

Veröffentlichung

Im Rahmen des SFB 880. www.sfb880.tu-braunschweig.de

Autoren

Beutel, Tobias;Niesel, Thalke;Leester-Schädel, Monika;Paces, Pavel;Büttgenbach, Stephanus

Titel

5-hole Probe with Integrated Sensing Devices for Measurement of High Frequency Pressure Fluctuations

Publisher o. Konferenz

Mikrosystemtechnik-Kongress, Darmstadt, Germany

Jahr

2011

Internet-Link (Doi-Nr.)

5-Loch-Sonde mit integrierter Sensorik zur Messung hochfrequenter Druckschwankungen

5-hole Probe with Integrated Sensing Devices for Measurement of High Frequency Pressure Fluctuations

Tobias Beutel¹, Thalke Niesel¹, Monika Leester-Schädel¹, Pavel Pačes² und Stephanus Büttgenbach¹

¹ Institut für Mikrotechnik, TU Braunschweig, Alte Salzdahlumer Straße 203, 38106 Braunschweig, Deutschland, t.beutel@tu-bs.de

² Department of Measurement, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University, Prague, Technická 2, 166 27, Praha 6 - Dejvice, Czech Republic

Kurzfassung

Bei der hier beschriebenen Anwendung werden mehrere mikrotechnisch hergestellte Silizium-Drucksensoren in einer 5-Loch-Sonde zur Vermessung von Strömungen verwendet. Die Sensoren, wurden von 3D-Mikrokräftensensoren [1] abgeleitet, so dass sie in der Lage sind, Druckdifferenzen zwischen 100 Pa und 120 kPa aufzunehmen. Sie basieren auf dem piezoresistiven Effekt. Die besondere Herausforderung liegt in der Reversibilität der Sensoren und der Linearität der Messsignale für Druckdifferenzen mit wechselndem Vorzeichen. Bei der Konstruktion der mechanischen, der pneumatischen sowie der elektrischen Anschlüsse wurde besonderer Wert auf die Reduzierung der benötigten Schlauchlänge gelegt. Zu diesem Zweck wurden die Drucksensoren innerhalb der Sondenhülle direkt hinter dem Sondenkopf platziert, wodurch die Schlauchlänge auf wenige Zentimeter reduziert werden kann. Die Dämpfung wird dadurch drastisch reduziert und auch hochfrequente Anteile der Druckschwankungen können gemessen werden. Mit dieser Information kann auch der Anstellwinkel (AOA) und der Schiebewinkel (SSA) bestimmt werden. Das System kann in Verbindung mit einem Air Data Computer (ADC) als Frühwarnsystem vor Auftriebsverlust (Stall) eingesetzt werden und so die Sicherheit im Luftverkehr erhöhen.

Abstract

In the presented application, multiple differential pressure sensors based on bulk micromachining of silicon are used to enable fluid measurements with a five-hole probe. The sensor's design has been derived from a 3D-micro force sensor enabling the measurement of differential pressures in a range of 100 Pa to 120 kPa. The sensors use the piezoresistive effect of doped silicon. The major challenge is the reversibility of the sensors and the linearity of the measurement signals. During the development of the mechanical, electrical and pneumatic subsystems the focus was on reducing the tube's length. The sensors were therefore placed close to the probe's head within the mounting pipe, enabling a tube length of only several centimetres. Damping is reduced significantly so that high frequency pressure fluctuations can be detected. With this information the angle of attack (AOA) and the sideslip angle (SSA) can be obtained. The system can be used as a sensing element in an Air Data Computer (ADC) to predict stalling of an airplane, thereby increasing air traffic safety.

1 Konzept des Gesamtsystems

Der Fokus bei der Auslegung des neuen Systems liegt nicht auf der geringen Größe des Gesamtsystems, da dies aus aerodynamischen Gründen nicht sinnvoll ist. Bei der Verwendung von Fünflochsonden verringert sich die zu messende Druckdifferenz mit der Reduzierung der Baugröße und dem resultierenden verringerten Abstand der Druckbohrungen zueinander stark. In dem hier beschriebenen Ansatz soll die Messung von höherfrequenten Druckschwankungen ermöglicht werden.

