

# Flexible Heißfilm-Anemometrie-Arrays zur Strömungsmessung an gekrümmten Strukturen

## Flexible hot-film anemometer arrays for flow measurements on curved structures

Martin Schwerter, Tobias Beutel, Monika Leester-Schädel, Andreas Dietzel und Stephanus Büttgenbach, Institut für Mikrotechnik, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany, [m.schwerter@tu-bs.de](mailto:m.schwerter@tu-bs.de)

### Kurzfassung

In dieser Arbeit werden der Entwurf, die Herstellung und die Charakterisierung von neuartigen flexiblen AeroMEMS-Heißfilmsensorarrays beschrieben. Als Substrat wird ein Polyimid verwendet, das entweder als fertige Folie vorliegt oder flüssig aufgeschleudert werden kann. Mit letzterem lassen sich Sensorhöhen bis hinab zu 7  $\mu\text{m}$  realisieren.

Für die Herstellung der sensitiven Schicht werden zunächst mit verschiedenen Materialien Versuche zur Leitfähigkeit und zum Temperaturkoeffizienten durchgeführt und bewertet, sodass dann ein Sensor mit den gewünschten Eigenschaften hergestellt werden kann.

In der Arbeit wird die vollständige Entwicklung, beginnend bei den theoretischen Überlegungen, bis hin zur mikrotechnischen Produktion, beschrieben. Dabei wird das nasschemische Ätzen vertieft diskutiert, da es einen besonders kritischen Einfluss auf die Eigenschaften des Sensors hat.

### Abstract

The paper describes the design, manufacturing and characterization of new flexible AeroMEMS-hot-film sensor arrays. The sensor substrate can be manufactured using either commercial polyimide foils or using spin-on liquid polyimide. With the liquid polyimide a sensor thickness down to 7  $\mu\text{m}$  can be achieved.

Prior to the manufacturing of the sensor arrays different material tests concerning the conductivity and the temperature coefficient of resistivity had to be performed in order to define the best material for the desired sensor properties.

The whole development, beginning with theoretical considerations and ending with micro production and sensor characterization, is described. A detailed discussion is given for the wet etching process, which has a critical influence on the sensor characteristics.

## 1 Einleitung

In den letzten Jahren wurden unterschiedliche mikro-mechatronische Sensoren zur Strömungsmessung entwickelt. Bei diesen wurde zunächst auf ein festes Substrat, wie z.B. Glas oder Silizium, zurückgegriffen. Diese in der Mikrotechnik vielfach verwendeten Materialien sind starr und vergleichsweise dick. Bei Strömungsmessungen auf Tragflächen, die gewöhnlich leicht gekrümmt sind, können Sensoren mit einem solchen Substrat somit nur beschränkt oder mit einem vergleichsweise großem Einbauaufwand verwendet werden.

Aus dieser Anforderung heraus bietet sich die Herstellung von Sensoren auf flexiblem Substrat an (Bild 1). Diese können sich der Kontur einer Tragfläche anpassen und sind somit besser verwendbar.

Für besonders genaue Strömungsmessungen müssen diese Sensoren dennoch in einer Kavität platziert werden, um nicht die Strömung zu beeinflussen. Die in diesem Beitrag vorgestellten Heißfilmsensoren auf Basis eines aufgeschleuderten Polyimids sind dagegen so dünn, dass sie die Strömung in den üblichen Messungen nicht im kritischen Maße beeinflussen, auch wenn die Sensoren lediglich auf die Oberfläche aufgebracht werden.

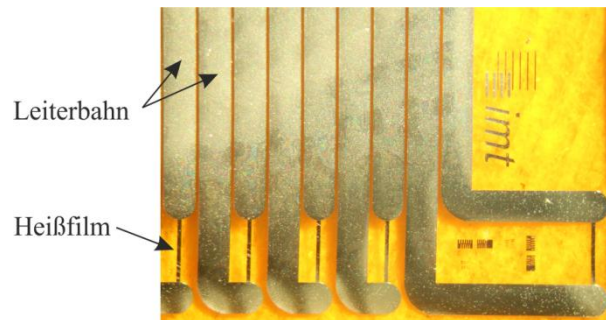


Bild 1 Heißfilmarray auf Polyimidfolie

## 2 Theorie

Die allgemeine Theorie der Heißfilmanemometrie wurde bereits ausführlich beschrieben, insbesondere von L. V. King [1]. Ein stromdurchflossener Leiter nimmt eine bestimmte Leistung  $P$ , die von dem Strom  $I$  und dem Widerstand  $R$  des Leiters abhängt, auf und dissipiert diese als Wärme [2].

