

Forschungszentrum Karlsruhe
Technik und Umwelt

Wissenschaftliche Berichte
FZKA 6710

**Durchflusssensoren aus Kunststoff für sehr kleine
Volumenströme auf der Basis des AMANDA-
Verfahrens**

Dirk Dittmann ^{*)}, Zeno Rummler, Klaus Schlote-Holubek,
Werner K. Schomburg

Institut für Mikrostrukturtechnik
Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik

**^{*)} von der Fakultät für Maschinenbau der Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte Dissertation**

**Forschungszentrum Karlsruhe, GmbH, Karlsruhe
2002**

Durchflusssensoren aus Kunststoff für sehr kleine Volumenströme auf der Basis des AMANDA- Verfahrens

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Ingenieurwissenschaften

von der Fakultät für Maschinenbau der
Universität Karlsruhe (TH)
genehmigte

Dissertation

von

Dipl.-Ing. Dirk Maria Dittmann
aus Rendsburg

Tag der mündlichen Prüfung: 11. Dezember 2001

Hauptreferent: Prof. Dr. V. Saile

Korreferent: Prof. Dr. D. Munz

Kurzfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein mikromechanischer Durchflusssensor für Flüssigkeiten und Gase auf Polymerbasis entwickelt, hergestellt und charakterisiert.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Durchflussmessverfahren sowohl auf eine mögliche mikrotechnische Herstellung mit dem AMANDA-Verfahren untersucht als auch im Hinblick auf industriell geforderte Spezifikationen bewertet. In der Konzeptionsphase wurden dabei einige interessante Realisierungsmöglichkeiten erarbeitet, die ausführlich in dieser Arbeit beschrieben sind. Das thermisch anemometrische Funktionsprinzip, das die durchflussabhängige Leistungsabgabe eines elektrisch erwärmten Körpers an das ihn umströmende Fluid als Messsignal ausnutzt, wurde für die Realisierung des Sensors verwendet.

Für die Herstellung dieses Sensors musste ein wegen des Aufbaus mit verschiedenen Polymeren notwendiges temperaturunabhängiges Design des Funktionselements entwickelt werden. Aus diesem Grund wurde ein einseitig am Gehäuse befestigter und über einem Fluidkanal liegender Trägerkörper in Form einer Zunge entworfen, auf dem über dem frei beweglichen Teil eine mäanderförmige Leiterbahn appliziert wurde. Als Leiterbahnschutz wurde eine der Trägerkörpergeometrie und -dicke identische Schicht verwendet. Aufgrund dieser gestalterischen Maßnahmen wurde ein temperaturkompensiertes Funktionselement realisiert, das eine zusätzliche unerwünschte, das Messsignal verfälschende, thermische Dehnung der Leiterbahn verhindert.

Es wurden jeweils 50 Durchflusssensoren parallel produziert. Dabei wurden Gehäuseteile aus Polysulfon mit integrierten Fluidkanälen mit Hilfe der Heißprägetechnik gefertigt. Die Herstellung der Funktionselemente erfolgte durch eine photolithographische Strukturierung von Membranen sowie einen Aufdampfprozess. Der Trägerkörper und die Schutzschicht bestehen dabei aus jeweils 1,2µm dünnem Polyimid. Die Breite des Trägerkörpers wurde auf die jeweilige Fluidkanalbreite angepasst. Die zwischen den beiden Membranlagen befindliche Leiterbahn besteht aus Platin mit einer Breite von 2µm sowie einer Höhe von 100nm. Nach der Verbindung der im Nutzen hergestellten Sensorkomponenten sowie der anschließenden Sensorvereinzelung besitzt der Durchflusssensor die äußeren Abmaße von 5,5 x 4,5 x 1,2mm².

Zur Charakterisierung des Sensors wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Dabei wurde für Wasser ein minimaler Volumenstrom von 0,1µl/min bei einer Temperaturerhöhung des Fluids von 6 Grad Celsius detektiert. Die Ansprechzeit des Sensors wurde mit 2,5ms gemessen. Aufgrund der kurzen Ansprechzeiten konnte eine im Pulsmodus arbeitende Sensorelektronik, die die Strömungsgeschwindigkeit sowie die das Messsignal beeinflussende Fluidtemperatur mit der selben Leiterbahn misst, eingesetzt werden. Die durch die messtechnische Bestimmung der Fluidtemperatur sowie das neu entwickelte Sensordesign erlangte Temperaturunabhängigkeit des Messsignals wurde durch Messungen nachgewiesen. Zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Sensorelement wurden FEM-Rechnungen durchgeführt, deren Ergebnisse mit Hilfe von Infrarot-Wärmebilder bestätigt wurden. Damit steht eine rechnergestützte Methode zur Sensoroptimierung zur Verfügung.

Nachdem die Tragfähigkeit des Konzepts erfolgreich nachgewiesen wurde, wurde ein Vergleich mit anderen mikromechanisch hergestellten Durchflusssensoren durchgeführt. Aufgrund der unter anderem kleinen messbaren Volumenströme, bei gleichzeitig geringer Temperaturerhöhung des zu messenden Fluids, kann der in dieser Arbeit entwickelte Durchflusssensor z. B. in der Medikamentendosierung oder der Bioanalytik eingesetzt werden.

Abstract

A micromechanical flow sensor for liquids and gases from polymer has been developed, manufactured, and characterized.

For this purpose, various methods of flow measurement were examined with a view to both the possibility of micro-manufacture by the AMANDA process and to the specifications required by industry. A few interesting implementation possibilities were elaborated in the conceptual design phase which are described in detail in this paper. The principle of thermo-anemometry, which uses as a measurement signal the power output as a function of flow, of a body electrically heated to the surrounding fluid, was used for the practical design of the sensor.

Due to the use of different polymers in manufacturing the sensor, a temperature-independent design of the functional element had to be developed. For this reason, a support structure shaped like a reed was developed, which is attached to one side of the housing above the fluid channel. A meandering conductor strip was applied to this reed above the freely movable section. To protect the conductor strip, a layer identical to the geometry of the support structure and its thickness was used. As a result of these design measures, a temperature-compensated functional element was constructed which prevents unwanted additional thermal expansion of the conductor strip, which would falsify the measured signal.