Neben der Mess- und Auswertungs elektronik muss auch der aerodynamisch wirksame Teil des Systems für diese Anforderungen ausgelegt sein. Im Speziellen sind dies der Probenkopf mit den Eingangsbohrungen, die druckführenden Schläuche sowie die Kavitäten auf der Ober- und

Unterseite des Sensors. Natürlich muss der Sensor selbst geeignet sein, die gewünschten minimalen Druckschwankungen in der angestrebten Frequenz aufzulösen. Zusätzlich muss er mechanisch den erwarteten Druckdifferenzen standhalten können.

Die genannten Anforderungen führen zu einem System mit mikrotechnisch hergestellten Sensoren, bei dem die Zuleitungen eine möglichst geringe Länge haben. Idealerweise müssten die Sensoren direkt hinter den Druckbohrungen liegen, was jedoch in Anbetracht des zur Verfügung stehenden Bauraumes unmöglich ist.

Aus den genannten Gründen wurde ein Konzept gewählt, bei dem drei Differenzdrucksensoren hinter einander aufgereiht auf einer Platine befestigt werden. Jeder einzelne Sensor wird durch zwei Aluminiumschalen von oben und unten gekapselt, so dass jeweils eine Kavität entsteht, die

mit Schläuchen zugänglich ist. Diese Schläuche werden auf kurzem Weg mit dem Sondenkopf verbunden. **Bild 1** zeigt alle relevanten Teile.

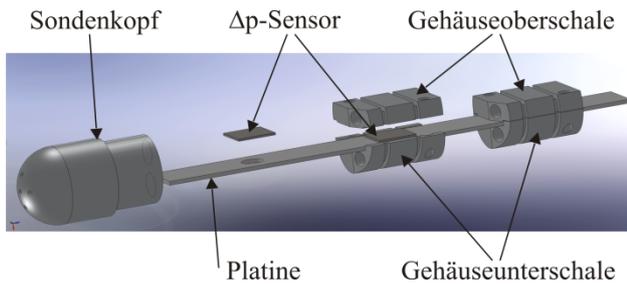


Bild 1 Schema aller mechanischen Komponenten innerhalb des Gehäuserohrs in Solid Works®.

Um ein Zufrieren der Druckmessbohrungen am Sondenkopf zu verhindern, ist die Platzierung einer Sondenheizung für den Einsatz an einem Flugzeug unerlässlich. Die konkreten Ansätze hierfür sind nicht Bestandteil dieser Auslegung, jedoch wird im Rahmen der Charakterisierung der Sensoren auf die Problematik der Temperaturschwankungen eingegangen.

2 Bestandteile des Systems

In diesem Kapitel werden die einzelnen Bestandteile des Systems (siehe **Bild 1**) hinsichtlich ihrer jeweiligen Eigenschaften beschrieben und ihr Beitrag zur Funktion des Systems bewertet.

2.1 Sondenkopf

Vor der Verwendung einer Fünflochsonde wurden mehrere Versuche zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften durchgeführt um die Ergebnisse mit den Resultaten der Strömungssimulationen (CFD) zu vergleichen. **Bild 2** zeigt eine Auswahl der gefertigten Sondenköpfe, die als Grundlage für die spätere Fünflochsonde dienen. Ihr Durchmesser beträgt zwischen 15 und 32 mm [5].



Bild 2 Varianten von verwendeten Sensorköpfen zur experimentellen Bestimmung ihrer aerodynamischen Eigenschaften.

Einige der Sondenköpfe wurden bereits mit dem bisherigen System, welches in [5] beschrieben ist, in Windkanal-

und Flugversuchen eingesetzt. Dabei wurden der Anstellwinkel und die Anströmgeschwindigkeit variiert. Aus diesen Versuchen ist bekannt, dass die zu messenden Druckdifferenzen zwischen 100 Pa und 120 kPa liegen.

2.2 Mikrotechnische Sensoren

Die verwendeten Sensoren wurden für diese Anwendung entwickelt und bestehen aus 100-Silizium. Grundlage für die Entwicklung waren Kraftsensoren, die beispielsweise als Taster in der dimensionellen Messtechnik, sowie in der Fertigungsmesstechnik oder für Reibkraftmessungen eingesetzt werden. Für ihre jeweilige Anwendung werden sie entsprechend modifiziert und auch als kombinierte Kraft- bzw. Drucksensoren eingesetzt [1]-[4]. Das Funktionsprinzip basiert auf dem piezoresistiven Effekt. Es wurden vier Wheatstonesche Vollbrücken je Sensor platziert, da diese Beschaltung eine gute Temperaturkompensation aufweist und zum anderen die Sensitivität des Systems vorteilhaft beeinflusst.