Diese Wärmeabgabe kann in drei verschiedene Arten unterteilt werden. Hierbei handelt es sich um die Wärmeleitung  $Q_{\text{Leitung}}$ , die Strahlung  $Q_{\text{Strahlung}}$  und die Konvektion  $Q_{\text{Konvektion}}$ . Letztere ist für den sensitiven Effekt verantwortlich, wohingegen zusätzliche

Wärmeleitung und Strahlung den sensorischen Effekt eher beeinträchtigen.

Die konvektive Wärmeübertragung hängt von dem Wärmeübertragungskoeffizienten  $h$ , der Oberfläche  $A$  sowie dem Temperaturunterschied zwischen Heißfilmtemperatur  $T$  und Umgebungstemperatur  $T_{20}$  ab (**Formel (1)**). Der Wärmeübertragungskoeffizient selbst ist wiederum auch von  $T-T_{20}$  abhängig.

$$Q_{Konvektion} = hA(T - T_{20}) \quad (1)$$

Für die Gesamtbilanz folgt somit **Formel (2)**. Hier fällt auf, dass sowohl eine Änderung der Heißfilmtemperatur als auch des Wärmeübertragungskoeffizienten zu einer Widerstands- oder Stromänderung im Heißfilm führen wird. Die Oberfläche verändert sich im Betrieb nicht und kann als konstant angenommen werden. Die Umgebungstemperatur sollte ebenfalls konstant gehalten werden oder zumindest bekannt sein.

$$P = R \cdot I^2 = hA(T - T_{20}) + Q_{Leitung} + Q_{Strahlung} \quad (2)$$

Der Wert des Wärmeübertragungskoeffizienten  $h$  ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig, sodass über diesen die eigentliche Strömungsmessung erfolgen kann. Gleichzeitig kommt es bei einer Heißfilmtemperaturänderung zu einer Widerstandsänderung, sodass hier eine weitere, für die Funktion des Sensors notwendige Abhängigkeit entsteht.

Im Betrieb kann nun versucht werden, einen Teil der Variablen konstant zu halten. Es wären somit beispielsweise die folgenden Betriebsarten denkbar:

*Konstant-Strom-Betrieb:* Der Strom  $I$  wird konstant gehalten. Bei einer Änderung des Wärmeübertragungskoeffizienten  $h$  ändert sich ebenfalls der Widerstand  $R$ , der sich leicht messen lässt. Es kommt jedoch auch zu einer Änderung der Heißfilmtemperatur  $T$ , sodass ein Durchbrennen nicht ausgeschlossen werden kann.

*Konstant-Temperatur-Betrieb:* Mithilfe einer regelnden Schaltung wird die Temperatur  $T$  des Sensors konstant gehalten. Da sich dadurch der Widerstand  $R$  des Sensors ebenfalls nicht ändert, bewirkt eine Strömungsänderung nur eine Variation des Sensorbetriebsstromes  $I$ , welcher sich messen lässt [2].

### 3 Herstellung

Zur Herstellung der flexiblen Sensorarrays muss zunächst ein den Anforderungen gerechtes Substrat gewählt werden. Zunächst wurde eine Polyimidfolie des Typs Kapton gewählt, die eine Dicke von lediglich 25 µm aufweist. Die Folie wird zur Bearbeitung temporär auf einem Glaswafer aufgebracht (**Bild 2**, A.1.). Der Glaswafer ist vor allem für nachfolgende Sputter- und Belackungsschritte notwendig, da geräteseitig nur starre Wafer prozessiert werden können.

Als Alternative zur Polyimidfolie hat sich das Aufschleudern von flüssigem Polyimid (z.B. PI2611, HD MicroSystems) bewährt. Hierzu wird zunächst ein Glaswafer am Rand mit einem Primer versehen (B1.1), der die

Haftung der Polyimidschicht verbessert. Erst dann folgt der Aufschleuderprozess des Polyimids (B1.2). Dieses muss nachfolgend auf einer Hotplate erwärmt und im Vakuumofen ausgehärtet werden.

Die Schichtdicke des Polyimids lässt sich über die Wahl des Polyimidausgangsmaterials und der Aufschleudergeschwindigkeit variieren. Hierbei sind Schichtdicken von 25 µm bis zu 5 µm pro Beschichtung möglich.