Fifty flow sensors were produced in parallel. The housings were made by hot embossing of polysulfone with integrated fluid channels. The functional elements were produced by photolithographic patterning of membranes and by a vapor coating process. The support structure and the protective coating both consist of 1.2 mm thick polyimide. The width of the support structure was adapted to the respective width of the fluid channel. The conductor strip located between the two membranes is made of 2 μm wide and 100 nm high platinum. After connecting the sensor components, which are produced in batches, and subsequent singulization of the sensors, the flow sensor outer dimensions are 5.5 x 4.5 x 1.2 mm³.

Fluidic tests were carried out with water and nitrogen to characterize the sensor. For water, a minimum volumetric flow rate of 0.1 $\mu\text{l}/\text{min}$ was detected for a fluid temperature increase of 6°C. The response time of the sensor was measured to be 2.5 ms. Due to the short response times, a sensor electronic system operating in pulse mode was used, which measures the flow velocity and the fluid temperature influencing the measured signal on the same conductor strip. The independence of temperature of the measured signal achieved by the measurement of the fluid temperature and by the newly developed sensor design was confirmed in measurements. To determine the temperature distribution in the sensor element, FEM calculations were carried out, whose results were confirmed by means of infrared thermal imaging. In this way, a computer-supported method of sensor optimization has been developed.

After the successful demonstration of the feasibility of the concept, a comparison was made with other flow sensors produced by micromechanical techniques. Because of the low measurable volumetric flow rates accompanied by minor temperature increases in the fluid to be measured, the flow sensor developed in this activity can be used, e.g., in drug dosage or in bioanalytics.

| | | |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | EINLEITUNG | 1 |
| 2 | DURCHFLUSSMESSVERFAHREN | 5 |
| 2.1 | Begriffsbestimmung des Durchflusses | 5 |
| 2.2 | Überblick über Durchflussmessverfahren | 6 |
| 3 | AUSGEWÄHLTE DURCHFLUSSMESSVERFAHREN | 15 |
| 3.1 | Volumetrische Zähler | 15 |
| 3.1.1 | Verdrängungszähler | 15 |
| 3.1.2 | Auslaufzähler | 17 |
| 3.2 | Durchflussmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper | 21 |
| 3.2.1 | Konzeptphase 1: Volumenstrommessung mittels am Rand fest eingespannter Lochblende | 23 |
| 3.2.2 | Konzeptphase 2: Volumenstrommessung mittels am Rand frei gelagerter Lochblende | 24 |
| 3.2.3 | Konzeptphase 3: Temperaturabhängiger Durchflusssensor für sehr kleine Volumenströme | 25 |
| 3.2.4 | Konzeptphase 4: Temperaturunabhängiger Durchflusssensor für sehr kleine Volumenströme | 26 |
| 3.2.5 | Dimensionierung eines Durchflusssensors | 30 |
| 3.2.6 | Konzeptbewertung | 30 |
| 3.3 | Wärme-Anemometrie | 33 |
| 4 | WERKSTOFFAUSWAHL, SENSORDESIGN UND HERSTELLUNG MIT DEM AMANDA-VERFAHREN | 39 |
| 4.1 | Werkstoffauswahl | 39 |
| 4.2 | Sensordesign | 42 |
| 4.3 | Herstellung des Durchflusssensors mit dem AMANDA-Verfahren | 48 |
| 4.3.1 | Herstellung der Funktionselemente (Membranherstellung) | 48 |
| 4.3.2 | Herstellung der Kunststoffgehäuse | 57 |
| 4.3.3 | Membranübertragung mittels Kammerklebetechnik | 58 |
| 4.3.4 | Elektrische und fluidische Kontaktierung der Sensoren | 60 |
| 4.3.5 | Herstellungskosten | 62 |

| | | |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5 | CHARAKTERISIERUNG DER SENSOREN | 63 |
| 5.1 | Messaufbauten | 63 |
| 5.1.1 | Messaufbau für Stickstoffanwendungen | 63 |
| 5.1.2 | Messaufbau für Anwendungen mit Wasser | 64 |
| 5.1.3 | Messelektronik | 65 |
| 5.1.3.1 | Anemometer-Brückenschaltung | 65 |
| 5.1.3.2 | Verwendung einer Wheatstone'schen Brückenschaltung zur Bestimmung des Ansprechverhaltens | 66 |
| 5.1.3.3 | Puls-Verfahren im Konstant-Temperatur Modus | 67 |
| 5.2 | Sensorkennlinien | 70 |
| 5.3 | Energiebedarf des Sensors | 75 |
| 5.4 | Wärmebildaufnahmen und Simulation | 75 |
| 5.5 | Ergebnisbetrachtung und –überprüfung mit Anwendungsbeispielen | 81 |
| 5.6 | Vergleich mit existierenden Durchflusssensoren | 83 |
| 6 | ZUSAMMENFASSUNG | 85 |
| 7 | LITERATURVERZEICHNIS | 89 |
| 8 | ANHANG | 93 |
| 8.1 | Anhang: Durchflussmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper | 93 |
| 8.1.1 | Anhang: Berechnung der Reibungsstrecke einer Lochblende | 93 |
| 8.1.2 | Anhang: Berechnung der Radius-Dicken-Verhältnisse der Membranen und die dazugehörigen max. Auslenkungen (lineare Annahme) | 93 |
| 8.1.3 | Anhang: Berechnung der Membrangeometrien (nichtlineare Annahme) | 95 |
| 8.2 | Anhang: Experimentell ermittelte lineare Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von aufgedampften Platin | 96 |
| 8.3 | Anhang: Thermischer Massenstrommesser nach dem kalorimetrischen Prinzip | 96 |
| 8.4 | Anhang: Simulation des Sensors mit der Methode der finiten Elemente | 101 |

1 Einleitung

Die Tendenz zu immer kleineren und leistungsstärkeren Einheiten ist die Voraussetzung sowohl für den technischen als auch für den wirtschaftlichen Erfolg der Mikrosystemtechnik gegenüber konventionellen Systemen. Aufbauend auf den Erfahrungen im Bereich der Mikroelektronik, wurden in den sechziger Jahren erste Überlegungen zur Entwicklung von Siliziumsensoren angestellt, die unter anderem zur Licht- und Temperaturerfassung eingesetzt werden sollten. In den siebziger und achtziger Jahren wurden zahlreiche Mikrokomponenten entwickelt, von denen der mikromechanische Drucksensor exemplarisch erwähnt sein soll. Durch diese Drucksensoren entstanden schließlich auch die Techniken zur Herstellung dünner Membranen in Silizium, die in die heute verfügbare dreidimensionale Formgebung der Mikromechanik mündete. Durch die Kombination von einer immer größer werdenden Auswahl an Sensor- und Aktorfunktionen mit mikroelektronischen Schaltungen, entstehen in jüngster Zeit intelligente Systeme mit bisher nicht erreichbaren Leistungsmerkmalen. Zukünftig wird sich die Produktpalette noch erheblich erweitern, und zwar sowohl durch die Miniaturisierung und Verbesserung bekannter Produkte, als auch durch die Entwicklung völlig neuer Produkte und Verfahren.

