

Graduiertenkolleg 1103
Embedded Microsystems



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

**Differenzielle Thermische Analyse für die
Thermische Charakterisierung von Fluiden und
für die Messung der Flussgeschwindigkeit**

Statusbericht

Ali Sükrü Cubukcu

Betreuer: Prof. Dr. Gerald Urban
Lehrstuhl: Sensoren

Freiburg, im September 2008



Institut für Informatik



Institut für Mikrosystemtechnik

1 Aktueller Stand der Promotion

Mit meiner Promotion befinde ich mich am Anfang des zweiten Jahres. Im ersten Jahr wurde das Design und die Optimierung der ersten Serie von Sensoren fertig gestellt. Ebenso wurden die Lithographie-Masken für die Produktion der Sensoren bestellt, der Herstellungsprozess konzipiert und gestartet. Die Arbeit der ersten Monate im zweiten Jahr umfasst den Konzeptentwurf der Messung und Datenextraktionsmethoden zusammen mit weiteren Simulationen der Sensoren für die Datenextraktion.

2 Zusammenfassung der Dissertation

Meine Doktorarbeit im Rahmen des Graduiertenkollegs „Eingebettete Mikrosysteme“ bezieht sich auf die Entwicklung eines zweidimensionalen (2D)-Flusssensors, der ebenfalls die thermischen Eigenschaften des umgebenden Mediums messen kann. Es gibt zwei Anwendungsmöglichkeiten im Rahmen des Graduiertenkollegs. Eine besteht in der Integration des Sensors in ein „lab-on-a-chip“ System. Hier sollen die thermischen Sensoren, die auf amorphen Germanium-Thermistoren und dynamisch betriebenen Mikroheizelementen basieren, nicht nur die Messung der Wärmeleitfähigkeit und -kapazität eines Fluids sondern auch des Fluidflusses mittels Konvektionsprinzip ermöglichen. Der realisierte Sensor wird danach mit anderen Sensoreinheiten kombiniert, um ein integriertes analytisches Sensormodul zu entwickeln. Auf diese Weise können modulare, dezentrale, verteilte Mikrosysteme für messtechnische Anwendungen hergestellt werden.

Die zweite Anwendung des Sensorsystems ist gekoppelt mit der autonomen Navigation des Blimps (Prallluftschiff). Voraussetzung für eine autonome Navigation ist jedoch eine zuverlässige Lokalisierung des Flugroboters. Hier wird versucht, möglichst viele das System beschreibende Kenngrößen zu erfassen. Diese sind beispielsweise die Abstände zu Wänden und dem Boden, die Beschleunigung, die Drehrate und einige mehr. Momentan existiert jedoch kein Sensor, der relative Änderungen der Position oder die Geschwindigkeit über Grund v_G des Blimps erfassen kann. Der zu entwickelnde 2D-Flusssensor könnte hier mit der Geschwindigkeit durch die Luft v_L zusätzliche Informationen für die Lokalisierung liefern. Mittels geeigneter Sensordatenfusion ist es möglich die globale Luftmassenbewegung um den Blimp herum zu schätzen, um so von v_L auf v_G zu schließen. Die Geschwindigkeit v_G würde als wertvolle Zusatzinformation für Schätzverfahren, wie z.B. erweiterte Kalman-Filter oder Partikel-Filter, dienen und somit zur Steigerung der Zuverlässigkeit der Lokalisierung des Flugroboters beitragen. Da der Blimp nur eine geringe Zuladung verfügt und nur eine begrenzte Akku-Kapazität besitzt, sollte der zu entwickelnde Sensor möglichst leicht sein und eine geringe Leistungsaufnahme aufweisen. Infolgedessen ist die Realisierung eines 2D-Flusssensor als Mikrosystem notwendig.

Gemäß dem Bedarf der oben beschriebenen Anwendungen, wird ein neuer Typ eines thermischen Flusssensors am Lehrstuhl für Sensoren am IMTEK entwickelt. Er ist so aufgebaut, dass er den Fluss wie auch die thermischen Eigenschaften des fließenden Mediums gleichzeitig erfassen kann. Vorhergehende Arbeiten an thermischen Mikrosensoren berichten entweder über die Messung des Flusses [4] oder die Eigenschaften des Fluids [3]. Es gibt ebenso Berichte über Sensorsysteme die beides zu messen vermögen, dies aber mit Hilfe von zwei verschiedenen Sensoren, die sich auf dem gleichen Chip befinden [5]. Wir schlagen deshalb vor, einen einzelnen Sensor auf dem Chip zu platzieren, der beide Eigenschaften misst. Darüber hinaus handelt es sich um einen Sensor mit geringem Gewicht und niedrigem Energieverbrauch, der von den Eigenschaften eines Mikrosystems profitiert.

