

Parameter	Wert
k	702,527322

e	857,407787
---	------------

Tabelle 5.4: Parameter für die Umrechnung von Kapazität in Druck bei hohen Drücken und einer Temperatur von 160 °C

5.2 Ergebnisse der Experimente mit kapazitiven Sensoren

5.2.1 Offsetmessungen

Ziel der Offsetmessungen war es, die Gesamtheit aller Störsignale zu messen, um diese von dem Signal unterscheiden zu können, welches rein vom Innendruck der Zelle hervorgerufen wird. Um dies zu tun, wurde eine Möglichkeit des ständigen Druckausgleichs zwischen Zelle mit Sensor und der Atmosphäre innerhalb der Presse hergestellt. Aufgrund der Pressplattenkonfiguration befand sich der Sensor daher immer unter Atmosphärendruck, wodurch jegliche gemessene Kurve durch andere Einflüsse auf das Messsignal verursacht werden musste. Solche Einflüsse sind beispielsweise das Drücken des Kerns auf das Kabel beim Schließen der Presse. Die Setupdaten sind in der Tabelle 5.5 angeführt.

Sensor	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
2	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11111111	17,50 pF
8	31,0 cm	22 min konst.	21 °C	B11111111	17,92 pF
10	30,5 cm	22 min 3x öff.	23 °C	B11001111	16,12 pF

Tabelle 5.5: Setupdaten für die Messungen des Offsets

Die Messkurven für die Offsetmessungen sind in Abbildung 5.8 dargestellt.

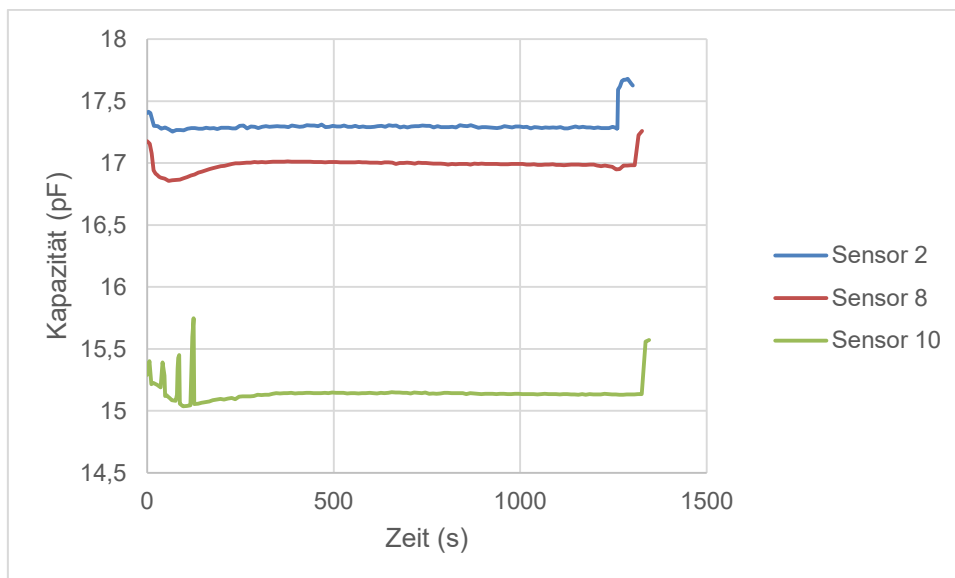


Abb. 5.8: Experimente für das Messen der Offsetkurven, Sensoren 2, 8 und 10

Die Offsetmessung für Sensor 2 wurde unmittelbar nach der ersten Signalmessung für Sensor 2 durchgeführt. Aus der Kurve lässt sich erkennen, dass bei Schließen der Presse die Kapazität fällt und dann relativ konstant bleibt, bis die Presse wieder geöffnet wird. Dadurch wird in weiterer Folge die Annahme getroffen, dass bei allen Messungen, die vor dem Bestimmen der Kalibrierkurven getätigt wurden, das Offset gleich dem Messwert direkt beim Schließen der Presse ist. Nach dem Kalibriervorgang wurden weitere Offsetmessungen vorgenommen, weil bei den Messkurven von den Sensoren 10 bis 13 obige Annahme zu Drücken kleiner als der Atmosphärendruck führte. Für diese Messkurven werden die Offsetkurven, welche mit den Sensoren 8 und 10 gemessen wurden, verwendet um die Offsetbereinigung des Signals durchzuführen.

5.2.2 Messkurven Sensor 1

Mit Sensor 1 wurden 2 Messungen durchgeführt, wobei man sagen muss, dass die erste Messung eigentlich als Offsetmessung gedacht wurde, allerdings während der Einlage des Versuchssetups in die Presse der Sensor von seiner

eigentlichen Position verrutscht ist und sich während des Pressens in einer Einzelzelle befand. Die Setupdaten sind in folgender Tabelle angeführt. CAP_DAC_A beschreibt hierbei die Einstellung des Messbereichs beim Board. Das Sensoroffset beschreibt die gemessene Kapazität des freiliegenden Sensors ohne den Sandwichaufbau. Diese Kapazität ist stark von der Geometrie des Kabels abhängig und schwankt darum recht stark. In diesem Fall ist dies die Kapazität des Sensors wenn das Kabel möglichst gerade ist. Desweiterem ist der hier angegebene Wert nicht mit dem Sensoroffset identisch, welcher ermittelt wird um den Zelleninnendruck zu berechnen.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	32,5 cm	24 min konst.	23 °C	B11111111	21,00 pF
2	32,5 cm	22 min konst.	24 °C	B11111111	18,67 pF

Tabelle 5.6: Setupdaten für Experimente mit Sensor 1

Bei der Messung wurden etwa 4 Messwerte pro Sekunde aufgezeichnet. Desweiterem erfolgte eine Aufzeichnung der den Messwerten zugehörigen Zeitstempel. Aufgrund des unhandlichen Speicherformates für diese Messwerte mit Zeitstempel wurden die Messkurven manuell auf ein Datenvolumen von einem Messwert pro 10 Sekunden reduziert. Die Messkurven für diese reduzierte Datenmenge für diesen Sensor sind in Abbildung 5.9 unten abgebildet.

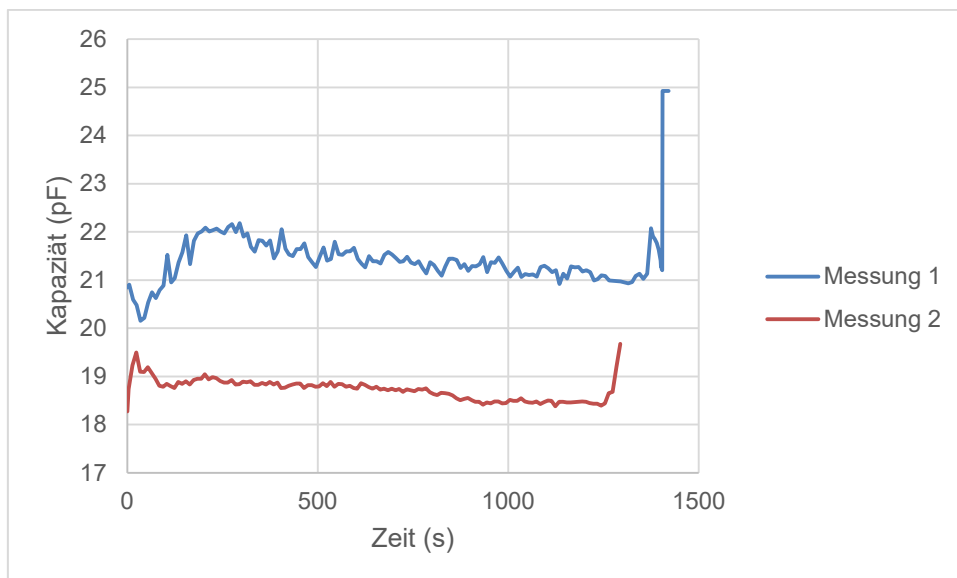


Abb. 5.9: Experimente mit Sensor 1, Messungen 1 und 2; Messkurven

5.2.3 Messkurven Sensor 2

Bei Sensor 2 wurde ähnlich vorgegangen wie bei Sensor 1, nur dass es zu keinerlei Verrutschen der Sensoren während der Messung kam. Bezüglich CAP_DAC_A und Sensoroffset gilt das Gleiche wie bei Sensor 1. Die Setupdaten sind in Tabelle 5.7 angeführt.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11111111	17,90 pF
2	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11111111	17,90 pF
3	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11010000	17,00 pF

Tabelle 5.7: Setupdaten für Experimente mit Sensor 2

Die Messdaten für die Experimente mit Sensor 2 sind unten in Abbildung 5.10 zu sehen. Die Daten wurden wie die für Sensor 1 aufbereitet. Desweiterem sind die

Messkurven für Sensor 2 ein deutlicher Indikator für das grundlegendste Problem mit der Messung, ein Mangel an Reproduzierbarkeit.