Die größten Anwendungsbereiche finden sich in der Informations- und Kommunikationstechnologie, Medizin und Biomedizin, Automobil-, Anlagen- und Umwelttechnik. In Europa hatte die Automobilindustrie im letzten Jahrzehnt den größten Innovationsschub, insbesondere durch die Einführung verschiedener Druck-, Airbag- bzw. Beschleunigungs- und Drehratensensoren. Diese Sensoren dienen der wachsenden Sicherheit im Kfz, der Senkung des Treibstoffverbrauchs und der Reduktion von Umwelteinflüssen. Für dieses Jahrzehnt wird erwartet, dass der Medizin- und Biomedizinbereich in Europa an Bedeutung gewinnt, z.B. mit Herzschrittmachern, Hörhilfen oder Medikamentendosiersystemen. Auch in der Umwelttechnik wird ein hohes Wachstum, z. B. für Steuerungssysteme zur Überwachung speziell der Gasdetektion und für Analysen von Chemikalien und Verunreinigungen in Luft, Wasser und Boden erwartet. Anwender dieser neuen Techniken sind darüber hinaus die chemische und pharmazeutische Industrie, bei denen durch den Einsatz von Mikrosystemprodukten in neuen Fertigungsanlagen das Messen, Steuern und Regeln verbessert wird.

Das Messen in Mikrosystemen erfolgt mittels Mikrosensoren. Ihre Aufgabe ist die eigenständigen Erfassung von Daten, in dem sie physikalisch-chemische Größen (wie Druck, Temperatur, Durchfluss usw.) in elektrische Größen umwandeln. Ein Sensorelement zur Messung des Durchflusses ist für mikrofluidische Systeme, wie Medikamentendosiersysteme, Analysensysteme und Überwachungsanlagen in der Fertigung unerlässlich. Der erste mikromechanische Strömungssensor wurde auf der Basis der Siliziumtechnologie hergestellt und 1974 vorgestellt [Putt74]. Eine neue Klasse von Durchflussaufnehmern entstand dann 1985, die sog. durchströmten Sensoren mit integrierten Mikrokanälen [Peter85]. Weitere Entwicklungen, nach dem thermischen Prinzip oder auf der Basis von Drucksensoren folgten. Ein Überblick über verschiedene Aktivitäten auf dem Gebiet der Durchflussmesstechnik wird in [Nguy96] gegeben.

Eine der Hauptanforderungen an heutige Durchflusssensoren ist neben der Minimierung des Messbereichs bis hin zu einem Volumenstrom von $0,1 \mu\text{l}/\text{min}$, eine Begrenzung der lokalen Erwärmung des zu messenden Fluids, z. B. für medizinische Anwendungen, um maximal 10°C . Die Begrenzung der Wärmeänderung ist für biomedizinische Anwendungen notwendig,

damit die Stoffeigenschaften des zu detektierenden Mediums nicht beeinflusst werden. Eine zu starke Erwärmung würde z. B. eine lokale Zerstörung von Enzymen, die sich in den verschiedenen Medikamenten befinden, hervorrufen.

Die Firma Bosch bietet für den Automobilbereich einen mikromechanisch hergestellten Durchflusssensor für Luft an. Dieser detektiert bei einer Übertemperatur von 120–150°C einen maximalen Massenstrom von 600kg/min mit einer Dynamik von 100. In [Ozak99] wird ein Strömungssensor für Gase vorgestellt, der auf dem Modell der Windaufnahme von Insektenhaaren basiert. Bei diesem Sensorprinzip werden unterschiedlich hohe vertikal angebrachte Biegebalken, die mit Dehnungsmessstreifen versehen sind, horizontal angeströmt. Die Auslenkung der Balken ist ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit, die in diesem Fall zwischen einigen 10 cm/s und 2 m/s detektiert werden kann. Die Firma Schiltknecht Messtechnik aus der Schweiz bietet zur Zeit einen thermoelektrischen Strömungssensor mit einem Messbereich von 0-1 m/s bei einer Messgenauigkeit von 0,02 m/s und einer Reaktionszeit von 100 ms an [Sens00]; die Firma Leister Process Technologies einen thermischen Durchflusssensor für Gase mit einer Auflösung von 0,01 sccm [Firm99]. Diese Durchflusssensoren werden mit dem Fertigungsverfahren der Silizium-Mikromechanik hergestellt.

Anfang der neunziger Jahre wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe ein neues Herstellungsverfahren zur kostengünstigen Produktion von mikrofluidischen Komponenten aus Kunststoff entwickelt. Das Fertigungsverfahren bedient sich der Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung und wird seit 1997 mit dem Akronym AMANDA bezeichnet [Scho97]. Die Funktionselemente werden durch Aufbringen von photostrukturierbaren Resists und durch optische Lithographie aufgebaut. Durch Aufdampfprozesse werden elektrisch leitende Funktionsschichten auf die vordruckstrukturierten Resistschichten aufgebracht, die anschließend durch optische Lithographie und durch verschiedene Ätzprozesse strukturiert werden. Diese Prozessschritte können wiederholt werden, so dass ein Stapel von verschiedenen Schichten mit einer Dicke zwischen 1–50 µm entsteht. Die auf diese Weise hergestellten Funktionselemente sind auf einem Substrat nebeneinander im Nutzen zusammengefasst. Die Herstellung der Gehäuse wird mittels Abformung, entweder mit dem Spritzgussverfahren oder mit der Heißprägetechnik, realisiert. Die dazu benötigten Formeinsätze werden in der Regel durch feinwerktechnische Bearbeitung von Messing hergestellt. Die abgeformten Ober- und Untergehäuse und die auf Membranen befindlichen Funktionselemente werden durch die zweimalige Anwendung des Verfahrens der Membranübertragung mittels Kammerklebetechnik verbunden. Danach folgt die Vereinzelung der im Nutzen gehäusten Funktionselemente. Das AMANDA-Verfahren wurde anhand einer Kleinserienfertigung von Mikromembranpumpen eindrucksvoll nachgewiesen [Scho97]. Mit diesem Verfahren wurden darüber hinaus Mikroventile, Druck- und Flusssensoren hergestellt [Goll97], [Mart98]. Diese Durchflusssensoren beruhen auf der Messung des Druckabfalls über einer Kapillare mit einem sehr geringen Querschnitt. Da sich jedoch die gemessene Druckdifferenz bei gegebenem Durchfluss mit der vierten Potenz des Kapillardurchmessers ändert, führt schon eine geringe Verschmutzung zu verfälschten Messergebnissen, so dass sich diese Sensoren in der Regel nicht für industrielle Anwendungen eignen.