Bild 3 zeigt die relevanten mikrotechnischen Prozessschritte.

1. Diffusion der piezoresistiven Widerstände



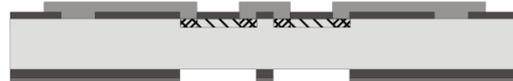
2. Diffusion der p-plus Bereiche



3. Strukturieren der Oxid-Schicht



4. Strukturieren der Metallleiterbahnen



5. KOH Ätzen

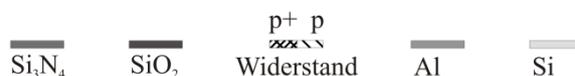
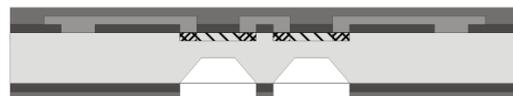


Bild 3 Relevante Prozessschritte während der mikrotechnischen Fertigung

Nach den beiden Diffusionsprozessen zur Erzeugung der piezoresistiven Widerstände wird zunächst eine SiO₂-Schicht zur elektrischen Isolation aufgebracht. Anschließend werden die Aluminiumleiterbahnen gesputtert und getempert. Von der Unterseite wird dann in einem nasschemischen Ätzprozess die Membran erzeugt, bei der ein zentraler Boss der Versteifung dient. Diese Versteifung sorgt für mechanische Stabilität und auch für eine

Konzentration der mechanischen Spannungen während der Messung, um möglichst hohe Widerstandsänderungen zu generieren.

2.3 Mechanische Bauteile

Die mechanischen Bauteile bestehen aus Aluminium und wurden in der institutseigenen Werkstatt gefertigt. Sie dienen zum Einen der Kapselung der Drucksensoren, zum Anderen aber auch der Fixierung des Gesamtsystems innerhalb der Sondenhülle. **Bild 4** zeigt die Abmessungen der Gehäuseteile.

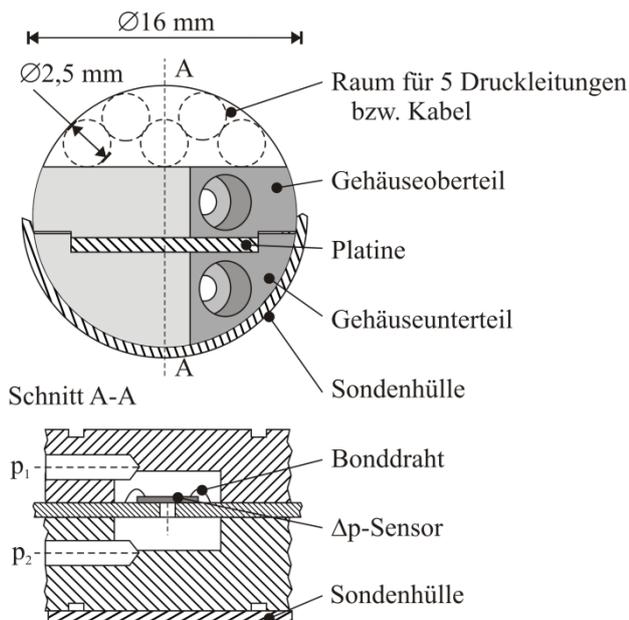


Bild 4 Abmessungen der Gehäuseteile zur Aufnahme der Platine, der Sensoren und zur Zentrierung innerhalb der Sondenhülle.

Das Gewicht beträgt etwa 6,65 g pro Gehäusepaar inklusive der Verschraubung. Stirnseitig ist eine Fläche abgefast, die mit Bohrungen versehen die Schlauchaufnahme darstellt. Die Schläuche können so auf die Anschlüsse gesteckt und durch die Platine zur Oberseite geführt werden. So ergibt sich ein minimaler Bauraum bei gleichzeitig geringstem Montageaufwand. Die Schläuche sind aus Tygon® und haben einen Innendurchmesser von 0,76 mm (Wandung = 0,86 mm). Natürlich haben auch diese Schläuche einen Einfluss auf die Messfrequenz, da sie recht dünn sind und somit ein hohes Länge/Durchmesser Verhältnis haben. Das führt zu einem Tiefpassverhalten [6]. Das Gesamtgewicht aller Teile inklusive Kopf, Platine, Schläuche, Sensoren und Kabeln beträgt etwa 25 g.