Das Wirkungsprinzip von einem solchen richtungssensitiven Sensorsystem basiert auf der Verzerrung eines Wärmeprofiles auf einer Platte aufgrund der konvektiven Wärmeübertragung. Das thermische Profil wird durch ein Heizelement auf der Platte generiert. Menge und Richtung der Verzerrung des Temperaturprofils beziehen sich auf die Flussgeschwindigkeit und Flussrichtung. Dieser Effekt wird in [1] ausführlich erklärt. Mehrere Temperatursensoren werden auf der Platte benötigt, um sowohl die Flussrichtung wie auch die Geschwindigkeit zu messen. Diese Temperatursensoren werden üblicherweise als temperaturabhängige Widerstände (Thermistoren) in der Mikrosystemtechnik realisiert. Hochempfindliche amorphe Germanium-Thermistoren, die bereits in unserer Gruppe verfügbar sind, werden bei dem betreffenden Flusssensor benutzt. Die Thermistoren werden auf einer sehr dünnen Membran integriert, um die Empfindlichkeit der Messung zu verbessern. Diese Membran wird auf einem Siliziumsubstrat durch die Abscheidung von Siliziumnitrid und -oxidschichten hergestellt. Danach wird das Siliziumsubstrat an mehreren Stellen von der Waferrückseite geätzt, so dass die dünne Nitrid und -oxidschichten frei stehen, um die Membran zu formen.

Mindestens 4 Thermistoren werden benötigt, um den Flusswinkel auf einer 2D Ebene zu messen. Unser Design integriert diese 4 Thermistoren, welche als zwei orthogonale Paare um das Heizelement symmetrisch platziert sind, das wiederum in der Mitte der Membran realisiert ist. Unser Sensor enthält ebenso einen fünften Thermistor in der Mitte der Membran, um so die Temperatur am Heizelement beobachten zu können. Abgesehen von diesen 5 Thermistoren werden vier zusätzliche Thermistoren außerhalb der Membran platziert, um die Substrattemperatur und die Temperatur in der Umgebung zu messen. Der entwickelte Sensorchip, die Membran und die feinen Strukturen der Membran sind in Abbildung 1 erkennbar. Dort ist zu sehen, dass die Strukturen auf der Membran symmetrisch angeordnet wurden, um den thermischen Offset möglichst klein zu halten.

Die konstante Zufuhr von Energie zum Heizelement ist ausreichend für die 2D Flussmessung. Dennoch werden transiente Messungen benötigt, um die thermischen Eigenschaften des fließenden Fluids zu bestimmen. Daher sollten zeitabhängige Signale am Heizelement angelegt werden. Eine Möglichkeit ist es sinusförmige Spannung auf das Heizelement zu applizieren. Das hat eine sinusförmige Leistungsabgabe am Heizelement zur Folge mit, im Vergleich zur Spannung, doppelter Frequenz. Die generierte Wärme wird zu den Thermistorpunkten geleitet. Somit oszillieren die Temperatursignale an den Stellen der Thermistoren mit derselben Frequenz wie die Leistung.

Der Wärmetransport vom Heizelement findet sowohl per Leitung durch die Membran als auch durch Konvektion durch das Fluid statt. Da beide Wärmeübertragungswege thermische Kapazitäten und Widerstände einschließen, kommt es zu einer Phasendifferenz zwischen dem Sinus des Steuersignals des Heizers und der Thermistortemperaturen. Die Membran wird aus einem sehr dünnem Wärmeisoliermaterial (Siliziumnitrid und -oxid) hergestellt. Somit wird der Effekt des konvektiven Wärmetransports wahrnehmbar und hängt sowohl von den thermischen Eigenschaften des flüssigen Mediums wie von der Geschwindigkeit des fließenden Fluids ab.