Ziel dieser Arbeit ist es, ein Sensorkonzept zu entwickeln, das für den industriellen Einsatz geeignet ist. Die vom Sensor zu erfüllenden Bedingungen wurden in Gesprächen mit potentiellen Kunden aus der Industrie ermittelt und in einer Anforderungsliste in Tabelle 1-1 zusammengefasst.

| Anforderungen an: | Forderung (F) Optional (O) |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------|
| Sensoreigenschaften: | |
| Gase <u>oder</u> Flüssigkeiten detektierbar | F |
| Gase <u>und</u> Flüssigkeiten detektierbar | O |
| Volumenstrommessbereich: 0,1 – 50 µl/min | F |
| Sensorbetrieb: | |
| Temperaturerhöhung des Fluids zwischen Ein- und Austritt des Sensors $\leq 10^{\circ}\text{C}$. | F |
| Herstellungsverfahren: | |
| AMANDA-Verfahren | F |
| Weitere Anforderungen: | |
| Geringer Flächenbedarf/ kompaktes Design (Miniaturisierbarkeit) | F |
| Einfacher Aufbau | O |
| Kostengünstig/Einwegartikel | O |

Tabelle 1-1: Anforderungen an den zu entwickelnden Durchflusssensor.

Für industrielle Zwecke wird ein Sensor benötigt, der sowohl für Gase als auch für Flüssigkeiten geeignet ist und dessen Ausgangssignal von Temperaturänderungen nur wenig beeinträchtigt wird. Die zum Aufbau von Medikamentendosier- und Mikroanalyse-Systemen benötigte Sensorik zum Messen von kleinsten Volumenströmen in minimalsten Bereichen bis 100 nl/min bei einer gleichzeitigen Temperaturerhöhung des zu messenden Fluids um maximal 10°C ist ein weiterer wichtiger industrieller Anspruch an Durchflusssensoren. Die auf dem Markt existierenden Sensoren erfüllen zu Beginn der Arbeit diese Forderungen nicht.

Die Fertigung mit dem AMANDA-Verfahren ist eine weitere, vom Konzept zu erfüllende Anforderung. Da zeitgleich mit dieser Arbeit in verschiedenen Firmen bzw. Forschungseinrichtungen Projekte begonnen worden sind, Durchflusssensoren für sehr kleine Volumenstrommessbereiche zu entwickeln, diese jedoch insgesamt mit Hilfe der Siliziumtechnik hergestellt werden sollten, ergab sich die Möglichkeit, die Vorteile von polymeren membranbasierten Durchflusssensoren, die mit Hilfe des AMANDA-Verfahrens gefertigt werden, gegenüber Siliziumsensoren herauszuarbeiten. Die aufgrund der Verwendung von Polymeren bereits geringen Produktionskosten sollten, durch einen möglichst einfach gehaltenen, kompakten Aufbau, bei gleichzeitig vorhandener Messstabilität des Sensors, auf einem niedrigen Kostenniveau gehalten werden, um die Möglichkeit zu haben, sogar Einwegprodukte zu produzieren.

Ein weiteres Ziel ist es, die bereits existierende AMANDA-Produktpalette mit einem Durchflusssensor für sehr kleine Volumenströme weiter zu vervollständigen. Wünschenswert wäre die Option, diese Komponente möglichst weitgehend unempfindlich gegenüber üblichen Chemikalien zu gestalten. Obwohl, entsprechend den dargestellten Anforderungen, der

Schwerpunkt auf der Entwicklung der Einzelkomponente Durchflusssensor liegt, sollen jedoch darüber hinaus Kombinationsmöglichkeiten mit vorhandenen AMANDA-Komponenten berücksichtigt werden; dies ist z. B. der Aufbau eines mikromechanischen Durchflussreglers mittels Kombination des zu entwickelnden Sensors mit einem Ventil. Ferner ist eine mögliche Integration in verschiedene Produkte, z. B. der Einbau in redundanter Anordnung in eine Mikropumpe, als Aufgabenstellung mit einzubeziehen. Diese Anforderungen machten es notwendig, verschiedene Sensorkonzepte theoretisch und praktisch zu untersuchen und miteinander zu vergleichen.

In Kapitel 2 wird ein Überblick über verschiedene Durchflussmessverfahren gegeben. Im Anschluss daran werden in Kapitel 2 und 3 die Ergebnisse der theoretischen als auch praktischen Untersuchungen von Durchflussmessverfahren und die Realisierbarkeit mit dem AMANDA-Verfahren dargestellt. Das Design, die Funktionsweise und die Herstellung des Sensors mit dem AMANDA-Verfahren werden in Kapitel 4 gezeigt. Kapitel 5 befasst sich mit der Charakterisierung des Sensors. Darüber hinaus werden in Kapitel 5 Wärmebildaufnahmen und dazugehörige FEM-Rechnungen vorgestellt. Zusätzlich werden in Kapitel 5 die Kenndaten des Sensors dargestellt und Optimierungsmöglichkeiten aufgezeigt. Abschließend wird der Sensor mit existierenden Durchflusssensoren verglichen.

2 Durchflussmessverfahren

2.1 Begriffsbestimmung des Durchflusses

Der Durchfluss beschreibt, welche Masse m oder welches Volumen V pro Zeiteinheit t einen betrachteten Rohrleitungsquerschnitt passiert.

Massendurchfluss: $\dot{m} = \frac{dm}{dt}$ bzw. $\dot{m} = \int (\rho \cdot c) \cdot dA$ Gleichung 2-1

Volumendurchfluss: $\dot{V} = \frac{dV}{dt}$ bzw. $\dot{V} = \int c \cdot dA$ Gleichung 2-2

(A =Rohrleitungsquerschnitt, c =Geschwindigkeit des zu messenden Fluids)

Beide sind durch die Beziehung: $\rho = \frac{m}{V}$ Gleichung 2-3

miteinander verknüpft (ρ =Dichte des Fluids).