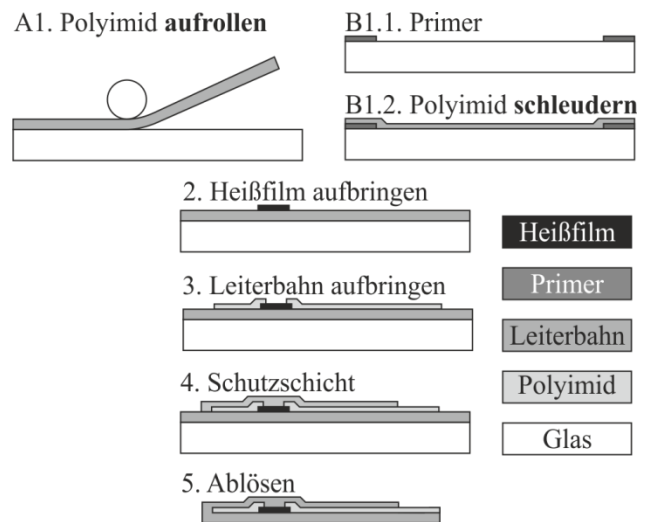
Soll dagegen die Schichtdicke erheblich vergrößert werden, so kann der Aufschleuderprozess mehrfach wiederholt werden. Hierzu wird jeweils vor der Herstellung der nächsten Polyimidschicht die vorangegangene Schicht im Sauerstoffplasma angeraut. Danach kann der bereits beschriebene Prozess wiederholt werden.

Nach der Herstellung des Polyimidsubstrats folgt das Sputtern des Heißfilmmaterials. Die Wahl des richtigen Heißfilmmaterials wird in Abschnitt 4 näher erläutert.

Die Heißfilmstrukturen werden nachfolgend aus der abgeschiedenen Schicht herausgeätzt (2.).

Danach folgt die Herstellung der Zuleitungen. Diese können aus gesputtertem Kupfer oder Gold (für Messungen unter Wasser) bestehen. Im Fall der Kupferleiterbahnen kann zur Widerstandsverringern die Dicke der Leiterbahn in einer nachfolgenden Galvanik vergrößert werden (3.).

Eine optionale weitere Deckschicht aus Polyimid, die nach der Herstellung der Leiterbahnen aufgebracht wird, dient der Passivierung und dem Schutz. Die elektrischen Kontaktierungen und ggf. die Sensorelemente können per Laser oder Ätzen wieder freigelegt werden (4.).

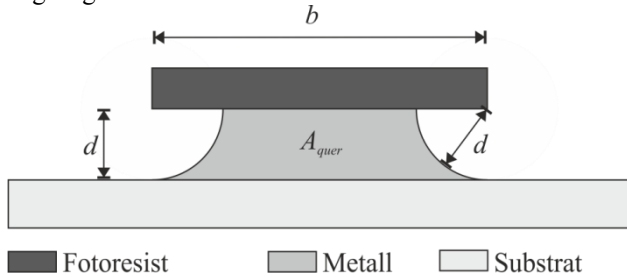


**Bild 2** Herstellung von Heißfilmsensoren mittels Polyimidfolie (A) und aufgeschleudertem Polyimid (B)

Zum Schluss müssen die Sensoren von dem temporären Glassubstrat wieder gelöst werden. Im Fall der Polyimidfolie wird der Wafer in Lösungsmittel gelegt und so die Klebeverbindung gelöst.

Sensoren aus flüssigem Polyimid lassen sich von dem Glaswafer wieder abziehen, wenn zunächst innerhalb der Primerumrandung der Sensor herausgeschnitten wird (5.).

Das Strukturieren der Leiterbahnen und Heißfilmsensoren wird mittels nasschemischen Ätzens durchgeführt. Aufgrund des isotropen Ätzvorganges wird die schützende Fotolackschicht unterätzt. Dies führt zu dem in **Bild 3** dargestellten Querschnitt  $A_{quer}$ , der bei der Berechnung des Kaltwiderstandes (siehe Abschnitt 4.1) beachtet werden muss. Während der zunächst zu erwartende, nicht unterätzte Querschnitt das Produkt der Heißfilmbreite  $b$  und der Filmdicke  $d$  ist, müssen unter Berücksichtigung der Unterätzung die Viertelkreisflächen hiervon wieder abgezogen werden.



**Bild 3** Sensorquerschnitt nach isotropem Ätzen

Soweit den Autoren bekannt, wurde die Verwendung von flüssigem Polyimid als Substrat für derartige Sensoren trotz guter mechanischer Eigenschaften noch nicht vorher gezeigt.

## 4 Tests und Ergebnisse

Es müssen mehrere Tests durchgeführt werden, um einerseits die Sensoreigenschaften zu ermitteln und andererseits zukünftige Sensoren iterativ optimieren zu können.