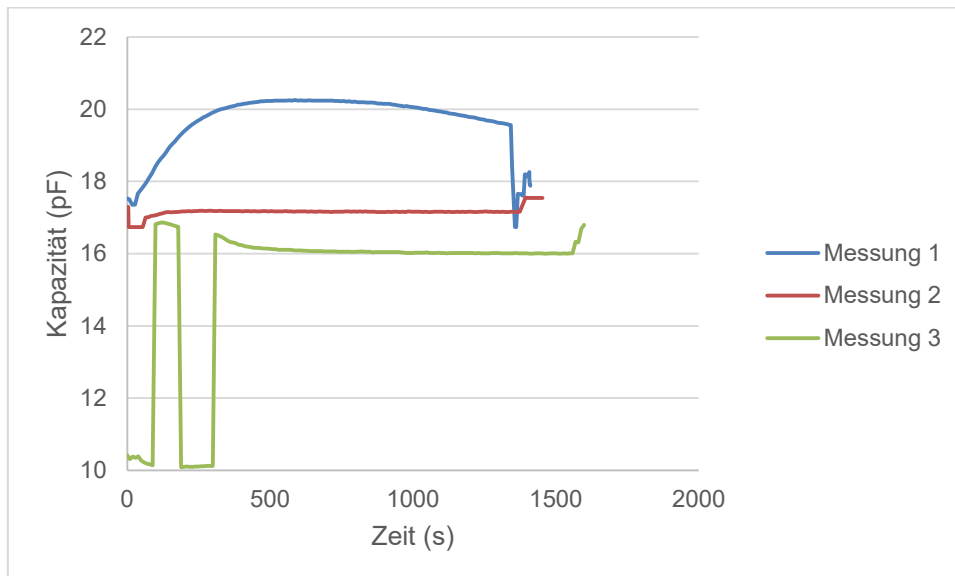


Abb. 5.10: Experimente mit Sensor 2, Messungen 1, 2 und 3; Messkurven

Wie schön zu sehen ist, sind die Kurven extrem verschieden, obwohl der Versuchsaufbau für die einzelnen Messungen möglichst gleich gehalten wurde. Messung 1 entspricht dem, was man sich erwarten würde. Ein kurzer Abfall der Kapazität unmittelbar nach starten der Messung aufgrund der steigenden Temperatur innerhalb der Zelle mit dem Sensor und dem anschließenden Schließen der Presse, gefolgt von einem starken Anstieg der Kapazität durch Zunahme des Zelleninnendruckes, hervorgerufen durch die Aushärtung des Harzes der Prepreg-Lagen. Die Abnahme des Druckes im späteren Verlauf der Messung lässt sich an dieser Stelle mit einem Druckausgleich entlang des Kabels und generellen Diffusionsvorgängen erklären. Das Problem kommt bei Messung 2. Hier fiel die Kapazität unmittelbar nach Starten der Messung unter die, bei der vorhandenen Einstellung von CAP_DAC_A gegebene, messbare Mindestkapazität von 16,732 pF. Es können daher keine Aussagen über den Verlauf der Messkurve innerhalb der ersten Minute gemacht werden. Bei Messung 3 wurden die CAP_DAC_A-Einstellungen so gewählt, dass dieses Abfallen aufgezeichnet

werden kann. Das Problem, dass sich gezeigt hat ist bei dieser Messung, dass die Kapazität bei Starten der Messung bereits auf 10,42 pF abgefallen war, dann allerdings nach 90 Sekunden sprunghaft auf 16,81 anstieg, sich für ca. weitere 90 Sekunden auf ähnlichem Niveau hielt und dann auf einen Kapazitätswert von 10,09 pF sprang und nach 120 Sekunden abermals nach oben sprang. Die Kapazität hat sich dann für den Rest der Messung mit leicht sinkender Tendenz auf diesem Niveau gehalten. Dieses Springen macht die dritte Messung mit Sensor 2 für weitere Verwendung unbrauchbar. Die Messkurve von Messung 2 mit Sensor 2 ist wegen des Informationsverlustes während der ersten 60 Sekunden ebenso nicht weiterzuverwenden.

5.2.4 Messkurven Sensor 3

Bei Sensor 3 wurde ähnlich vorgegangen wie bei Sensor 1 und 2. Auch hier gilt bezüglich CAP_DAC_A und Sensoroffset das Gleiche wie bei Sensor 1 und 2. Die Setupdaten sind in Tabelle 5.7 angeführt. Anzumerken ist hierbei, dass Messung 1 nach 7 Minuten und 20 Sekunden abgebrochen wurde, aufgrund mangelnder Reaktion des Messsignals während der Messung.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	30,0 cm	22 min konst.	23 °C	B11001111	15,60 pF
2	30,0 cm	22 min konst.	23 °C	B11110000	17,15 pF
3	30,0 cm	22 min konst.	23 °C	B11111111	20,36 pF

Tabelle 5.8: Setupdaten für Experimente mit Sensor 3

Die Messdaten für die Experimente mit Sensor 3 sind unten in Abbildung 5.11 zu sehen. Die Daten wurden wie gehabt aufbereitet. Auch die Messkurven für Sensor 3 weisen einen Mangel an Reproduzierbarkeit auf, sowohl bei Experimenten mit

demselben Sensor, als auch bei Messkurven verglichen mit den Messkurven anderer Sensoren.

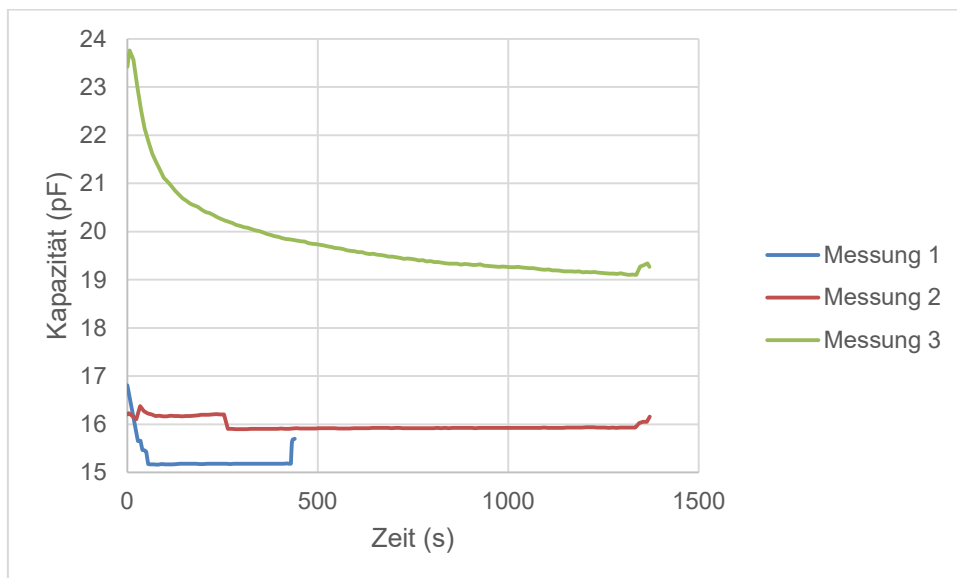


Abb. 5.11: Experimente mit Sensor 3, Messungen 1, 2 und 3; Messkurven

Die mit Sensor 3 gemessenen Kurven sind allesamt nicht brauchbar. Messung 1 wurde abgebrochen, Messung 2 weist einen Sprung nach 264 Sekunden auf und Messung 3 startet bei einem zu hohen Kapazitätswert und fällt dann zu stark, was eine Bestimmung des Grundoffsets der Kurve unmöglich macht.

5.2.5 Messkurve Sensor 4

Die Messung mit Sensor 4 wurde wie gehabt vorgenommen. Die Sensordaten sind in Tabelle 5.9 zu sehen.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11111111	17,83 pF

Tabelle 5.9: Setupdaten für das Experiment mit Sensor 4

Die Messdaten für das Experiment sind in Abbildung 5.12 abgebildet.

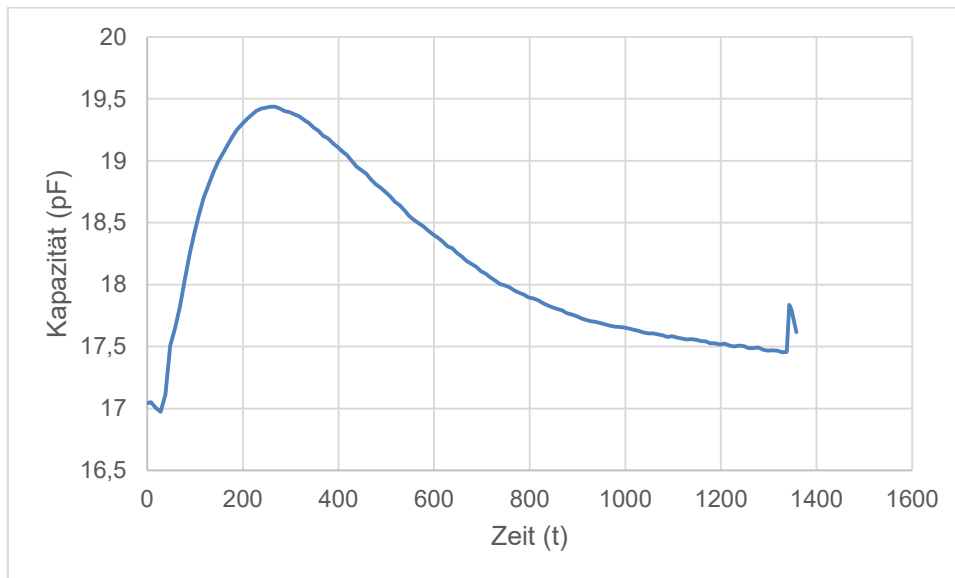


Abb. 5.12: Experiment mit Sensor 4; Messkurve

Nach diesem Experiment wurden die Kalibrierungsmessungen vorgenommen. Während deren Verlauf hat sich herausgestellt, dass das Board bei den bereits verwendeten Sensoren 1 bis 4 stets einen Kapazitätswert größer als dem messbaren Maximalwert angezeigt hat. Dieses Problem konnte nicht wieder behoben werden, wodurch die Sensoren 1 bis 4 als für weitere Experimente als unbrauchbar eingestuft wurden.

5.2.6 Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 1 bis 4 und Umrechnung auf Druckwerte

Für die Messkurven der Sensoren 1, 2 und 4 wird zur Offsetbereinigung angenommen, dass das Offset dem Kapazitätswert entspricht, welcher beim Schließen der Presse gemessen wurde. Für die Sensoren 1 bis 4 kann dieses Verfahren für die Messkurven 1 und 2 von Sensor 1 und die Messkurven 1 für die

Sensoren 2 und 4 durchgeführt werden. Die so ermittelten Offsetwerte sind in Tabelle 5.10 angeführt.

Messkurve	Offsetwert
Sensor 1 Messung 1	20,152156 pF
Sensor 1 Messung 2	18,272569 pF
Sensor 2 Messung 1	17,355234 pF
Sensor 4 Messung 1	16,972175 pF

Tabelle 5.10: Offsetwerte für Messkurven

Die nach diesem Verfahren offsetbereinigten Messkurven sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Dabei ist recht deutlich zu erkennen, dass die Messkurven sehr unterschiedliche Verläufe haben, obwohl am grundlegenden Setup der Experimente kaum etwas verändert wurde. Die einzigen Unterschiede sind die Kabellänge und die Sensoren.