Entsprechend der bei Durchflussmessverfahren verwendeten Messinstrumente werden diese in Massen- und Volumenstrommesser unterteilt, wobei sich letztere noch in volumetrische- und Strömungszähler gliedern lassen.

Die Ermittlung des durchfließenden Volumens erfolgt bei Strömungszählern über die Bestimmung der mittleren Geschwindigkeit des Fluids. Als Folge von Reibungsspannungen im Fluid ergeben sich unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten über den Querschnitt. Nach Beendigung einer Anlaufstrecke wird ein laminares, vollständig ausgebildetes Strömungsprofil im Kanal vorausgesetzt. Dadurch ergibt sich für ein gerades Kanalstück mit dem Radius R laut [Zier93] ein über den Querschnitt gemittelter Strömungsverlauf:

Gleichung 2-4
$$c(r) = c_{\max} \cdot \left[1 - \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]$$

mit der über den Kanalquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit:

Gleichung 2-5
$$c_m = \frac{c_{\max}}{2}$$

die für alle weiteren Betrachtungen gilt.

2.2 Überblick über Durchflussmessverfahren

Die Durchflussmessung ist ein klassisches Gebiet der Messtechnik; sie umfasst nahezu alle Bereiche der Physik. Die rasante Entwicklung der Mikrosystemtechnik ermöglicht sowohl die Realisierung von konventionellen als auch von neuartigen Messprinzipien mit Hilfe der verschiedensten Mikrofertigungstechnologien. Abbildung 2-1 gibt eine Übersicht über die verschiedenen **Durchflussmessverfahren**.

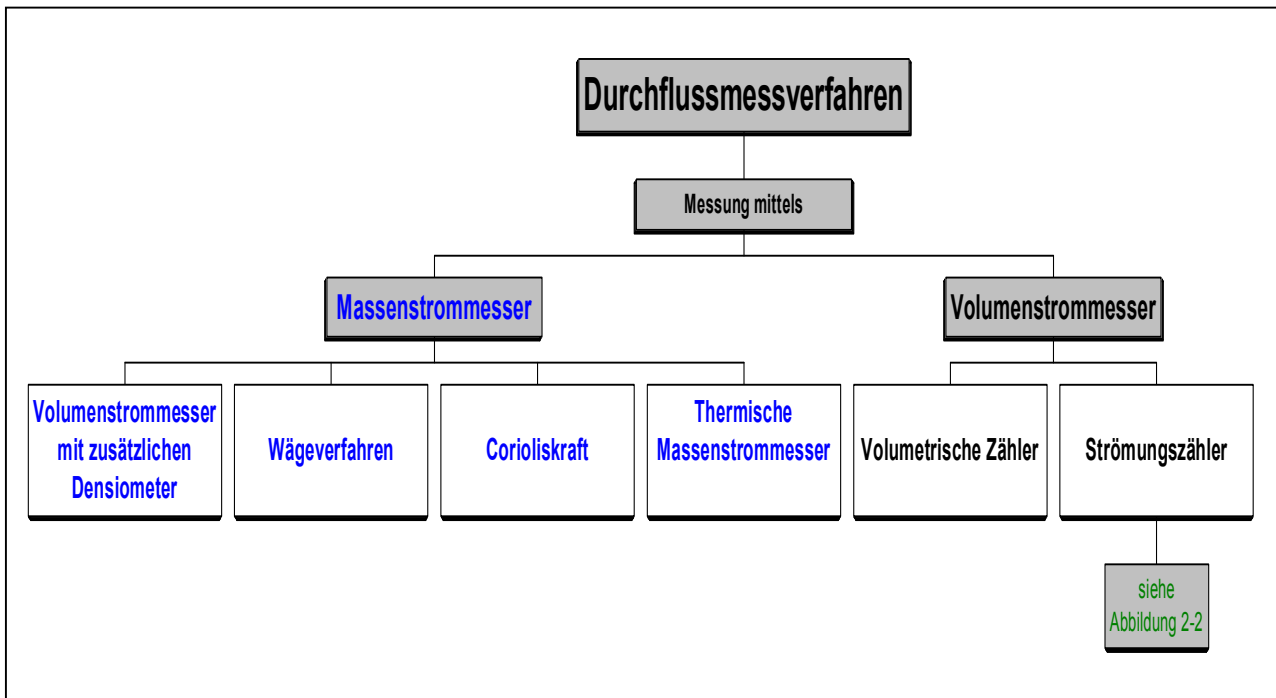


Abbildung 2-1: Überblick über Durchflussmessverfahren.

Die in Abbildung 2-1 auf der linken Seite dargestellten **Massenstrommesser** bestimmen messtechnisch den momentanen Massenstrom durch einen Rohrabschnitt. Dazu eignen sich alle **Volumenstrommesser mit einem zusätzlichen Densimeter** (Dichtemesser). Zur Bestimmung des Massenstroms kann auch das **Wägeverfahren** eingesetzt werden, das jedoch ein diskontinuierliches Messverfahren ist, welches nur zur Messung von Flüssigkeiten geeignet ist. Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung des Massenstroms mit Hilfe der **Corioliskraft**. Auf einen Körper der Masse m , der sich mit der Geschwindigkeit c in einem mit der Winkelgeschwindigkeit ω rotierenden System bewegt, wirkt, zusätzlich zur Zentrifugalkraft, die Corioliskraft: $F_c = 2 \cdot m \cdot [\omega \times c]$. Die bekannteste bzw. meist angewandte Methode zur Bestimmung des Massenstroms ist die mittels **thermischer Massenstrommesser**, deren Grundlage der von einem Fluid transportierte Wärmestrom bei bekannter spezifischer Wärmekapazität ist. Die Heizleistung P eines Heizelementes entspricht somit dem Wärmestrom im Fluid:

$$\text{Gleichung 2-6} \quad P = \dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T$$

(mit \dot{Q} = Wärmestrom, C_p = spezifische Wärmekapazität des Fluids, ΔT = Temperaturerhöhung im Fluid)

Klassische Massendurchflusssensoren, wie der seit 1911 bekannte Thomas-Messer, messen mittels Widerstandsthermometern Temperaturdifferenzen zwischen Ein- und Auslauf eines Messrohres, in dem sich ein Heizgitter befindet. Günstigere Messbedingungen ergeben sich durch die Verwendung von sog. Grenzschichtdurchflussmessern, bei denen Heiz- und Temperaturmessstellen außerhalb des Kanals angebracht sind. Dabei wird die Rohrwand von außen aufgeheizt und der Wärmestrom zwischen Wand und Fluid gemessen.