2.4 Elektrische Bauteile

Neben den Sensoren befinden sich die Platine und die elektrischen Zuleitungen in der Sondenhülle. Die Platine ist aus 0,8 mm dickem FR4 Material mit 35 µm Kupferauflage. Die Sensoren werden zunächst auf der Platine fixiert, so dass der Sensorrahmen luftdicht mit der Platine

verbunden ist. So wird ein Druckausgleich zwischen Ober- und Unterseite verhindert. Der elektrische Kontakt zwischen Sensor und Platine wird mit Bonddraht realisiert, die mit niedrigem Loop ausgeführt werden um die Kapselung möglichst flach gestalten zu können (siehe **Bild 4** unten).

Die elektrischen Zuleitungen werden mit speziellen Kabeln realisiert, welche einen Außendurchmesser ähnlich dem der Schläuche haben (ca. 2,5 mm). So können die elektrischen Zuleitungen an der gleichen Stelle im oberen Teil der Hülle nach hinten zur Auswertungs elektronik herausgeführt werden. Eine Unterbringung der Auswertungs elektronik direkt neben dem Sensor wäre zukünftig denkbar.

3 Ergebnisse

Die Simulation der Eigenfrequenz der Sensoren ergibt Frequenzen zwischen $1,44 \cdot 10^9$ Hz und $1,51 \cdot 10^9$ Hz je nach Ausführung der Membran [7]. Grundsätzlich sind die Sensoren also für derartige Messungen geeignet, frequenzlimitierend wirken nur die DAQ-Systeme und wie beschrieben, die pneumatischen Zuleitungen. Bei den vorgestellten Messungen wurde ein NI USB-6259 Gerät mit einer Abtastrate von maximal 1,25 MS/s (Einkanalbetrieb) bei 16-bit Auflösung verwendet. Dies reicht für die vorliegende Anwendung aus und ermöglicht die Messung von strömungsinduzierten Druckschwankungen. Die Messsignale der Drucksensoren wurden dabei mit einem Dewetron Messverstärker verstärkt um die Auflösung zu maximieren. Der Verstärkungsfaktor während der Messungen lag bei 500 mV/V bei 5 V Brückenspannung.

Die Auflösung des Sensorsystems wurde in einer Druckkammer überprüft und lieferte die in **Bild 5** dargestellten Ergebnisse. In der Abbildung ist die verstärkte Ausgangsspannung über dem Referenzdruck aufgetragen. Als Druckreferenz dient ein Absolutdrucksensor (0-10 bar abs.; 0,01%FS) der Keller AG, CH.

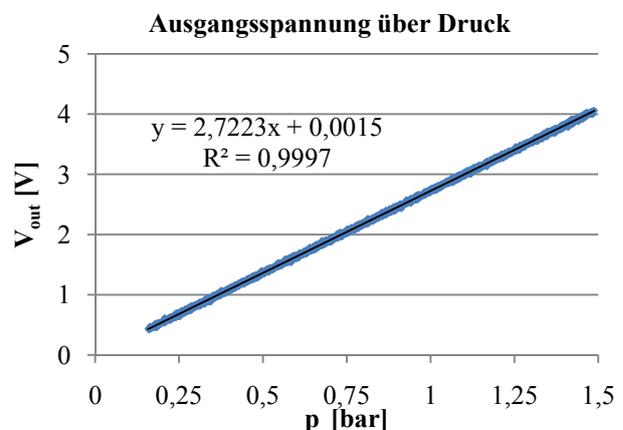


Bild 5 Darstellung der Messergebnisse

Bei den Messungen wurden eine Versorgungsspannung von 2,5 V und ein Verstärkungsfaktor von 1000 V/mV verwendet.

Die Auflösung (least significant bit (LSB)) des DAQ-Systems ergibt sich rechnerisch zu

$$Q = \frac{\Delta U}{2^{16} - 1} = \frac{10V}{2^{16} - 1} = 1 \text{ LSB} \approx 0,1526 \text{ mV}$$

Mit Hilfe der Steigung m aus **Bild 5** kann somit die maximale Auflösung S_{max} berechnet werden. Sie gibt sich zu

$$S_{max} = \frac{1 \text{ LSB}}{m} = \frac{0,1526 \text{ mV}}{2,7223 \text{ V/bar}} \approx 0,56 \text{ mbar}$$

In der Praxis stellt sich jedoch heraus, dass das ungefilterte Messsignal um etwa 6,1 mV rauscht und die rechnerisch ermittelte Auflösung nicht erreicht werden kann.