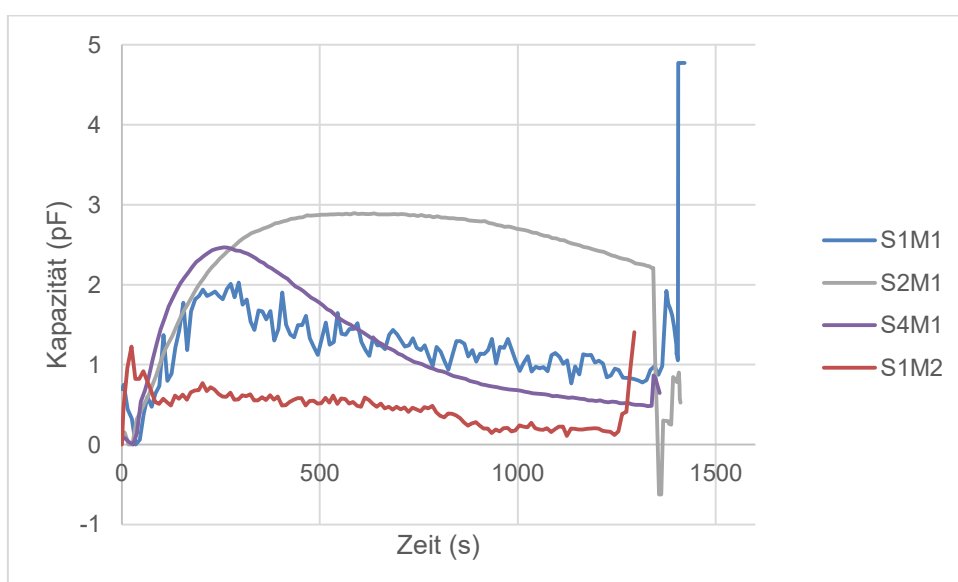


Abb. 5.13: Offsetbereinigte Messkurven für die Sensoren 1, 2 und 4

Um die Druckkurven zu berechnen müssen die in Punkt 5.1 errechneten Formeln auf die offsetbereinigten Messkurven angewandt werden. Sollte die solange die Kapazitätswerte der offsetbereinigten Messkurve kleiner oder gleich 0,62 pF sein, wird diese Formel angewandt:

$$p = \frac{1000 + 798,03 \cdot \Delta C \pm 818,17 \cdot \Delta C^2 + 487,79 \cdot \Delta C^3}{1000} \quad 5.15$$

Sollten die Kapazitätswerte über 0,62 liegen wird die folgende Formel verwendet:

$$p = \frac{857,41 + 702,53 \cdot \Delta C}{1000} \quad 5.16$$

Die diese Formeln rechnen die Kapazitätswerte in Druckwerte der Einheit bar um. Die Druckkurven für diese Messungen sind in Abbildung 5.14 angeführt.

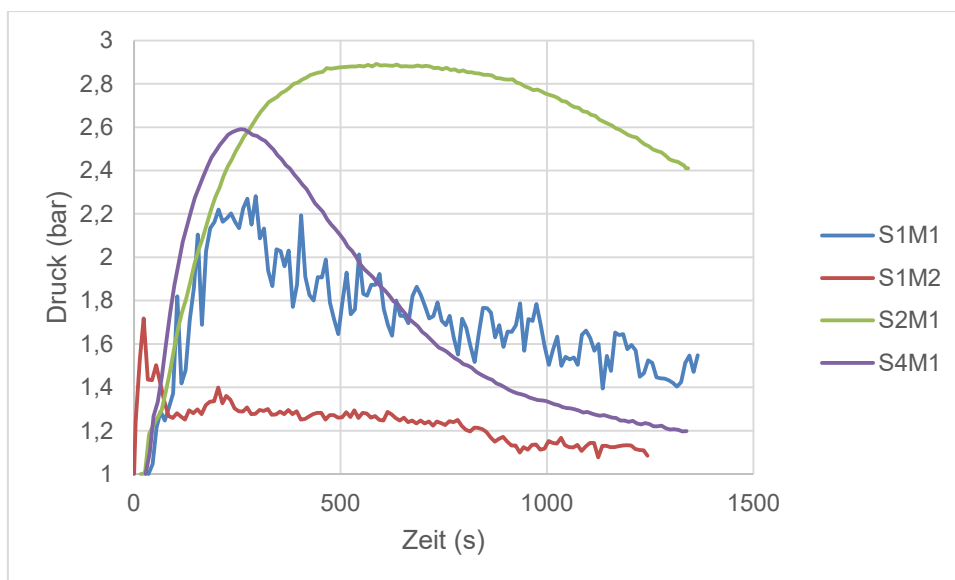


Abb. 5.14: Druckkurven für die Sensoren 1, 2 und 4

In Kapitel 2 wurde bei den Anforderungen an die Sensoren festgelegt, dass sich ein Zelleninnendruck während des Pressvorgangs von knapp unter 1,5 bar einstellen muss, alleine durch die Erwärmung des Gases innerhalb der Zellen. Wie in obiger Abbildung zu sehen ist, liegen die ermittelten Druckkurven teilweise weit über diesem Wert, auch wenn der interne Druck die Tendenz hat, während des Pressvorganges nach einem Erreichen eines Maximums wieder abzufallen. Der Grund für diesen Abfall wird mit Entweichen von Gas aus dem Inneren der Messzelle entlang des Kabels angenommen. Was dennoch zu sehen ist, ist die Tatsache, dass sich bei ausreichender Abdichtung, wie in Kurve S2M1 dargestellt ist, ein sehr hoher Innendruck mit ca. 2,88 bar ausgebildet hat. Im Falle des verwendeten Prepregs, welches Harz auf Phenolbasis enthält, handelt es sich bei der Ursache dieses erhöhten Drucks um gasförmige Kondensationsprodukte der Aushärtungsreaktion des Harzes, also hauptsächlich Formaldehyd (H_2CO) und Wasser. Es muss hier angemerkt werden, dass die Blasenbildung, welche ursprünglich beobachtet wurde, nur stellenweise auftrat, wodurch die generellen Unterschiede in den Messkurven auch damit erklärt werden können, dass bei einigen Experimenten die Sensoren gerade in einer solchen Stelle waren und dass bei anderen Experimenten sich die Sensoren eben nicht an solch einer Stelle befanden. Die generelle Menge an Experimenten, welche im Zuge dieser Arbeit durchgeführt wurden, ist nicht groß genug, um dahingehend eine statistische Relevanz aufzuweisen. Desweiterem sei hier angemerkt, dass die Kurven S1M1 und S1M2 enorme Schwankungen aufweisen. Da die hier dargestellten Druckkurven sich aus gemessenen Kapazitätskurven errechnen kann an dieser Stelle nicht gesagt werden, ob diese Schwankungen auch der tatsächlichen Realität der Druckverhältnisse innerhalb der Zellen darstellen, oder ob diese messtechnisch bedingte Störsignale sind. Wahrscheinlicher ist in diesem Fall die Annahme der zweiten Vermutung, da bei Messung 1 mit Sensor 1 eine unbeabsichtigte Verschiebung der Sensorposition während der Einbringung des Testaufbaus in die Presse aufgetreten ist und Messung 2 mit Sensor 1 nach der Kalibrierung vorgenommen wurde, während der Probleme mit dem Board aufgetreten sind.

5.2.7 Messkurve Sensor 10

Die Messung mit Sensor 10 wurde wie gehabt vorgenommen. Die Sensordaten sind in Tabelle 5.11 zu sehen. Dies ist das erste Experiment, welches nach der Messung der Kalibrierungsdaten vorgenommen wurde.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	30,5 cm	22 min konst.	23 °C	B11001111	16,22 pF

Tabelle 5.11: Setupdaten für Experimente mit Sensor 10

Auch Messung 10 wurde nach dem bisherigen Schema durchgeführt und ausgewertet. Die zugehörige Messkurve ist in Abbildung 5.15 zu sehen.



Abb. 5.15: Experiment mit Sensor 10; Messkurve

Bei dieser Kurve ist anzumerken, dass im Vergleich zu den ersten Messkurven von anderen Sensoren die Kurve nach ihrem initialen Anstieg sehr bald abfällt und zwar auch unter den ersten Minimalpunkt, welcher aus dem Schließen der Presse

resultiert. Es hat sich herausgestellt, dass es zu einer Veränderung der Offsetkurve gekommen ist.

5.2.8 Messkurve Sensor 11

Mit Sensor 11 wurden zwei Messungen durchgeführt. Die Daten für das Setup sind in Tabelle 5.12 angeführt.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	30,5 cm	22 min konstant	23 °C	B11111111	17,33 pF

Tabelle 5.12: Setupdaten für Experiment mit Sensor 11

Die Messdaten für das Experiment mit Sensor 11 sind in Abbildung 5.16 dargestellt.

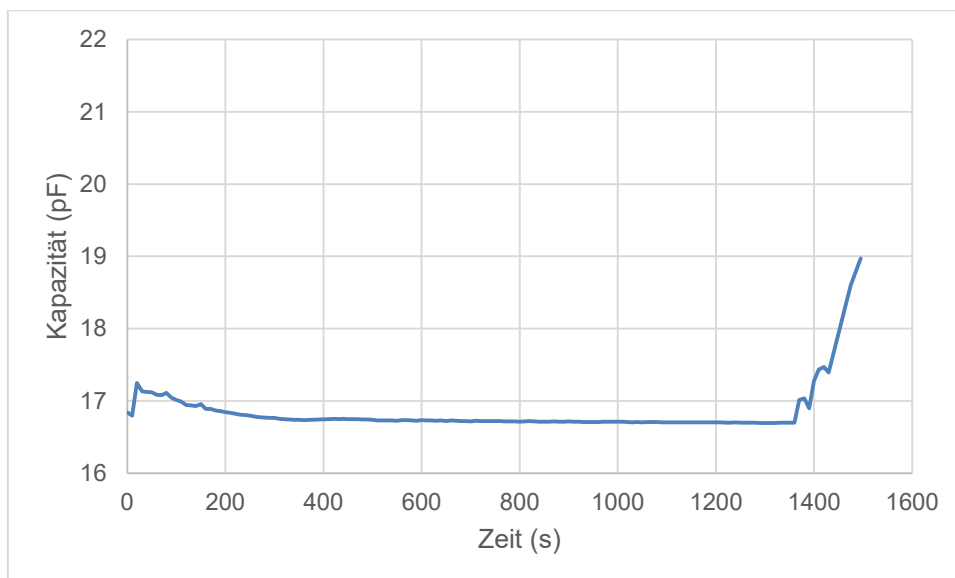


Abb. 5.16: Experiment mit Sensor 11; Messkurve

Die Kurve dieser Messung ist der Messkurve, welche mit Sensor 10 aufgenommen wurde sehr ähnlich. Auch hier hat sich die veränderte Offsetkurve applizieren lassen.