Die in Abbildung 2-1 auf der rechten Seite dargestellten **Volumenstrommesser** werden in **volumetrische Zähler** und in **Strömungszähler** unterteilt. Volumetrische Zähler bzw. lt. DIN 19201 unmittelbare Volumenzähler sind solche, bei denen Teilmengen des Messgutes kontinuierlich in fest definierte Messrauminhalte aufgeteilt werden. Diese Volumenzähler sind systembedingt absolut unempfindlich gegen Ein- und Auslaufstörungen des Messstoffes, wie z.B. Drall oder Asymmetrien im Strömungsprofil. Das durchgeflossene Volumen wird direkt mit einem Zählwerk aufsummiert und zur Anzeige gebracht. Bei volumetrischen Zählern unterscheidet man zwischen Verdrängungs- und Auslaufzählern, deren Unterscheidungsmerkmale die beweglichen bzw. festen Messkammerwände sind. Auf einen volumetrischen Zähler und dessen Aufbau wird im Verlauf dieser Arbeit näher eingegangen. In sog. „mittelbaren Volumenzählern“ bzw. „Strömungszählern“ (DIN 19201) erfolgt die Bestimmung des durchgeflossenen Volumens aus der mittleren Geschwindigkeit c des Fluids. Die Bestimmung des Volumenstroms mittels Strömungszählern erfolgt danach indirekt über die bereits vorgestellte, vereinfachte Bedingung:

$$\text{Gleichung 2-7} \quad \dot{V} = c \cdot A$$

In Abbildung 2-2 sind eine Vielzahl von physikalischen Effekten, die sich allgemein zur Geschwindigkeitsmessung und damit auch zur Durchflussmessung eignen, dargestellt.

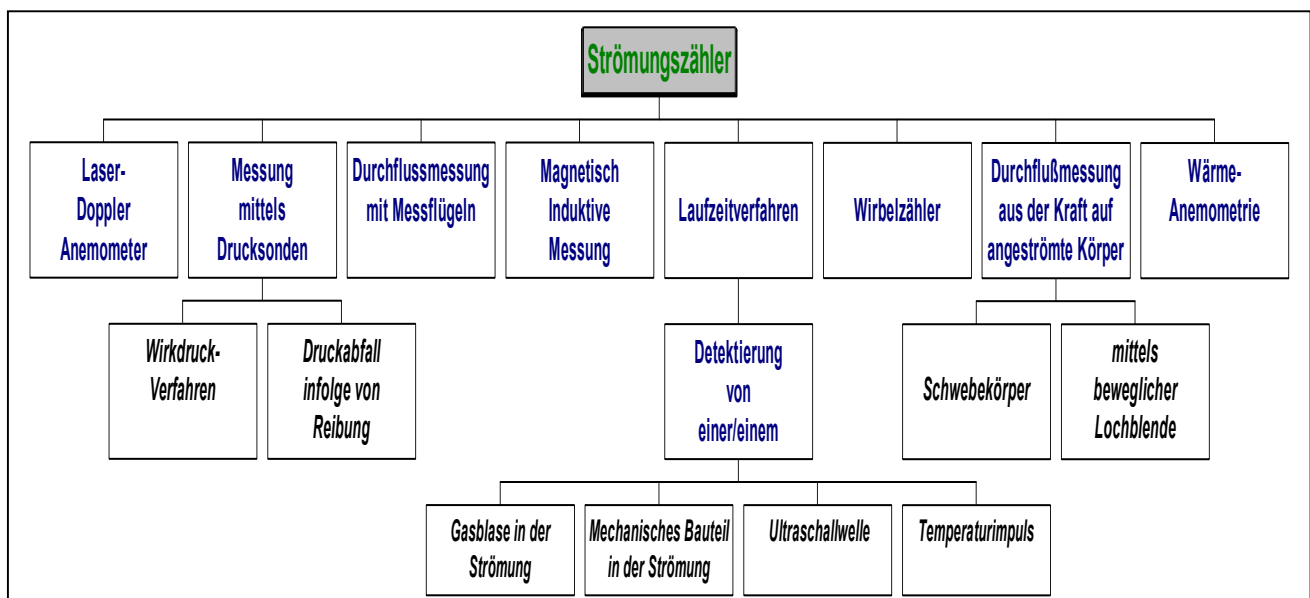


Abbildung 2-2: Strömungszähler-Typen.

Die **Laser-Doppler-Anemometrie** (in Abbildung 2-2 links oben dargestellt) hat sich seit den ersten Experimenten von Yeh und Cummins 1964 [Yeh64] zu einem modernen optischen

Messverfahren zur lokalen Geschwindigkeitsmessung entwickelt. Grundlage des Verfahrens ist der optische Doppler-Effekt, der das Vorhandensein von Streuteilchen im Fluid voraussetzt. Diese bewegen sich in Hauptströmungsrichtung und erzeugen bei verschiedenen Geschwindigkeiten verschiedene Frequenzverschiebungen des Laserstrahls, die als Messsignal dienen.

Zur Geschwindigkeitsbestimmung von Fluiden werden unter anderem **Drucksonden** verwendet. Grundlage ist die von Bernoulli abgeleitete Druckbilanz:

$$\text{Gleichung 2-8} \quad p_{\text{dynamisch}} = p_{\text{gesamt}} - p_{\text{statisch}}$$

Dabei wird zwischen der Messung mit statischen Drucksonden, mit Gesamtdrucksonden, z.B. einem Pitot-Rohr sowie deren Kombination, und zur Bestimmung von dynamischen Drücken mit Staudrucksonden bzw. Prantl'schen Staurohren unterschieden.

Die Druckabsenkung Δp zwischen einem normalen Rohrquerschnitt A_1 und dem verengten Querschnitt A_2 wird als **Wirkdruck** bezeichnet. Das daraus resultierende Wirkdruckverfahren ist eines der meist verwendeten Durchflussmessverfahren in der industriellen makroskopischen Durchflussmesstechnik. Grundlage für die Durchflussberechnung einer laminaren Strömung ist laut [Grav93],[Zier93] die aus der Bernoulli-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung entstandene Torricelli-Gleichung:

$$\text{Gleichung 2-9} \quad \dot{V} = A_2 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

(mit $A_2 =$ verengter Querschnitt)

Die nach DIN 1952 genormten Blenden, Düsen und Venturidüsen dienen als Drosselgeräte.