Neben der Phasenverschiebung gibt es auch andere Größen als Antwort auf die sinusförmige Erregung. Wenn sinusförmige Wärme über einer kritischen Frequenz angelegt wird, steigt die Temperatur an den Thermistorstellen mit überlagerter Oszillation bis eine quasi stationäre Durchschnittstemperatur erreicht ist. Nach Erreichen der Durchschnittstemperatur (quasi steady state), oszilliert die Temperatur um die Durchschnittstemperatur herum bis der Wärmeantransport oder die Randbedingungen sich ändern. Dieses Verhalten wird in Abbildung 2 dargestellt. Die Amplitude dieser Oszillation, die Zeitkonstante zum quasi steady state und die Variationen dieser Quantitäten an den 5 verschiedenen Thermistorstellen geben implizit Information über den Fluss, die thermischen Eigenschaften der Flüssigkeit und anderen sensor-spezifischen Parametern. Die

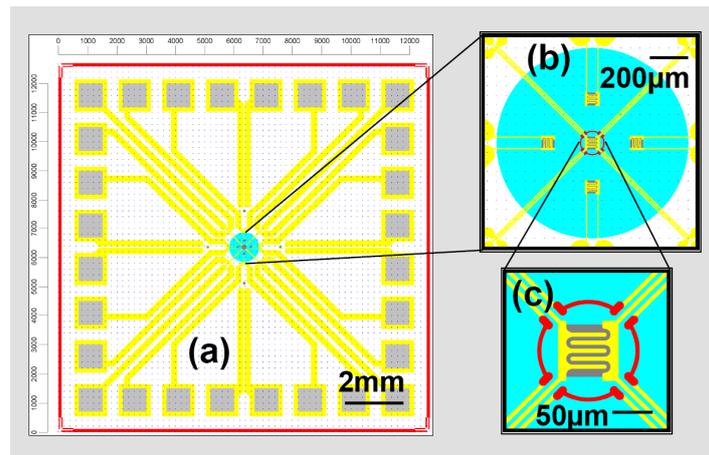


Abbildung 1: a) Der Chip in der Ansicht von oben (12.7 mm x 12.7 mm), b) Nahansicht der Membran (1mm Durchmesser), und c) das Heizelement zusammen mit dem Thermistor in der Mitte (kleinste Strukturgröße 5 μm).

Grenzfrequenz der Systemtransferfunktion hängt auch von den thermischen Eigenschaften der Flüssigkeit ab. Nachdem die Temperaturantwort an den 5 Thermistorstellen gemessen wurde, sollten die individuellen Unbekannten extrahiert werden. Dies entspricht einer Wertextrahierung von unbekannt Variablen aus einem komplizierten Gleichungssystem.

Die Schwierigkeit in der ersten transienten Messmethode besteht darin, dass die Temperaturantworten von vielen Variablen gleichzeitig abhängen. Diese Variablen sind Flussgeschwindigkeit, Flusswinkel sowie die 3 Eigenschaften des Fluids: thermische Leitfähigkeit, spezifische Wärme und die Dichte. Der Flusswinkel wird einfach durch nachstehende Formel extrahiert:

$$\alpha = \arctan \frac{\Delta T_{\text{thermistor pair 1}}}{\Delta T_{\text{thermistor pair 2}}} \quad (1)$$

Der schwierige Teil ist das Auskoppeln der Flussgeschwindigkeit von den thermischen Eigenschaften des Fluids. Aus diesem Grund ist die Bestimmung der Flussgeschwindigkeit durch Anwendung einer anderen Messmethode am gleichen Sensor sehr von Nutzen. Bei Flussgeschwindigkeiten, die höher als die Grenzgeschwindigkeit sind, ist eine andere Methode für transiente Messungen anwendbar, um die Flussgeschwindigkeit unabhängig zu messen. Wenn man ein sehr kurzes Pulssignal am Heizelement aufgibt, wird die Zeitverzögerung zwischen Puls und Antwort an der abwärts liegenden Thermistorstelle gemessen. Da der Abstand zwischen Heizelement und der abwärts liegenden Thermistorstelle konstant ist, kann die Flussgeschwindigkeit im Verhältnis zur Flugzeit kalkuliert werden. Diese Messung ist dennoch durch die kritische Flussgeschwindigkeit eingeschränkt, die im Zusammenhang mit der Wärmediffusion im Medium und in der Membran ist [2]. Wenn die Geschwindigkeit zu niedrig ist, startet die Antwort am abwärts liegenden Thermistor nicht aufgrund des Flusses sondern wegen der Wärmediffusion. Auch um die Grenzgeschwindigkeit herum ist die Antwort verlängert und das Messen gestaltet sich als schwierig. Infolge dessen ist die Anwendung dieser transienten Messmethode durch die zu messende Strömung eingeschränkt.