5.2.9 Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 10 und 11 und Umrechnung auf Druckwerte

Bei den Messkurven von Sensor 10 und 11 wird angenommen, dass die dazugehörige Offsetkurve den Verlauf laut Abbildung 6.16 Sensor 8 hat. Demzufolge kann der Minimalwert beim Schließen der Presse dieser Messkurven nicht einfach gegen 0 verschoben werden, um das Offset zu eliminieren. Aus diesem Grund wird folgendermaßen vorgegangen. Zuerst wird von allen Messkurven dieser individuell bestimmte Messwert subtrahiert, um die Kurven zur Nulllinie zu verschieben. Anschließend wird die Offsetkurve ebenfalls auf diese Weise zur Nulllinie hin verschoben. Danach wird die verschobene Offsetkurve von den verschobenen Messkurven subtrahiert. Die Verschiebungswerte sind in Tabelle 5.13 dargestellt.

Messkurve	Verschiebungswert
Sensor 10 Messung 1	15,143922 pF
Sensor 11 Messung 1	16,793903 pF
Sensor 8 Offsetmessung	17,079402 pF

Tabelle 5.13: Verschiebungswerte für die Sensoren 10 und 11

Der Vorgang der Offsetbereinigung für die Messkurven der Sensoren 10 und 11 ist in den Abbildungen 5.17 und 5.18 dargestellt.

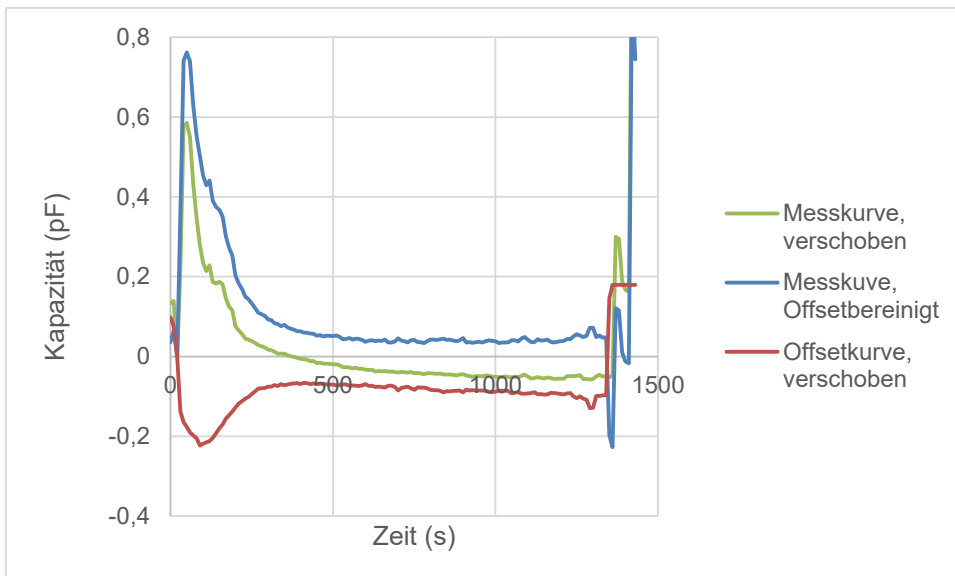


Abb. 5.17: Offsetbereinigung der Messkurve des Sensors 10

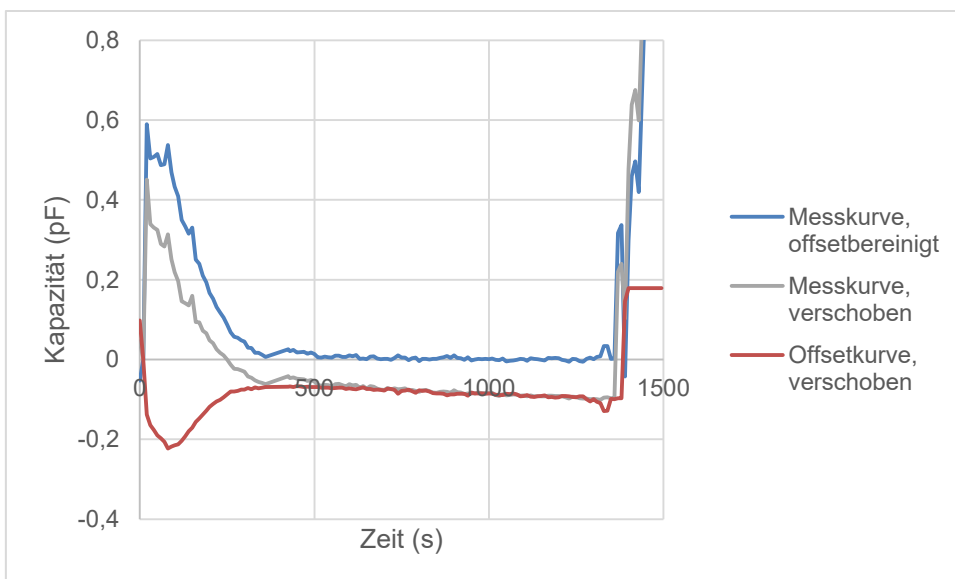


Abb. 5.18: Offsetbereinigung der Messkurve des Sensors 11

Aus den offsetbereinigten Messkurven lassen sich anschließend die wie bereits beschrieben Druckkurven berechnen. Die entsprechenden Druckkurven sind in Abbildung 5.19 zu sehen.

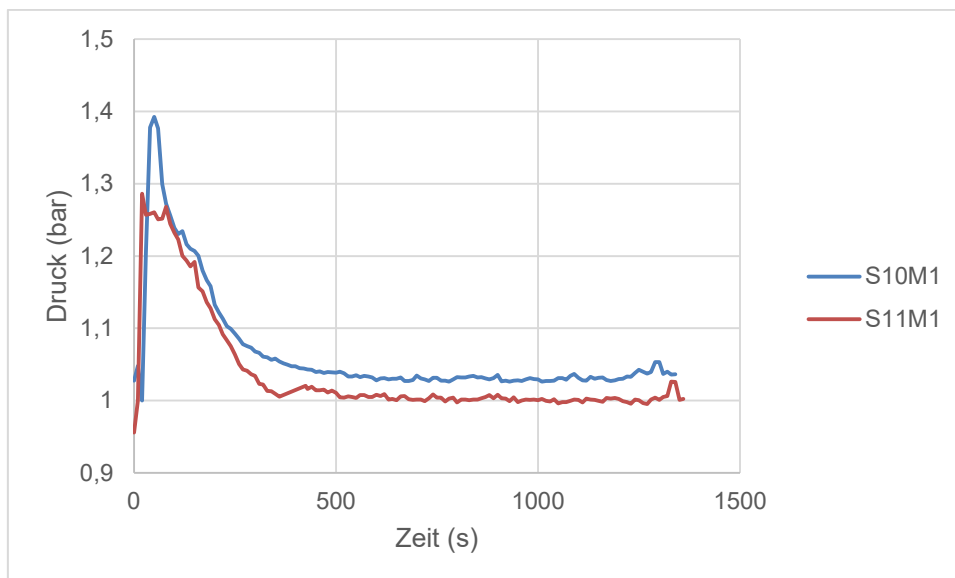


Abb. 5.19: Druckkurven für die Sensoren 10 und 11

Die Druckkurven S10M1 und S11M1 erreichen während des gesamten Pressvorgangs niemals den erwarteten Mindestdruck von ca. 1,5 bar. Dies deutet stark darauf hin, dass die Zellen, in denen sich die jeweiligen Sensoren befanden nicht gegenüber der Umgebung abgedichtet waren. Auch hier gilt wieder die Vermutung, dass der Innendruck entlang der Kabel entwichen ist.

5.2.10 Messkurve Sensor 12

Für das Experiment mit Sensor 12 wurde im Vergleich zu den bisherigen Messungen ein Druckprogramm mit 3-maligem Öffnen und Schließen der Presse im Abstand von 30 Sekunden gefahren. Dadurch wurde den Wabenzellen die Möglichkeit zu Druckausgleich gegeben. Die Setupdaten sind wie gehabt in Tabelle 5.14 zu sehen.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	31,0 cm	22 min 3x öffnen	21 °C	B11111111	17,92 pF

Tabelle 5.14: Setupdaten für Experimente mit Sensor 12

Die Messdaten für das Experiment mit Sensor 12 sind in Abbildung 5.20 dargestellt.