Eine weiteres Durchflussmessprinzip mittels Drucksonden ergibt sich aus dem **Druckabfall infolge von Reibung** am geraden oder am gekrümmten Rohr, dessen Zusammenhang für eine laminare Strömung über die Grenzschichttheorie nach Hagen-Poiseuille definiert ist:

$$\text{Gleichung 2-10} \quad \dot{V} = \frac{A^2}{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot L} \cdot \Delta p$$

(mit $\eta =$ dynamische Zähigkeit, $L =$ Rohrlänge)

Dieser Zusammenhang ergibt sich beim geraden Rohr aus dem Kräftegleichgewicht von Schub- und Druckkraft. Strömt dagegen ein zu messendes Medium durch ein gekrümmtes Rohr, entsteht infolge der Zentrifugalkraft ein Druckgefälle senkrecht zur Strömungsrichtung. Der Differenzdruck ist wiederum das Maß für den Volumenstrom [Fied92]:

$$\text{Gleichung 2-11} \quad \dot{V} = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot D^3 \cdot K^2 \cdot R \cdot \Delta p}{16 \cdot \rho}}$$

(mit $D = \emptyset$ -Rohr, $K =$ Krümmungskonstante, $R =$ Krümmungsradius, $\Delta p =$ Druckdifferenz zwischen Innen- und Außenwand des Rohres)

Zur Strömungsmessung in Luft oder Wasser sind **Messflügel** entwickelt worden, deren Flügelblätter einen festen oder einstellbaren Anstellwinkel zur Strömungsrichtung haben. Diese Strömungsmesser werden z.B. für Windmessungen benutzt. Für Messungen von Gas- und Flüssigkeitsströmen in Rohrleitungen werden Flügelräder eingesetzt, deren Messflügel den Messquerschnitt weitgehend ausfüllen. Die Messgröße zur Volumenstrombestimmung ist die Drehzahl des Flügelrades. Die bekanntesten Vertreter dieser Bauart sind der Woltman-Zähler, der Turbinenradzähler und der Flügelradzähler, die unter anderem bei der Heiß- und Kaltwasserzählung in Wohnhäusern zum Einsatz kommen.

Die von Faraday 1832 [Fara32] vorgeschlagene **magnetisch induktive Durchflussmessung** basiert auf einer Wechselwirkung zwischen der Strömungsgeschwindigkeit einer Flüssigkeit und einem Magnetfeld. Nach dem Faradayschen Induktionsgesetz entsteht in einer Flüssigkeit, die Ladungsträger mit sich führt und durch ein Magnetfeld fließt, eine elektrische Feldstärke senkrecht zur Strömungsrichtung und zum Magnetfeld. Fließt das zu messende Medium durch ein isoliert ausgekleidetes Rohr, in dessen Wand senkrecht zum Magnetfeld und Fließrichtung zwei Elektroden symmetrisch gegenüber angeordnet sind, entsteht an diesen ein elektrisches Potential, welches der über den Rohrquerschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit proportional ist:

Gleichung 2-12

$$U_{ind} = B \cdot c \cdot L$$

(mit U_{ind} = induzierte Messspannung, B = magnetische Flussdichte, L = Abstand der Elektroden)

Erste Experimente in der Themse bei London waren infolge von überlagerten Polarisierungseffekten nicht von Erfolg gekrönt. Erst 1920 gelang es Young [Youn20], eine Gezeitenstrommessung mit diesem Prinzip zu vollziehen. 1961 führte Shercliff [Scher61] den Wertigkeitsbegriff ein, der zeigt, dass elektrodennahe Gebiete stärker zur Messspannung beitragen als weiter entfernte. Die Hauptbedingung für eine derartige Durchflussmessung ist jedoch eine elektrische Mindestleitfähigkeit des Mediums von $\geq 0.05 \mu\text{S}$ [Fara32]. Dies ist bei allen wässrigen, basischen oder sauren Flüssigkeiten und Pasten durch die darin befindlichen frei beweglichen Ionen erfüllt. Die Entwicklung der elektronischen Schaltungstechnik hat wesentlichen Anteil für eine weit verbreitete Anwendung in Rohrleitungen bis zu einem Mindestdurchmesser von einigen Millimetern oder in offenen Gewässern.

Die Strömungsgeschwindigkeit kann darüber hinaus durch die Messung der Laufzeit von markierten Strömungsteilchen entlang eines in Hauptströmungsrichtung liegenden Weges, dem sog. **Laufzeitverfahren**, ermittelt werden. Grundvoraussetzung dafür ist, dass sich die betreffenden Strömungsteilchen mit der über den Querschnitt gemittelten Strömungsgeschwindigkeit bewegen. Markierungen, wie z.B. **mechanische Bauteile** in der Strömung, **Ultraschall- oder Temperaturimpulse**, aber auch **Gasbläschen**, die sich mit Mediumsgeschwindigkeit im Kanal bewegen, können detektiert werden.

1878 stellte Strouhal fest, dass ein Draht in einem Luftstrom in Schwingung gerät und die Schwingungsfrequenz der Strömungsgeschwindigkeit proportional ist. Der Draht kann als umströmter Staukörper angesehen werden, bei dem sich an den Grenzflächen Wirbel bilden, die sich periodisch ablösen. Das Strömungsfeld gleicht demnach einer Wirbelstraße, die Kármán untersucht und mathematisch begründet hat [Karm12]. Der Zusammenhang der Wirbel-

folgefrequenz f mit der Strömungsgeschwindigkeit c wird bei den sog. **Wirbelzählern** genutzt und ist durch die dimensionslose Strouhal-Zahl:

$$\text{Gleichung 2-13} \quad Sr = f \cdot \frac{d}{c}$$

für beliebige Staukörper der Breite d gegeben. Die Strouhal-Zahl ist allerdings nicht konstant, sondern von der Reynolds-Zahl abhängig.

Die wohl bekannteste **Durchflussmessung mittels der Kraft auf angeströmte Körper** ist das **Schwebekörper-Prinzip**. Es ist besonders für die Messung von optisch transparenten Flüssigkeiten und Gasen geeignet, da diese Medien eine einfache optische Lagedetektierung des meist konischen Schwebekörpers ermöglichen. Ein möglicher Ansatz für die Durchflussmessung mittels der Kraft auf angeströmte Körper ist die Verwendung von **Lochblenden**, die sich aufgrund einer vorhandenen Strömung biegen. Diese Durchbiegung kann z.B. mittels Dehnungsmessstreifen erfasst und als Maß für den Durchfluss angesehen werden. In Kapitel 3.2 wird auf diesen Ansatz genauer eingegangen.