Bild 5 zeigt etwa 4000 Messergebnisse die in mehreren aufeinander folgenden Zyklen bei steigendem und sinkendem Druckverlauf aufgenommen wurden. Die dabei erreichte Genauigkeit im geforderten Messbereich (0-1,2 bar) liegt damit praktisch bei $\pm 0,02$ bar, was für die vorliegende Anwendung etwas zu gering ist.

Der lineare Zusammenhang zwischen Druck und Ausgangsspannung ist deutlich zu erkennen.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass es möglich ist, eine 5-Loch-Sonde inklusive der Druckmesstechnik in einem Rohr von 16 mm Außendurchmesser unterzubringen. Alle mechanischen und elektronischen Komponenten wurden für diesen Zweck entsprechend ausgelegt und gefertigt. Der Sensor scheint für diese Anwendung bestens geeignet zu sein, wie die beschriebenen Untersuchungen zeigen.

Die Sensoren sind zur besseren Handhabbarkeit mit einer 45 μm dicken Membran ausgestattet, die mit bis zu 4 bar belastet werden kann. Die Sensorik erreicht damit 0,5% FS. Eine Reduzierung der Membrandicke führt zu einer erhöhten Genauigkeit, allerdings auch zu einer mechanischen Schwächung, was für den engen Druckbereich jedoch angemessen ist. Die Anpassung der Membran an den hier geforderten Messbereich würde die Leistungsfähigkeit deutlich erhöhen.

In näherer Zukunft muss der genaue Einfluss der pneumatischen Druckleitungen evaluiert werden. Das Totvolumen innerhalb der Schläuche wirkt dämpfend, was in weiteren Versuchen zu quantifizieren ist. Ebenso ist die Abstrategie deutlich zu erhöhen um durch digitale Filterung den Einfluss des Rauschens zu minimieren.

5 Danksagung

Die Autoren danken den Technischen Mitarbeitern für Ihre Unterstützung. Ein besonderer Dank gilt der Werkstatt für die mühevollen Arbeit an den Gehäuseteilen.

6 Literatur

- [1] Tibrewala, A.; Phataralaoaha, A; S. Büttgenbach: Simulation, fabrication and characterization of a 3D piezoresistive force sensor, *Sensor and Actuator A*, Vol. 147, pp. 430-435, 2008.
- [2] Beutel, T.; Ferreira, N.; Balck, A.; Leester-Schädel, M.; Büttgenbach, S.: Cell Manipulation System Based on a Silicon Micro Force Sensor with Self-Calibration from Backside, in *Digest Tech. Papers IEEE Sensors 2010 Conference (ISBN 978-1-4244-8168-2)*, pp. 1149-1423, 2010.
- [3] Graecy, W.: Summary of methods of measuring angle of attack on aircraft", NACA technical note 4351, Langley Aeronautical Laboratory Langley Field VA, 1953.
- [4] Beutel, T.; Leester-Schädel, M.; Wierach, P.; Sina-pius, M.; Büttgenbach, S.: Novel Pressure Sensor for Aerospace Purposes; *Sensors & Transducers Journal (ISSN 1726-5479)*, Vol.115, Issue 4, April 2010; pp. 11-19, 2010.
- [5] Pačes, P.; Draxler, K.; Čenský, T.; Hanzal, V.; Vaško, O.: A Combined Angle of Attack and Angle of Sideslip Smart Probe with Twin Differential Sensor Modules and Doubled Output Signal; in *Digest Tech. Papers IEEE Sensors 2010 Conference, (ISBN 978-1-4244-8168-2)*, pp. 284-289, 2010.
- [6] Triebstein, H.: Entwicklung und Errichtung eines Versuchsstands zur Messung instationärer Druckverteilungen an schwingenden Modellen im transsonischen Windkanal der AVA, Teil 3: Theoretische und experimentelle Untersuchungen des dynamischen Verhaltens von Druckübertragungsleitungen; *Aerodynamische Versuchsanstalt Göttingen*, 68 J 04, Göttingen, 1965.
- [7] Beutel, T.; Ferreira, N.; Leester-Schädel, M.; Büttgenbach, S.: Robust pressure sensor for measurements in boundary layers of liquid fluids with medium total pressures; *proceedings SPIE Microtechnologies; Prague, Czech Republic, in print, 2011.*