
Mikrotechnische Sensorik für aktive Hochauftriebssysteme

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde
eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Tobias Thomas Beutel
aus Nürnberg

eingereicht am: 18.02.2013

mündliche Prüfung am: 12.06.2013

Referenten: Prof. Dr. rer. nat. Stephanus Büttgenbach

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Rolf Radespiel

2013

Berichte aus der Mikro- und Feinwerktechnik

herausgegeben von Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach

Band 34

Tobias Beutel

**Mikrotechnische Sensorik
für aktive Hochauftriebssysteme**

Shaker Verlag
Aachen 2013

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2013

Copyright Shaker Verlag 2013

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2063-2

ISSN 1433-1438

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort und Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Mikrotechnik der Technischen Universität Braunschweig in der Zeit von März 2009 bis Februar 2013. Sie wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft im Rahmen des Sonderforschungsbereichs SFB 880 „Grundlagen des Hochauftrieb künftiger Verkehrsflugzeuge“ ab dem 1. Januar 2011 gefördert. Innerhalb dieses Sonderforschungsbereichs beschäftigte ich mich mit dem Teilprojekt B2 „Adaptive Systeme für die Strömungserfassung und -beeinflussung“.

Mein Dank gilt an erster Stelle dem mittlerweile ehemaligen Institutsleiter, Prof. Dr. rer. nat. S. Büttgenbach als meinem Doktorvater, der mir von Beginn an viel Vertrauen entgegenbrachte. Durch ihn und die gute Zusammenarbeit mit Frau Dr.-Ing. Leester-Schädel konnte aus einer Konzeptstudie ein Teilprojektantrag im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 880 werden. Für die Genehmigung seitens der DFG bedanke ich mich ausdrücklich.

Bedanken möchte ich mich ebenso bei allen Kolleginnen und -kollegen, die zu meiner Arbeit beigetragen haben. Ein besonderer Dank gebührt den Technischen Mitarbeiterinnen Barbara Mattheis, Bettina Thürmann und Anke Vierheller, sowie Jürgen Büsing für die kontinuierliche Wartung der Anlagen im Reinraum und Stefan Schieseck für die Hilfe bei Computerausfällen. Ein großer Dank gilt den vielen Studenten die mit Ihrem Wirken die Arbeit unterstützt haben. Ohne die anregenden Gespräche zu unterschiedlichsten Fragestellungen wären viele Ansätze nicht so erfolgreich umgesetzt worden.

Meinem Freund und Corpsbruder Hartmut Schott danke ich für das Korrekturlesen und die langjährige Begleitung beim Genuss der akademischen Freiheit. Besonderer Dank gilt meinen Eltern für die Ermöglichung meiner Ausbildung und meiner Frau Claudia, sowie meiner Tochter Charlotte, für die schöne Zeit neben der Arbeit im Institut.

Kurzfassung

Die ständig steigenden Anforderungen an sämtliche technische Gerätschaften vom Mobiltelefon über Automobile bis hin zu Flugzeugen machen den Einsatz neuer Technologien notwendig. Besonders die Wünsche nach Effizienz, Kompaktheit und Emissionsreduzierung sind dabei in den letzten Jahren in den Mittelpunkt gerückt. In vielen dieser Bereiche kommt die Mikrosystemtechnik zum Einsatz, häufig wenn es darum geht, viele Funktionen auf engem Raum zu integrieren. Dabei spielt die verwendete Elektronik eine wesentliche Rolle.

In dieser Arbeit wird ein Sensorkonzept erarbeitet, das zur Strömungsanalyse an Tragflächen von Flugzeugen verwendet werden kann. Dabei geht es um die Erfassung von Ablösungserscheinungen an einer Hochauftriebskonfiguration. Das Endergebnis ist ein Regelungssystem, das in Zukunft die Effizienz des Tragflügels steigern und die Lärmemission deutlich reduzieren soll. Dabei darf das Messsystem die Strömung selbst nicht stören und muss die hohen Anforderungen nach geringer Größe, Gewicht und Energieverbrauch einhalten.

Als geeignetes Konzept wird ein piezoresistiver Drucksensor auf Siliziumbasis identifiziert, der für Grundlagenversuche an einem Wasserkanalmodell entwickelt wird. Dabei sind die Robustheit, die hohe Messfrequenz und die zu erreichende Genauigkeit die Schlüsselkriterien. Parallel dazu werden Heißfilmsensoren auf flexiblen Folien entwickelt, um die Strömungsverhältnisse auf einer stark gekrümmten Hochauftriebsklappe analysieren zu können. Die weitere Miniaturisierung ist dabei nicht das vorherrschende Ziel, vielmehr geht es um die Erhöhung der Verlässlichkeit und der Robustheit dieser Sensortypen.

Die Arbeit präsentiert die ersten Prototypen beider Sensorarten, wobei der gesamte Entwicklungsprozess von der Simulation bis zur Fertigung beschrieben wird. Ergänzend dazu werden die bisher erzielten Messergebnisse präsentiert, die mit den eigens für diesen Zweck entworfenen Messaufbauten erreicht wurden. Im letzten Kapitel wird ein Ausblick auf die Tätigkeiten in der zweiten Projekthälfte gegeben.