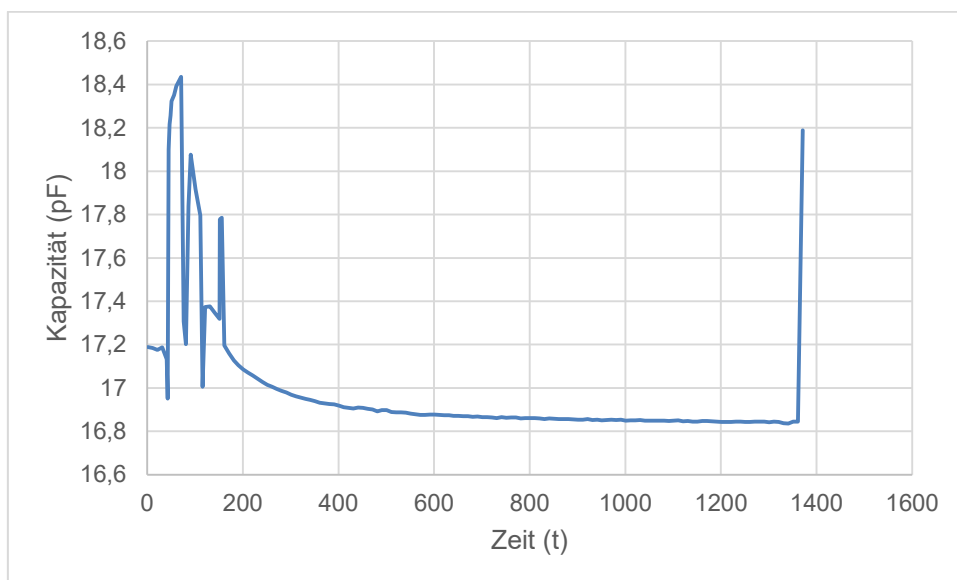


Abb. 5.20: Experiment mit Sensor 12, Messung 1; Messkurve

Das erste erkennbare Minimum dieser Kurve ergibt sich wie üblich aus dem erstmaligen Schließen der Presse. Danach baut sich ein Zellendruck auf, welcher mit dem Öffnen der Presse nach 71 Sekunden ausgeglichen wird, wodurch auch die Kapazität des Sensors stark fällt. Durch das abermalige Schließen der Presse nach 81 Sekunden bauen sich der Druck und damit das Sensorsignal wieder auf, allerdings nicht ganz so stark. Das erneute Öffnen der Presse bewirkt einen erneuten Abfall der gemessenen Kapazität. Bei folgenden Schließen der Presse steigt das Signal wieder. Beim dritten Öffnen der Presse kommt es allerdings zu einer Signalspitze, die nach dem Schließen der Press wieder abfällt. Für den Rest der Messung sinkt das Signal unter das Initialoffset nach dem erstmaligen Schließen der Presse. Diese Kurve ist in diesem letzten Aspekt den ersten Messungen der Sensoren 10 und 11 ähnlich.

5.2.11 Messkurve Sensor 13

Die Messung mit Sensor 13 wurde ähnlich dem Experiment mit Sensor 12 durchgeführt. Der einzige Unterschied ist die Position des Sensors innerhalb des Verbundes. Im Vergleich zu den anderen Messungen, wo die Sensoren immer in der Mitte des Verbundes platziert wurden, wurde der Sensor hier auf halber Strecke zum Mittelpunkt platziert, wodurch nur halb so viel Kabel in den Verbund integriert wurde wie bei den anderen Messungen. Die Setupdaten sind in Tabelle 5.15 zu sehen.

Messung	Kabellänge	Pressprogramm	Raumtemperatur	CAP_DAC_A	Sensoroffset
1	35,0 cm	22 min 3x öff.	21 °C	B11111111	18,47 pF

Tabelle 5.15: Setupdaten für Experiment mit Sensor 13

Die Messkurve ist in Abbildung 5.21 dargestellt.

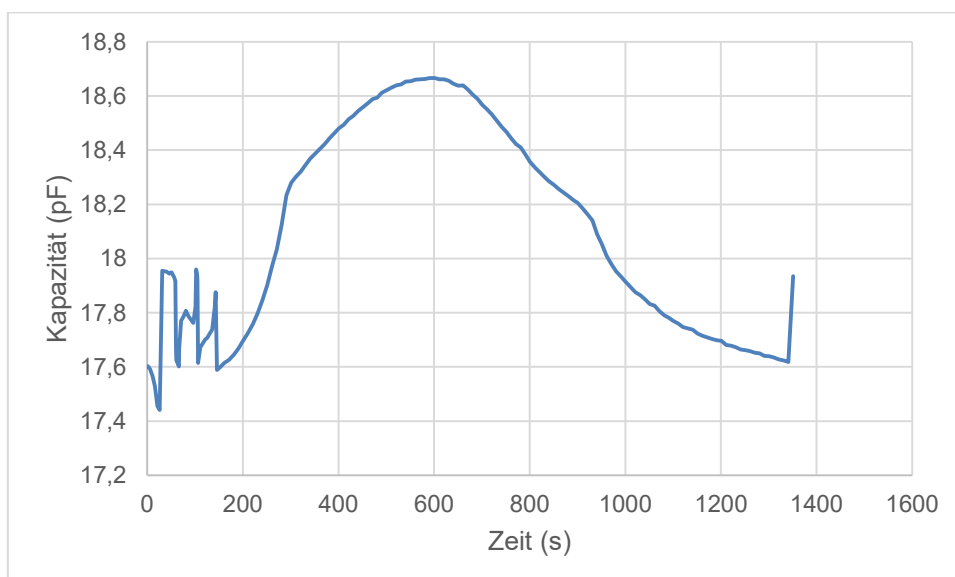


Abb. 5.21: Experiment mit Sensor 12, Messung 1; Messkurve

Im Gegensatz zu der Messkurve von Sensor 12 ist diese Kurve den ersten Messungen der Sensoren 2 und 4 ähnlicher.

5.2.12 Offsetbereinigung der Messkurven der Sensoren 10 und 11 und Umrechnung auf Druckwerte

Für die Messkurven der Sensoren 12 und 13 gilt ähnliches wie für die Sensoren 10 und 11. Da allerdings ein anderes Pressprogramm verwendet wurde, wird zur Eliminierung des Offsets für die Messkurven der Sensoren 12 und 13 die mit Sensor 10 gemessene Offsetkurve verwendet, welche ebenfalls unter Verwendung dieses Pressprogramms aufgenommen wurde. Wie auch schon zuvor werden wieder die Messkurven und die Offsetkurve zur Nulllinie hin verschoben. Anschließend wird die Offsetkurve jeweils von den Messkurven subtrahiert und auf die sich so ergebende Kurve werden die Kalibrierformeln angewandt um die Druckwerte zu erhalten. Die Verschiebungswerte sind in Tabelle 5.16 dargestellt.

Messkurve	Verschiebungswert
Sensor 12 Messung 1	16,950691 pF
Sensor 13 Messung 1	17,440799 pF
Sensor 10 Offsetmessung	15,214438 pF

Tabelle 5.16: Verschiebungswerte für die Sensoren 12 und 13

Dieser Vorgang ist in den folgenden Abbildungen dargestellt.