### 4.1 Kaltwiderstand und Resistivität

Aus dem Widerstand des Sensorelements bei Raumtemperatur (Kaltwiderstand) sowie dem Temperaturkoeffizienten lässt sich der im Betrieb verwendbare Widerstandsbereich berechnen. Der Kaltwiderstand  $R$  eines Sensorelements lässt sich bei gegebener Resistivität  $\rho$  eines Materials aus der Länge  $l$  und dem Querschnitt  $A_{quer}$  des Elements berechnen (**Formel (3)**). Im Umkehrschluss lässt sich die Geometrie des Elements so anpassen, dass sich bei gegebener Resistivität ein gewünschter Kaltwiderstand einstellt.

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A_{quer}} \quad (3)$$

Die Resistivität ermöglicht einen Vergleich zwischen dem Heißfilmmaterial und den zugehörigen Literaturwerten und somit eine Bewertung des Heißfilmelements. Ferner kann die Geometrie zukünftiger Sensoren den gemessenen Werten angepasst werden.

Eine Auswahl verschiedener gemessener Materialien und zugehöriger Literaturwerte werden in **Tabelle 1** dargestellt.

Material (a-z)	Resistivität $\rho$ ( $\Omega m$ ) aus Messung	Resistivität $\rho$ ( $\Omega m$ ) aus [3], [4], [5], [6]
Aluminium (Al)	$7,45 \cdot 10^{-8}$	$2,65-2,9 \cdot 10^{-8}$
Gold (Au)	$6,46 \cdot 10^{-8}$	$2,1-2,4 \cdot 10^{-8}$
Nickel (Ni)	$29,70 \cdot 10^{-8}$	$6,5-9,5 \cdot 10^{-8}$
Titan (Ti)	$197,00 \cdot 10^{-8}$	$42,0-47,0 \cdot 10^{-8}$

**Tabelle 1** Resistivität verschiedener Materialien bei 20 °C

### 4.2 Temperaturkoeffizient

Der Temperaturkoeffizient  $\alpha$  dient zum Berechnen eines beliebigen Widerstandswertes bei gegebener Heißfilmtemperatur oder umgekehrt.

Dieser Wert stellt eine Vereinfachung der nichtlinearen Temperatur-Widerstandskurve dar.

Zur Berechnung des Temperaturkoeffizienten  $\alpha_{20}$  (bezogen auf Raumtemperatur 20 °C) wird der Widerstand  $R_{20}$  bei 20 °C ( $T_{20}$ ) und der Widerstand  $R$  bei der Messtemperatur  $T$  gemessen. Die Berechnung erfolgt dann nach **Formel (4)**.

$$\alpha_{20} = \frac{1}{T - T_{20}} \cdot \left( \frac{R}{R_{20}} - 1 \right) \quad (4)$$

Mittels einer geregelten Klimakammer wurden die Temperaturkoeffizienten einiger Materialien ermittelt, welche zunächst in Vorversuchen auf Glas (statt Polyimid) gesputtert wurden.

Material (a-z)	$\alpha$ (1/K) aus Messung	$\alpha$ (1/K) aus [7]
Aluminium (Al)	0,0031	0,0039
Gold (Au)	0,0028	0,0039
Nickel (Ni)	0,0049	0,0067

**Tabelle 2** Temperaturkoeffizienten ausgewählter Materialien

Es fällt auf, dass Nickel den höchsten Wert und damit die höchste Sensitivität hat. Daher wurde für die Heißfilmsensoren auf Polyimidsubstrat Nickel als Heißfilmmaterial gewählt.

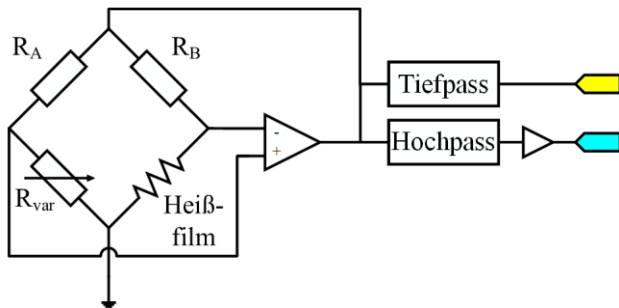
### 4.3 Sensorbetrieb

Wie bereits in Abschnitt 2 erwähnt, sind mehrere Betriebsarten möglich.

Im Konstant-Temperatur-Betrieb wird die Temperatur des Sensors mittels einer Regelung stabil gehalten. Dadurch wird ein Überhitzen des Sensorelements bei Temperaturschwankungen vermieden, sodass ein Durchbrennen auch bei vergleichsweise hohen Messtemperaturen nicht oder nur sehr selten auftritt. Die Wahl einer hohen Messtemperatur ist sinnvoll, da die Sensitivität steigt.