Abstract

The ever increasing demands on all technical equipment starting from mobile phones, to automobiles ending with airplanes require the use of new technologies. Especially the desires for efficiency, compactness and the reduction of emissions are in the centre of interest in recent years. In many applications micro system technologies are coming into operation, often when many functions have to be integrated in limited space. Therein the applied electronics play an important role.

In this work a sensor concept suitable for flow analyses on airfoils is developed. Thereby flow separation on a high lift configuration has to be detected. The final outcome is a control system, which increases the efficiency of the airfoil and reduces the emission of noise in future. The sensing system itself has to measure nonintrusive and has to meet the high requirements regarding the size, weight and power consumption.

As a suitable concept a piezoresistive, silicon based pressure sensor is identified, being developed for basic experiments in a water tunnel. Herein the robustness, the high measurement frequency and the achievable accuracy are the key criteria. In parallel, hot-film sensors on flexible foils are developed to be able to analyse the state of the flow on a strongly curved high-lift flap. The further miniaturization is not the dominant goal, but to increase the reliability and the robustness of these types of sensors.

The work shows the first prototypes of both sensors, giving a detailed description of development process from the simulation until the micro fabrication. Additionally the results achieved up to now are presented, which have been determined on test rigs set-up specifically for this application. In the last chapter an outlook is provided.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Konzept und Randbedingungen.....	5
2.1	Randbedingungen	10
2.2	Auswahl der Messprinzipien	13
2.3	Konzeptvorstellung.....	17
3	Druck- und Wandschubspannungsmessung in der Strömungsmesstechnik	23
3.1	Grundlagen der Druckmessung	23
3.1.1	Stand der Technik.....	26
3.1.2	Kommerziell erhältliche Drucksensoren.....	28
3.1.3	Stand der Forschung.....	31
3.2	Grundlagen der Wandschubspannungsmessung	33
3.2.1	Stand der Technik - Heißfilmanemometrie.....	36
3.2.2	Besonderheiten bei der Anwendung in Wasser	38
3.2.3	Kommerziell erhältliche Heißfilmsensoren	41
3.2.4	Stand der Forschung.....	42
3.3	Technologische Bedeutung der ortsnahen Messung von Druck und Geschwindigkeit in einer Grenzschicht und realisierte Sensoren	43
3.4	Forschungsbedarf.....	45
4	Verwendete Technologien.....	49

4.1	Grundlagen zur Mikrotechnik und zu piezoresistiven Drucksensoren ..	49
4.1.1	Bulksilizium-Mikromechanik	50
4.1.2	Erzeugen von piezoresistiven Widerständen.....	51
4.1.3	Entwicklung von piezoresistiven Drucksensoren	57
4.2	Grundlagen der Bearbeitung von flexiblen Substraten	60
4.2.1	Verwendete Materialien	62
4.2.2	Möglichkeiten der Bearbeitung.....	64
4.3	Prozessbeschreibungen	66
4.3.1	Drucksensor	66
4.3.2	Bondwafer	68
4.3.3	Flexible Heißfilmarrays.....	69
5	Entwicklung der Sensorik.....	73
5.1	Untersuchungen an Drucksensoren	73
5.1.1	Membranauslegung	74
5.1.2	Anodisches Bonden	78
5.1.3	Sensitivität	80
5.1.4	Eigenfrequenz.....	84
5.1.5	Vorstellung der erarbeiteten Sensorvarianten	86
5.2	Experimentelle Untersuchungen an den Heißfilmen.....	88
5.2.1	Resistivität	90
5.2.2	Temperaturbeiwert und Sensitivität	94

5.2.3	Gefertigte Heißfilmvarianten	99
6	Experimentelle Charakterisierung und Vergleiche	107
6.1	Drucksensorik	107
6.1.1	Numerische Untersuchungen an piezoresistiven Messbrücken	108
6.1.2	Quasistatische Druckmessung	112
6.1.3	Digitale Messung für den Einbau in beengten Räumen	120
6.1.4	Fünf-Loch-Sonde	130
6.2	Heißfilmanemometrie	134
6.2.1	Beschaltung der Sensoren	134
6.2.2	Quantitative Bestimmung der Wandschubspannung	138
6.2.3	Dynamische Kalibrierung	141
6.2.4	Einsatz in Wasser	142
6.3	Einbettung in Faserverbundmaterial	144
6.4	Kombinierte Druck- und Heißfilmmessung	146
7	Zusammenfassung und Ausblick	151
8	Literaturverzeichnis	155
8.1	Quellen und weiterführende Literatur	155
8.2	Betreute studentische Arbeiten	163
8.3	Eigene Veröffentlichungen	165
9	Anhang	169
9.1	Symbol und Abkürzungsverzeichnis	169
9.1.1	Formelzeichen	169

9.1.2	Indizes.....	171
9.1.3	Abkürzungen	171
9.2	Verwendete Anlagen.....	173
9.3	Prozesspläne.....	174
9.3.1	Drucksensor	174
9.3.2	Glasverschluss	183
9.3.3	Heißfilmsensor auf Polyimid-Folie.....	186