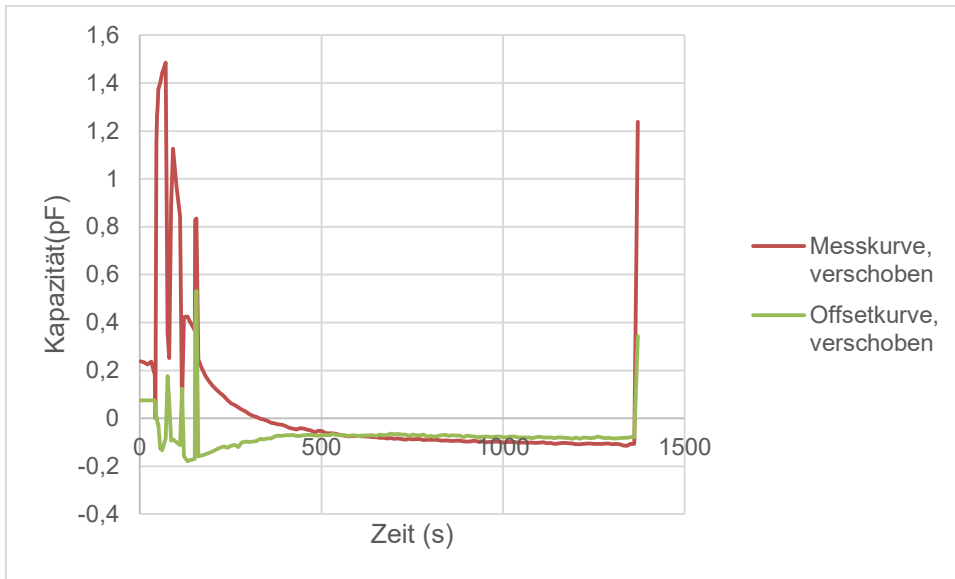


Abb. 5.22: Verschobene Kurven für Sensor 12

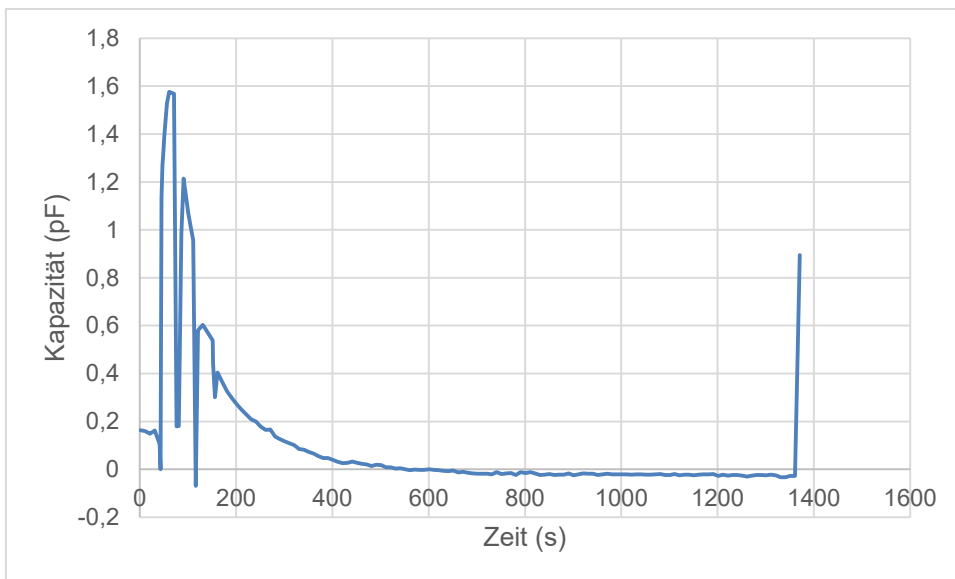


Abb. 5.23: Offsetbereinigte Kurve für Sensor 12

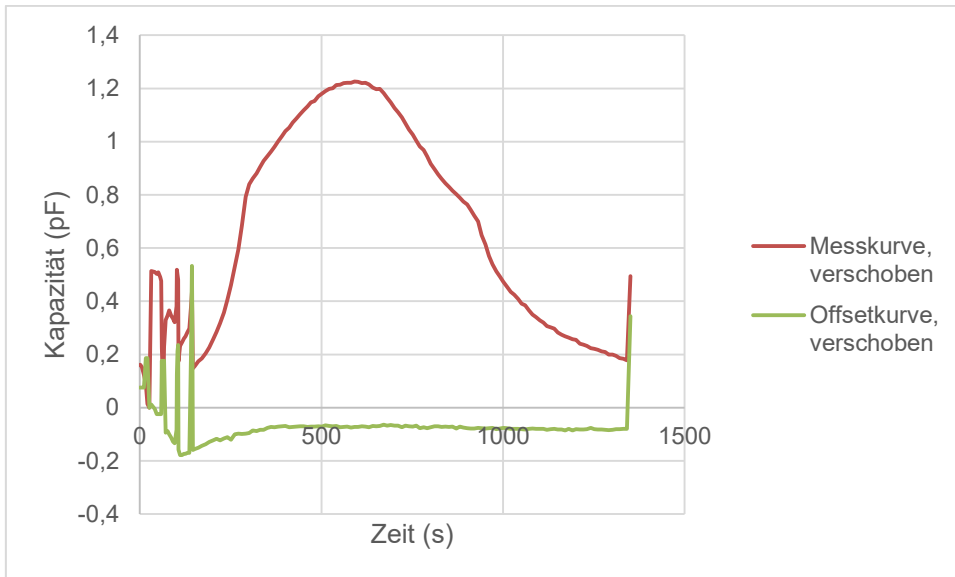


Abb. 5.24: Verschobene Kurven für Sensor 13

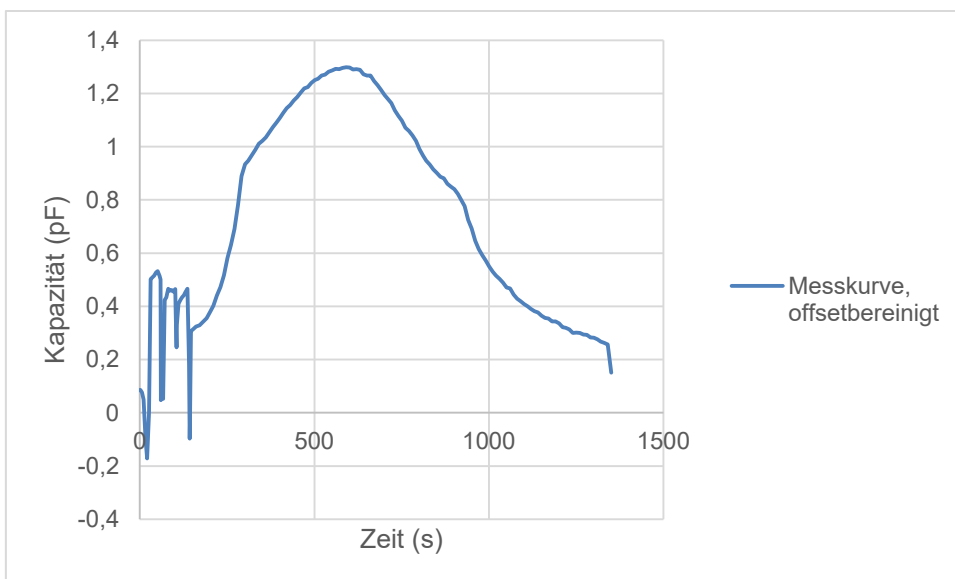


Abb. 5.25: Offsetbereinigte Kurve für Sensor 13

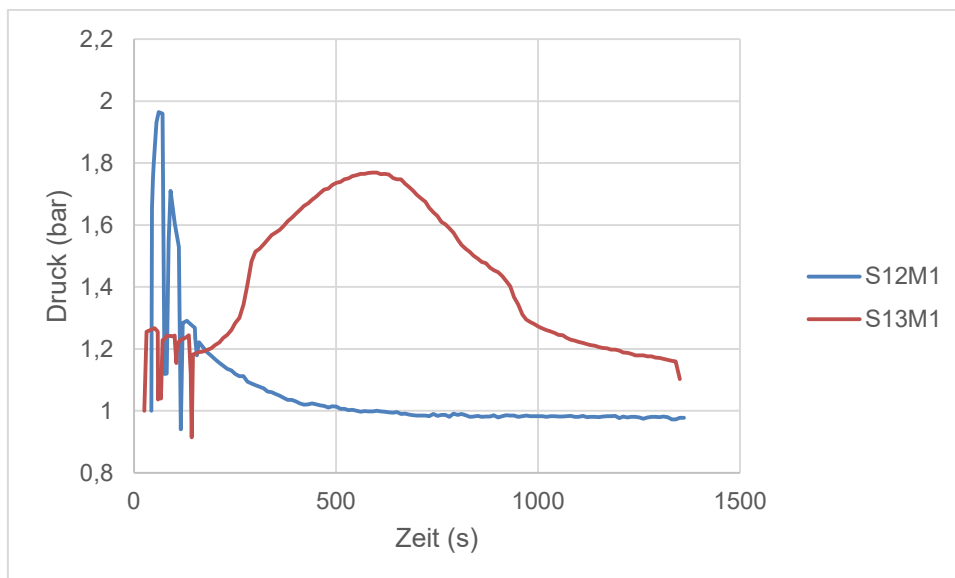


Abb. 5.26: Druckkurven für die Sensoren 12 und 13

Ziel der Experimente mit den Sensoren 12 und 13 war es zu sehen, ob der durch das Öffnen der Presse bedingte Druckausgleich in der Anfangsphase des Pressvorganges Auswirkungen auf den Zelleninnendruck hat. Die beiden Experimente haben zwei in ihrer Form vollkommen unterschiedliche Druckkurven vorgebracht. Die Kurve von Sensor 12 ist in ihrer Form den Kurven der Sensoren 10 und 11 ähnlich, auch wenn sich ein insgesamt höherer Druck eingestellt hat. Die Tatsache, dass der Zelleninnendruck beim Öffnen der Presse schlagartig fällt wurde erwartet. Was nicht erwartet wurde, ist der ebenso schlagartige Anstieg des Drucks nach dem erneuten Schließen der Presse. Wie kann sich so ein Kurvenverlauf erklären? Vermutlich war die Zelle bis zu ersten Druckausgleich weitestgehend dicht. Beim Öffnen der Presse war es möglich den Druck durch ein Wölben der Deckschicht auszugleichen. Beim Schließen der Presse wurde diese Wölbung wieder ausgeglichen, wodurch die Luft innerhalb der Zelle komprimiert wurde und hierbei den ursprünglich dichten Weg entlang des Kabels aufgestoßen hat, was dann zum generellen Abfall des Drucks auf Umgebungsniveau im weiteren Verlauf des Experimentes zu Folge hatte. Bei der Kurve von Sensor 13 war der Sachverhalt vermutlich umgekehrt. Das heißt die Zelle war zu Beginn nicht dicht, wodurch der Druck durch das vom Öffnen der Presse bewirkte Entweichen der Luft einigermaßen ausgeglichen werden konnte

und die Zelle erst im späteren Verlauf des Pressvorgangs und der daraus resultierenden Aushärtung des Harzes abgedichtet wurde, was den in der Kurve zu sehenden Druckaufbau zur Folge hatte.

5.3 Piezowiderstandssensoren

Für die Experimente mit den piezoresistiven Sensoren sind keine brauchbaren Ergebnisse erzielt worden. Es hat sich herausgestellt, dass die Klebeverbindungen zwischen Sensor und Draht den Pressvorgang teilweise nicht überstehen, wodurch die Messelektronik nicht in der Lage ist brauchbare Daten aufzuzeichnen. In der Abbildung 5.27 ist ein Sensor zu sehen, bei dem sich während des Pressen zwei der 5 Klebeverbindungen gelöst haben.