Daraus resultiert, dass die oben beschriebenen Messmethoden überprüft werden, um eine gleichzeitige Messung der Strömung und der thermischen Eigenschaften des flüssigen Mediums zu erreichen. Die Extrahierung der zu messenden Variablen wird in der LabVIEW Umgebung vorgenommen. Für diesen Prozess wird der Ansatz wie in Abbildung 3 aufgezeigt.

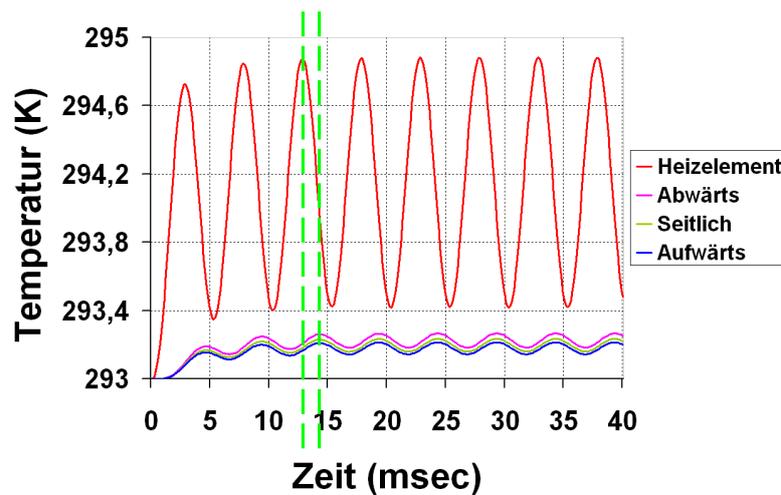


Abbildung 2: Temperatursignale an dem mittleren Heizelement und an den seitlichen abwärts und aufwärts liegenden Thermistoren für 100 Hz angelegte sinusförmige Spannung am Heizelement. Die Temperatursignale oszillieren mit 200 Hz aufgrund der doppelten Frequenz der Heizkraft. Es gibt die gleiche Größe von Phasenverschiebungen zwischen den Temperaturhöchstwerten am zentralen Thermistor und an den Thermistoren, welche die gleiche Distanz zum Heizelement aufweisen. Der durchschnittliche Temperaturunterschied zwischen den abwärts und aufwärts liegenden Thermistoren ist ein Maß der Flussgeschwindigkeit.

Zuerst werden die elektrischen Widerstände der Thermistoren während des Sensorbetriebs gemessen. Dies wird durch Stromzufuhr zu den Thermistoren und Erfassung der Spannung über die Thermistoren erreicht. Zur gleichen Zeit sollte auch die zum Heizelement abgegebene elektrische Leistung gemessen werden. Dann werden die Thermistorwiderstände in einem LabVIEW Programm zu lokalen Temperaturen konvertiert. Für diese Konvertierung sollten die Thermistoren vor dem Erwärmen in einem temperaturgesteuerten Ofen und der Aufzeichnung der elektrischen Widerstände für ein Temperaturintervall charakterisiert werden. Die aufgezeichnete Temperatur- und Widerstandstabelle dient als Suchlauftabelle im LabVIEW Programm.

Da die Temperaturen an jeder Thermistorstelle vorliegen, sollten sie entsprechend der Systemeigenschaften interpretiert werden, um die gewünschten Variablen zu extrahieren. Diese Interpretationen bestehen aus Datenabstimmung und Kalkulation entsprechend den Systemmodellen, die alle in der LabVIEW Umgebung aufbereitet werden. Eine Möglichkeit die verschiedenen Systemeigenschaften zu extrahieren, ist es, die gewünschten Variablen durch Experimentieren zu verändern. Dennoch ist es ein großer Zeitaufwand mit den Kombinationen der fünf Variablen, v , α , λ , c_P , und ρ zu experimentieren. Darüber hinaus können die Variablen der thermischen Eigenschaften λ , c_P , und ρ nicht hinsichtlich der Charakterisierung einzeln abgeändert werden, da fast alle Flüssigkeiten andere Werte für all diese Eigenschaften aufweisen. Deshalb sind FEM Simulationen weniger zeitaufwändig und somit eine flexible Alternative, um die Systemeigenschaften herauszufinden. Momentan werden verschiedene FEM Simulationen in einer COMSOL Umgebung vorgenommen, um sowohl die statischen wie die dynamischen Eigenschaften dieses thermischen Flusssensors zu untersuchen. Die Simulationsergebnisse geben Auskunft über das Verhältnis zwischen den gewünschten Variablen und der resultierenden lokalen Temperaturen, die erwartungsgemäß für die Datenextrahierung dienen.