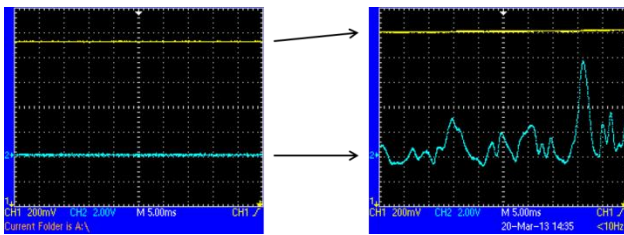
In **Bild 4** wird das Schaltungsprinzip dargestellt. Das Ausgangssignal entspricht der Rückführschleife der Regelung. Mittels einer Auftrennung in Tief- und Hoch-

passsignal kann zwischen der durchschnittlichen Strömung und schnellen Änderungen (z.B. in Turbulenzen) unterschieden werden. Der Tiefpass ist auf eine Grenzfrequenz von 10 Hz sowie der Hochpass auf 3 Hz ausgelegt [8].



**Bild 4** Konstant-Temperatur-Schaltung

Das Ausgangssignal dieser Schaltung wird in **Bild 5** dargestellt. Es ist deutlich zu erkennen, dass das niederfrequente Signal im überströmten Betrieb ansteigt und somit mehr Leistung zum Aufrechterhalten der Temperatur benötigt wird. Das hochfrequente Signal repräsentiert turbulente Erscheinungen in der Strömung.



**Bild 5** Per Tief- (obere Kurve) und Hochpass (untere Kurve) gefiltertes Ausgangssignal der Heißfilmschaltung; nicht überströmt (links) und in turbulenter Strömung (rechts)

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Sehr dünne und flexible Heißfilmsensoren lassen sich, wie in diesem Beitrag vorgestellt, sowohl auf klassischer Polyimidfolie als auch auf Substraten aus flüssigem Polyimid fertigen. In beiden Fällen erreichen die Sensoren eine hohe Sensitivität. Ihre Funktionsfähigkeit konnte unter Verwendung einer üblichen Konstant-Temperatur-Schaltung gezeigt werden.

Mit Hilfe des flüssigen Polyimids konnten extrem dünne Sensorfolien realisiert werden, wie sie nach dem Kenntnisstand der Autoren kommerziell nicht erhältlich sind.

Eine genaue Charakterisierung der Sensoren bezüglich ihres Hochfrequenzverhaltens steht noch aus. Hierzu wird ein Übertragungsverhalten für definierte Frequenzen experimentell ermittelt.

Ferner soll der Sensor auch hinsichtlich seiner langfristigen Haltbarkeit unter Wasser getestet werden. Hierbei sollen ungeschützte und mittels einer Polyimid-schutzschicht geschützte Sensoren verglichen werden.

## 6 Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die finanzielle Unterstützung im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 880 „Grundlagen des Hochauftriebs künftiger Verkehrsflugzeuge“ im Teilprojekt B2 „Adaptive Systeme für die Strömungserfassung und -beeinflussung“. Einer der Autoren (S.B.) dankt der Volkswagenstiftung für finanzielle Unterstützung.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] King, L. V.: On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires with applications to hot-wire anemometry. Philosophical Transactions of the Royal Society. S. 373-432, 1914
- [2] Eckelmann, H.: Einführung in die Strömungsmeßtechnik. Stuttgart: Teubner Verlag, 1997
- [3] Haynes, W. M.: CRC Handbook of Chemistry and Physics. 91st edition. Boca Raton, Florida: Taylor & Francis group, 2010
- [4] Frühauf, J.: Shape and Functional Elements of the Bulk Silicon Microtechnique. Heidelberg: Springer Verlag, 2005
- [5] Frühauf, J.: Werkstoffe der Mikrotechnik. Leipzig: Fachbuchverlag Leipzig im Hanser Verlag, 2005
- [6] Shackelford, J.; Alexander, W.: Materials Science and Engineering Handbook. Boca Raton, Florida: CRC Press, 2001
- [7] Rohlfing, H.; Schmidt, H.: "Friedrich" Tabellenbuch Elektrotechnik Elektronik. Bonn: Dümmler, 1993
- [8] Burkhardt, O.: Erprobung und Anwendung von Oberflächensensoren und Sensorarrays zur Erfassung instationärer Wandschubspannungen an Schaufelprofilen. Berlin: Technische Universität Berlin, 2004