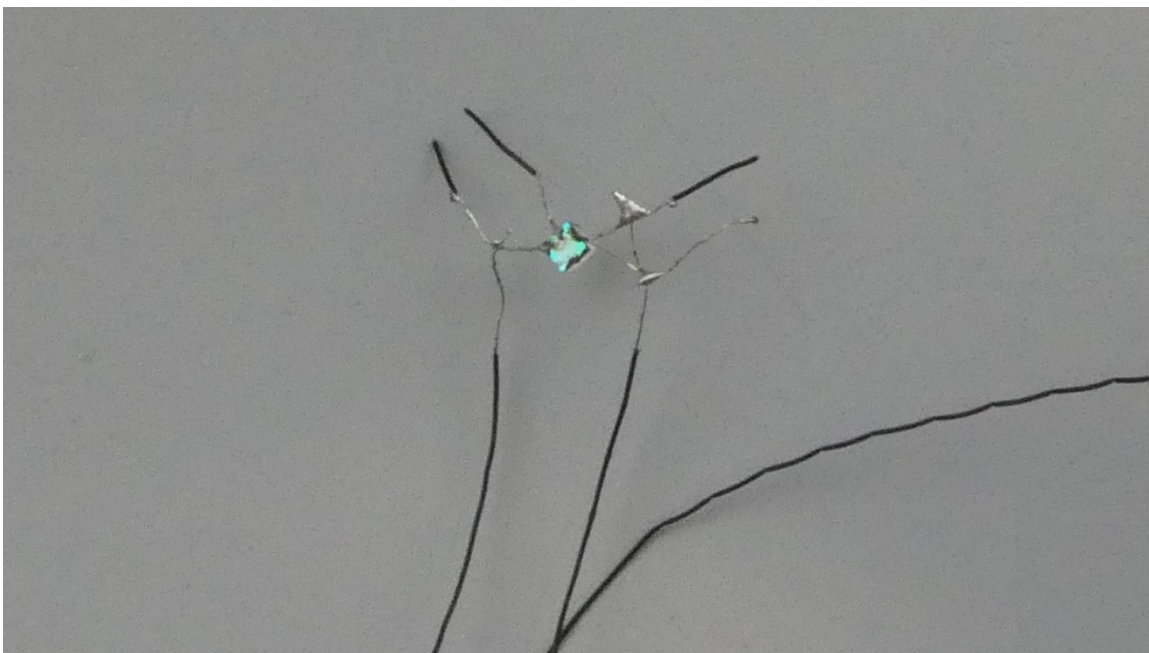


Abb. 5.27: Piezowiderstandsdrucksensor nach Pressvorgang

6 Zusammenfassung

Im Laufe dieser Arbeit wurde eine Reihe von Experimenten mit kapazitiven Drucksensoren der Firma Proton Mikrotechnik durchgeführt. Bei diesen Experimenten kam es zu einem generellen Auftreten von Reproduzierbarkeitsproblemen bei den Messergebnissen. Im Gegensatz dazu, ließen sich die Ergebnisse der Kalibrierungsmessungen recht gut reproduzieren. Es wurde errechnet, dass in den Zellen während der Verarbeitung alleine durch die Erwärmung der Luft ein Druck von mindestens 1,46 bis 1,48 bar auftreten muss, vorausgesetzt der Druck kann aus den Zellen nicht entweichen. Es war zu erwarten, dass der Zelleninnendruck über diesen Werten liegt, da bei der Aushärtung des Harzes der Prepregs gasförmige Reaktionsprodukte entstehen. Was beobachtet wurde ist ein Auftreten von unterschiedlich hohen Drücken, welche teilweise weit über den 1,46 bis 1,48 bar lagen. Sie waren verteilt über die einzelnen Experimente. Die Tatsache, dass die Druckkurven unterschiedliche Maximalwerte aufweisen, kann so interpretiert werden, dass die Ausbildung des Zelleninnendrucks nicht gleichmäßig über die Fläche des Sandwichs erfolgt und dass es nicht gegeben ist, dass sich der Druck in den einzelnen Zellen von Experiment zu Experiment gleich aufbaut, auch wenn der Aufbau der Experimente immer gleich durchgeführt wird. Dies kann allerdings durch die Verwendung von nur einem Sensor pro Experiment nicht exakt bestätigt werden.

Die Ergebnisse sind nicht unanfechtbar. Wenn man sich die Druckkurven in der Abbildung 5.14 (Seite 72) ansieht, so folgen sie einem generell ähnlichen Muster. Zuerst kommt ein starker Anstieg des Drucks, welcher anschließend allmählich wieder abfällt. Als Grund für diesen Abfall wird primär Luftdurchlässigkeit entlang des Kabels angenommen, wobei auch Diffusionsvorgänge zwischen Deckschicht und Kern eine Rolle spielen könnten. Die Tatsache, dass die beiden Kabel miteinander verdrillt sind, scheint einen Kanal zu schaffen, welcher es erlaubt der Luft im Zelleninnenraum zu entweichen. Wie groß dieses Entweichen ist, hängt dabei vermutlich mit der genauen Lage des Kabels und wie eng die Kabel miteinander verdrillt sind zusammen. Beim Vergleich aller Ergebnisse kann man

die Vermutung anstellen, dass bei den Messungen der Sensoren 10 bis 12 ein besonders gut ausgeprägter Kanal entlang des Kabels vorhanden war, wodurch der Druck schon sehr früh entweichen konnte.

Ein weiterer Punkt an dem man die Richtigkeit der Ergebnisse anzweifeln kann, ist die Tatsache, dass die Sensoren nach einmaliger Verwendung dazu neigen fragwürdige Ergebnisse zu erzielen. Laut Hersteller sollten die Sensoren die bei den Experimenten vorherrschenden Bedingungen problemlos überstehen können. Dennoch haben die Messungen 2 und 3 der Sensoren 2 und 3 allesamt gänzlich unbrauchbare Ergebnisse mit unerklärlichen Kapazitätssprüngen geliefert. Desweiterem ist es bei der Kalibrierung nicht gelungen eine Kurve mit einem bereits gebrauchten Sensor zu messen. Hierbei hat das Board zwar zunächst funktioniert, allerdings bei Schließen des Autoklaven immer einen Kapazitätswert gleich der oberen Messgrenze angezeigt, was nicht hätte passieren sollen. Sobald das Board diese oberste Messgrenze bei einem gebrauchten Sensor angezeigt hat, war es nicht mehr möglich mit diesem Sensor zu messen. Die einzige Ausnahme stellte der Sensor 8 dar. Es wurde versucht eine Kalibrierungsmessung durchzuführen, der Sensor wurde dabei allerdings Opfer des soeben beschriebenen Problems. Es hat sich später herausgestellt, dass dieser Sensor doch noch verwendet werden konnte, wodurch mit diesem Sensor eine Offsetkurve aufgenommen wurde.

Hiermit ergibt sich auch das dritte große Problem mit der Gültigkeit der Messungen. Es wurden verschiedene Offsetkurven vor und nach der Kalibrierung gemessen. Bei der Offsetkurve von Sensor 2 ist der Offset nach schließen der Presse mehr oder weniger konstant. Bei den Offsetkurven der Sensoren 8 und 10 ist dies nicht der Fall. Es ist nicht klar, warum diese Kurven in ihrer grundlegenden Form unterschiedlich sind. Desweiterem sei hier anzumerken, dass die Offsetkurven der Sensoren 2 und 10 mit bereits gebrauchten Sensoren durchgeführt wurden, wodurch die allgemeine Richtigkeit dieser Messungen in Frage gestellt wird.

Bezüglich der Kapazität-Druckumrechnung wurde die Kalibrierkurve bei 160 °C aufgenommen, wobei durch die eher ungenaue Regelung der Temperatur im

Autoklaven die anfänglichen Messwerte eher bei einer Temperatur von 155 °C aufgenommen wurden und die letzten Messwerte bei einer Temperatur von 167 °C, was zu einer Verzerrung in der Richtigkeit der Parameter führt. Desweiterem wurde während der Experimente die tatsächliche Zelleninnentemperatur nicht gemessen sondern nur mit 155 °C angenommen. Durch diese Annahme und die Verwendung von Parametern für 160 °C kommt es bei der Berechnung der Druckkurven zu Abweichungen vom tatsächlichen Ist-Zustand.

Bei dem hier verwendeten Verfahren lässt sich der Zelleninnendruck immer nur im Nachhinein bestimmen. Das Verfahren ist nicht in der Lage aktuelle Ist-Drücke wiederzugeben. Durch die veränderbare Geometrie des Kabels kommt es zu starken Schwankungen des Grundoffsets, die sich nur nachträglich vom Messsignal des Sensors unterscheiden lassen. Desweiterem ist die Anwendung der Umrechnungsformeln nur möglich sobald die Messwerte von dem Grundoffset bereinigt wurden.

Als generelle Fazit zur Verwendung dieses Sensors zur Druckmessung im Innenraum von Sandwichfaserverbunden mit Wabenkern kann man sagen: Ausbaufähig. Für weitere Forschung auf diesem Gebiet bietet sich zum einen an, eine von Messung zu Messung konstante Kabelgeometrie zu verwenden, um das stark schwankende Grundoffset zu eliminieren. Dies sollte es auch erlauben die Messung selbst zu automatisieren. Zum anderen kann man versuchen die Zellen entlang des Kabels abzudichten, um das Entweichen der Luft innerhalb der Messzelle zu verhindern und so die tatsächlichen Druckverläufe zu erhalten. Auch bietet sich an mehrere Sensoren an verschiedenen Stellen zu verwenden um einen Überblick auf die Verteilung des Zelleninnendrucks über das Bauteil zu erhalten.

Die Verwendung von Piezowiderstandssensoren wurde ursprünglich zum Vergleich angedacht. Es wurde von der Annahme ausgegangen, dass man mit diesen Sensoren möglicherweise besser reproduzierbare Druckkurven erhalten kann, und beim Vergleich dieser mit den Druckkurven der bereits verwendeten kapazitiven Sensoren herausfinden kann wie es um den Zelleninnendruck tatsächlich bestellt ist. Es hat sich allerdings herausgestellt, dass die Methode, die

Piezowiderstandssensoren mit dem Board zu verbinden, nicht gut dafür geeignet ist. Das grundlegendste Problem war es die Klebverbindung so aufzutragen, dass kein Kurzschluss zwischen den Kontakten des Sensors hergestellt wird. Dies hat sich als recht schwierig herausgestellt. Dann kam das Problem, dass die Klebeverbindungen den Pressvorgang nur teilweise überstehen, was dazu führte, dass kein Sensor die Presse in einem vollständig verbundenen Zustand wieder verlassen hat. Das Resultat dieser Tatsache ist, dass keine brauchbaren Messkurven mit Piezowiderstandssensoren aufgenommen werden konnten.

Das Fazit für die Verwendung von Piezowiderstandssensoren ist, dass man nach Möglichkeit Sensoren verwenden sollte, welche bereits vorverbunden (z.B. mit einem Gehäuse) sind, damit man anstatt der doch relativ fragilen Klebeverbindung eine stabile Lötverbindung herstellen kann.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2.1:	Messung des Zelleninnendruckes eines Honigwabensandwichfaserverbundes.....	5
Abbildung 2.2:	FBG, Funktionsweise.....	7
Abbildung 2.3:	FBG verbunden mit Basis aus Material mit hohem Temperatureausdehnungskoeffizient (Coefficient of thermal expansion CTE).....	8
Abbildung 2.4:	Bimetallmethode zur Erhöhung der Temperaturempfindlichkeit eines FBG.....	9
Abbildung 2.5:	Bimetallmethode mit veränderlicher Messreichweite.....	9
Abbildung 2.6:	Bimetallmethode für tiefe Temperaturen.....	10
Abbildung 2.7:	Gleichzeitige Messung von Temperatur und Dehnung.....	11
Abbildung 2.8:	Dehnungsmessung mittels FBG mit inhärenter Temperaturkompensation.....	11
Abbildung 2.9:	Einachsiges Neigungsmessgerät.....	12
Abbildung 2.10:	Bi-axiales Neigungsmessgerät.....	13
Abbildung 2.11:	Einachsiger FBG-Beschleunigungssensor.....	14
Abbildung 2.12:	Dreiachsiger FBG-Beschleunigungssensor.....	14
Abbildung 2.13:	Mikroskopaufnahme der mikrostrukturierten optischen Multimoduspolymerfaser, Außendurchmesser von 150 μm , Kerndurchmesser von 50 μm	16
Abbildung 2.14:	Experimentales Setup um die Empfindlichkeit von optischen Polymerfasern auf hydrostatischen Druck zu prüfen.....	17
Abbildung 2.15:	Bragg-Wellenlänge der mikrostrukturierten optischen Multimoduspolymerfaser unter Einwirkung von Druck.....	18