Gegenwärtig werden folgenden Fortschritte parallel zu den FEM Simulationen gemacht: Lab-

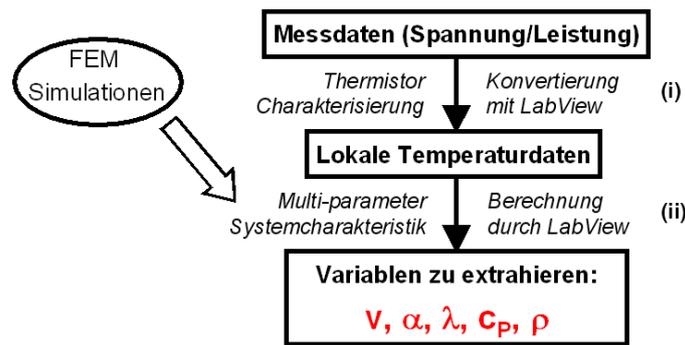


Abbildung 3: Datenextrahierungsansatz.

VIEW Programme werden für die Konvertierung elektrischer Daten zu Temperatursignalen und für die Erkennung der Amplituden und Phasen unter Berücksichtigung einer Reihe von Temperatursignalen geschrieben. Herstellung von Eck- und Kreismembranen werden getestet, wobei Materialspannungsausgleich für eine flache Membran, fehlerfreie Produktion der dünnen Membran und Integrität der zerbrechlichen Membran während des Vereinzelns der Sensorchips aus der Siliziumscheibe, Herausforderungen darstellen. Der Entwurf einer Leiterplatte für den elektrischen Kontakt zum Chip, einer Halterung für die Leiterplatte und eines Messaufbaus für verschiedene Flusswinkel und Gaszufuhr sind weiterführende Arbeiten.

3 Ausblick

Nach Beenden der oben aufgeführten Arbeiten, wird die erste Anwendung des Sensors die Luftströmungsmessung sein. Deshalb wird der Sensor in einem Strömungskanal getestet. Der Sensor wird schrittweise im Flusskanal rotiert, um den Sensor für die Stromwinkelmessung zu charakterisieren. Verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten werden benutzt, um den Sensor für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung zu kalibrieren. Parallel zur Sensorcharakterisierung durch Experimente werden eine Messschaltung am Blimp und eine Kommunikationsschnittstelle zwischen Sensor, Blimp und Bodenempfänger entwickelt. Dann werden die Sensoren an einen oder mehrere Punkte des Blimps montiert. Schlussendlich werden die gemessenen Daten am Bodenkontrollsystem evaluiert, um bei der lokalen Positionierung des Blimps zu helfen.

Literatur

- [1] A. Cubukcu and G. Urban. "Sensitivity-maximizing and error-reducing design of a flow and thermal property sensor". In *International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Micro-Systems (EuroSimE)*. Freiburg, Germany, 2008, pp. 147–152.
- [2] M. Elwenspoek. "Thermal flow micro sensors". In *Proceedings of the International Semiconductor Conference (CAS'99)*. Vol. 2, Sinaia, Romania, 1999.
- [3] H. Ernst, A. Jachimowicz, and G. Urban. "Dynamic thermal sensor-principles in MEMS for fluid characterization". *IEEE Sensors Journal*, vol. 1, no. 4, pp. 361–367, 2001.
- [4] F. Kohl, A. Jachimowicz, J. Steurer, R. Glatz, J. Kuttner, D. Biacovsky, F. Olcaytug, and G. Urban. "A micro-machined flow sensor for liquid and gaseous fluids". *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 41, pp. 293–299, 1994.
- [5] T. Lammerink, F. Dijkstra, Z. Houkes, and J. Van Kuijk. "Intelligent gas-mixture flow sensor". *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 47, no. 1, pp. 380–384, 1995.