Abbildung 2.16:	Bragg-Wellenlänge einer optischen Glasfaser mit FBG unter Einwirkung von Druck.....	19
Abbildung 2.17:	Schematische Darstellung eines Drucksensors mit nur einem FBG.....	20
Abbildung 2.18:	Schematische Darstellung eines Drucksensors mit zwei FBG in Differentialkonfiguration.....	21
Abbildung 2.19:	Sensor mit nur einem FBG; a) Wellenform bei 0 (schmälere Kurve) und 250 kPa (breitere Kurve); b) Änderung der Wellenformbreite mit Änderung des Drucks.....	21
Abbildung 2.20:	Sensor in Differentialkonfiguration bei unterschiedlichen Temperaturen.....	22
Abbildung 2.21:	Darstellung des Sensoraufbaus.....	23
Abbildung 2.22:	Veränderung der Bragg-Wellenlänge unter Einfluss von Druck.....	24
Abbildung 2.23:	Fabri-Perot-Interferometer mit Polymerkappe am Ende einer optischen Faser.....	27
Abbildung 2.24:	Einfluss von Druck (0,1 bis 2,5 Mpa) auf FPI mit unterschiedlichen Interferenzwellenlängen.....	28
Abbildung 2.25:	Einfluss von Temperatur (40 bis 90°C) auf FPI mit unterschiedlichen Interferenzwellenlängen.....	28
Abbildung 2.26:	Sensor von opSens.....	29
Abbildung 2.27:	Piezowiderstandsdrucksensor, schematischer Aufbau.....	31
Abbildung 2.28:	Silicon fusion bonding; Produktionsschritte (A); Vergleich SFB und konventionelle Methode (B).....	33
Abbildung 2.29:	LPS22HB Sensor.....	34
Abbildung 2.30:	NPP-301 Serie von Acal BFi Germany GmbH.....	34
Abbildung 2.31:	SM6250 von SMi.....	35
Abbildung 2.32:	SM98A von SMi.....	36

Abbildung 2.33:	Kapazitiver Drucksensor von Proton Mikrotechnik.....	39
Abbildung 4.1:	Sensor (rot eingekreist) mit Kabel und Board mit AD7745 ASIC (gelb eingekreist).....	45
Abbildung 4.2:	Kern mit Deckschicht; der Sensor wird innerhalb der roten Markierung platziert.....	46
Abbildung 4.3:	Kern für Offsetmessung; der Sensor wird innerhalb der roten Markierung platziert, das Kabel wird entlang des roten Pfeils geführt.....	47
Abbildung 4.4:	Nichtverbundener Piezowiderstandssensor.....	49
Abbildung 4.5:	Klemme zur Verbindung von Sensor und Board.....	49
Abbildung 4.6:	Elmos Demo Board.....	50
Abbildung 4.7:	Dichtringe.....	52
Abbildung 5.1:	Kalibrierung der Sensoren von Proton Mikrotechnik, Sensor 5.....	54
Abbildung 5.2:	Kalibrierkurven von Sensor 6.....	55
Abbildung 5.3:	Kalibrierkurven von Sensor 9.....	56
Abbildung 5.4:	Gegenüberstellung der offsetbereinigten Messkurven bei 23 °C.....	57
Abbildung 5.5:	Gegenüberstellung der offsetbereinigten Messkurven bei 160 °C.....	57
Abbildung 5.6:	Messkurve Sensor 5 bei 160 °C, Druck über Kapazität.....	58
Abbildung 5.7:	Messkurve Sensor 5 bei 160 °C, Druck über Kapazitätsdifferenz zum Offset.....	59
Abbildung 5.8:	Experimente für das Messen der Offsetkurven, Sensoren 2, 8 und 10.....	64
Abbildung 5.9:	Experimente mit Sensor 1, Messungen 1 und 2; Messkurven.....	66

Abbildung 5.10:	Experimente mit Sensor 2, Messungen 1, 2 und 3; Messkurven.....	67
Abbildung 5.11:	Experimente mit Sensor 3, Messungen 1, 2 und 3; Messkurven.....	69
Abbildung 5.12:	Experiment mit Sensor 4; Messkurve.....	70
Abbildung 5.13:	Offsetbereinigte Messkurven für die Sensoren 1, 2 und 4.....	71
Abbildung 5.14:	Druckkurven für die Sensoren 1, 2 und 4.....	72
Abbildung 5.15:	Experiment mit Sensor 10; Messkurve.....	74
Abbildung 5.16:	Experiment mit Sensor 11; Messkurve.....	75
Abbildung 5.17:	Offsetbereinigung der Messkurve des Sensors 10.....	77
Abbildung 5.18:	Offsetbereinigung der Messkurve des Sensors 11.....	77
Abbildung 5.19:	Druckkurven für die Sensoren 10 und 11.....	78
Abbildung 5.20:	Experiment mit Sensor 12, Messung 1; Messkurve.....	79
Abbildung 5.21:	Experiment mit Sensor 13, Messung 1; Messkurve.....	80
Abbildung 5.22:	Verschobene Kurven für Sensor 12.....	82
Abbildung 5.23:	Offsetbereinigte Kurve für Sensor 12.....	82
Abbildung 5.24:	Verschobene Kurven für Sensor 13.....	83
Abbildung 5.25:	Offsetbereinigte Kurve für Sensor 13.....	83
Abbildung 5.26:	Druckkurven für die Sensoren 12 und 13.....	84
Abbildung 5.27:	Piezowiderstandsdrucksensor nach Pressvorgang.....	85

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1:	Merit Sensor; Sensorserien.....	37
Tabelle 5.1:	Drücke und Offsetbereinigte Kapazitäten bei 160 °C.....	60
Tabelle 5.2:	Parameter für die Umrechnung von Kapazität in Druck bei niedrigen Drücken und einer Temperatur von 160 °C.....	61
Tabelle 5.3:	Drücke und Offsetbereinigte Kapazitäten bei 160 °C.....	62
Tabelle 5.4:	Parameter für die Umrechnung von Kapazität in Druck bei hohen Drücken und einer Temperatur von 160 °C.....	62
Tabelle 5.5:	Setupdaten für die Messungen des Offsets.....	63
Tabelle 5.6:	Setupdaten für Experimente mit Sensor 1.....	65
Tabelle 5.7:	Setupdaten für Experimente mit Sensor 2.....	66
Tabelle 5.8:	Setupdaten für Experimente mit Sensor 3.....	68
Tabelle 5.9:	Setupdaten für das Experiment mit Sensor 4.....	69
Tabelle 5.10:	Offsetwerte für Messkurven.....	71
Tabelle 5.11:	Setupdaten für Experimente mit Sensor 10.....	74
Tabelle 5.12:	Setupdaten für Experiment mit Sensor 11.....	75
Tabelle 5.13:	Verschiebungswerte für die Sensoren 10 und 11.....	76
Tabelle 5.14:	Setupdaten für Experimente mit Sensor 12.....	78
Tabelle 5.15:	Setupdaten für Experiment mit Sensor 13.....	80
Tabelle 5.16:	Verschiebungswerte für die Sensoren 12 und 13.....	82

9 Literaturverzeichnis

- [1] James Kratz, Pascal Hubert; Processing out-of-autoclave honeycomb structures: Internal core pressure measurements, 2011, McGill University, Department of Mechanical Engineering
- [2] S. Sequeira Tavares; V. Michaud, J.-A.E. Månson, Through thickness air permeability of prepregs during cure, 2009, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne – EPFL, Laboratoire de Technologie des Composites et Polymères – LTC
- [3] Micron Optics; Optical Fiber Sensors Guide Fundamentals & Applications
- [4] Kuo Li; Review of the Strain Modulation Methods Used in Fiber Bragg Grating Sensors, 2015, School of Civil Engineering and Built Environment, Queensland University of Technology, Brisbane
- [5] <https://de.wikipedia.org/wiki/Fabry-P%C3%A9rot-Interferometer>, 28. 12. 2017
- [6] Fraden; Handbook of modern Sensors
- [7] Webster; Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook
- [8] Ian P. Johnson, David J. Webb und Kyriacos Kalli; Hydrostatic pressure sensing using a polymer optical fibre Bragg gratings, 2012, Photonics Research

Group Aston University, Birmingham, Nanophotonics Research Laboratory,
Cyprus University of Technology

[9] Yen-Te Ho, An-Bin Huang und Jui-ting Lee; Development of a chirped/differential optical fiber Bragg grating pressure sensor, 2008, Department of Civil Engineering der National Chiao-Tung University

[10] David Hsiao-Chuan Wang, Andrew Abbott, Simon A. Maunder, Neil G. Blenman und John W. Arkwright; A miniature fiber Bragg grating pressure sensor for in-vivo sensing applications, 2012, CSIRO Material Science and Engineering, PO BOX 218, Lindfield

[11] Bing Sun, Yiping Wang, Junle Qu, Changrui Liao, Guolu Yin, Jun He, Jiangtao Zhou, Jian Tang, Shen Liu, Zhengyong Li und Yingjie Liu; Simultaneous measurement of pressure and temperature by employing Fabry-Perot interferometer based on pendant polymer droplet, 2015, Key Laboratory of Optoelectronic Devices and Systems of Ministry of Education and Guangdong Province, College of Optoelectronic Engineering, Shenzhen University

[12] <https://opsens-solutions.com/products/fiber-optic-pressure-sensors/opp-m/>, 16.02.2018

[13]

<http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/bf/c1/4f/23/61/17/44/8a/DM00140895.pdf/files/DM00140895.pdf/jcr:content/translations/en.DM00140895.pdf>, 16.02.2018

[14] <http://www.acalbf.com/de/Sensoren/Druck/auf-Platine/p/100-psi--700-kPa--Absolutdrucksensor--Analogausgang--Ported--IC-Tubes-or-Tape-and-Reel/00000013I2>, 16.02.2018

[15] <http://www.si-micro.com/products/analog-systems/low-pressure-sensor-sm6250.html>, 16.02.2018

[16] <http://www.si-micro.com/products/mems-die/backside-pressure-harsh-media-die-sm99a.html>, 16.02.2018

[17] <https://meritsensor.com/products/>, 16.02.2018

[18] http://www.protron-mikrotechnik.de/download/Protron-Pressure-Sensor-11_2014.pdf, 16.02.2018