Die **Wärme-Anemometrie** in Form von Hitzdrähten und Heißfilmen ist seit vielen Jahren bekannt. Das Messprinzip beruht auf der Detektion von Änderungen im Wärmeübergang eines elektrisch erwärmten Körpers an das ihn umströmende Fluid. Sind Temperatur, Zusammensetzung und Druck des Fluids konstant, ist die einzige Variable, die den Wärmeübergang beeinflusst, die Strömungsgeschwindigkeit. Grundlegende Arbeiten zur Wärmeableitung von einem langen dünnen Heizdraht wurden bereits 1914 von King publiziert [King14]. Im weiteren Verlauf der vorliegenden Arbeit wird ein Durchflusssensor nach dem thermisch anemometrischen Prinzip, mit einem neu entwickelten Messgrößenaufnehmer in Polymertechnik, vorgestellt.

Die nachfolgende Tabelle 2-1 gibt einen weiteren Überblick über die dargestellten Durchflussmessverfahren. Die Spalten 3-5 enthalten die Beurteilung, inwieweit die in Tabelle 1-1 dargestellten Anforderungen mit dem vorgestellten Verfahren realisiert werden können. Spalte 6 enthält das Bewertungsergebnis.

| (1) Durchfluss- messverfahren | (2) Physikalisches Wirkprinzip | (3) realisierbare Anforderungen | (4) Miniaturisierbarkeit | (5) AMANDA- Verfahren | (6) Ergebnis |
|----------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wägeverfahren | Masse wird pro Zeiteinheit bestimmt | Nur für Flüssigkeiten geeignet. | nicht geeignet | nicht geeignet | Das Wägeverfahren kann für Referenzmessungen und Kalibrierungen verwendet werden. |
| Corioliskraft-Massenstrommesser | Die Coriolis-Trägheitskraft wird zur Massenstrommessung genutzt. | Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Minimaler Messbereich für Wasser: 6g/min bzw. 6ml/min. | Ein Coriolismassenstrommesser wurde bereits in [Enok96] und [Zhan01] in mikromechanischem Maßstab in Siliziumtechnik hergestellt. | Da eine dreidimensionale mechanisch schwingende Rohrleitung benötigt wird, ist die Realisierung relativ aufwendig. | Ein mikromechanischer Aufbau eines Coriolismassenstrommessers ist mit der Siliziumtechnik, dem LIGA-Verfahren, oder der AMANDA-Technik nur mit großem Aufwand möglich. |
| Durchflussmesser mit Messflügeln | Rotierende Messflügel werden durch ein strömendes Medium angetrieben. Turbinenrad, Flügelrad-, Woltmannzähler | Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Nur für große Volumenströme $>> 50 \mu\text{l}/\text{min}$ geeignet (vergleiche Kapitel 3.1.1). | In einer früheren Arbeit [Wall96] wurde eine Mikroturbine mit dem LIGA-Verfahren am FZ-Karlsruhe hergestellt, die als Turbinenradzähler für große Durchflüsse eingesetzt werden kann. Turbinenabmaße: $\varnothing = 130 \mu\text{m}$, $H = 150 \mu\text{m}$, Zähne = 8. | Die Herstellung beweglicher, rotierender Teile ist mit einem größerem Aufwand verbunden. | Ein Aufbau mit der Silizium-Mikromechanik oder dem LIGA-Verfahren ist möglich. Dieser ist jedoch nur für große Durchflüsse aufgrund von Lagerreibung und Leckagen zwischen Messflügeln und Gehäuse sinnvoll. |
| Volumetrischer Zähler | Volumenzähler mit festen oder beweglichen Messkammerwänden. Merkmal ist die Quantisierung des Volumens durch die Summierung von Teilvolumina über der Zeit. | Für inkompressible Medien (Flüssigkeiten) geeignet; für Gase nur bedingt. Minimalste Volumina, auch unterhalb der Nachweisgrenze, detektierbar (Kapitel 3.1.2). | Ein mikromechanischer Aufbau wird in dieser Arbeit dargestellt. | geeignet | Die Dostierung kleinster Volumina ist mit einem mikromechanisch hergestellten Volumetrischen Zähler sehr gut möglich. |

| | | | | | |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Laser-Doppler-Anemometer | Streuteilchen im zu messenden Medium erzeugen bei verschiedenen Geschwindigkeiten verschiedene Frequenzverschiebungen des Laserstrahls, die als Messsignal dienen. | Für optisch transparente Flüssigkeiten und Gase geeignet. 10 ⁴ Messwerte pro Sekunde. Detektierung kleinster Volumenströme theoretisch möglich. | Eine Miniaturisierung wird möglich, wenn eine sehr genaue Positionierung von Sender und Empfänger zum Kanal ermöglicht wird, da eine definierte Strahlführung zum Messvolumen erforderlich ist. | Kanäle können mittels Abformung hergestellt werden. Laser, Photodetektor als Zukaufteile. | Ein Online-Messaufbau eines Laser-Doppler-Anemometers ist sehr teuer und wird daher vor allem in makroskopischen Anwendungen oder für Versuchsaufbauten verwendet. |
| Magnetisch-induktive Durchflussmessung | Die Fluidgeschwindigkeit wird über das Faradaysche Induktionsgesetz bestimmt. | Nur für Flüssigkeiten mit einer Mindestleitfähigkeit von $\geq 0,05 \mu\text{S}$ geeignet. Messbereich: ein Volumenstrom von 0,1 $\mu\text{l}/\text{min}$ induziert bei bestmöglichen Bedingungen eine Messspannung von gerade einmal 10^{-8}V . | Eine Miniaturisierung wurde in [Stra98] vorgestellt. Hierbei wurden in Dickschichttechnik galvanisch gekoppelte Elektroden in ein Rohr mit einem \varnothing von 2,5mm platziert. Volumenströme im Bereich von 700ml/min wurden gemessen. | Ein Aufbau ist mit dem AMANDA-Verfahren möglich. Kanäle und Elektroden werden in PVD-Verfahren gefertigt. Zukaufteile: Elektromagnete. | Auf einen Aufbau eines magnetisch induktiven Durchflusssensors (MID) wurde aufgrund des zu hohen Volumenströmbereichs verzichtet. Jedoch wäre ein mikromechanisch hergestellter MID für Volumenströme $> 1\text{ml}/\text{min}$ eine sehr interessante Alternative. |
| Messung mittels Drucksonden | Druckabfall wird aufgrund einer Querschnittsverengung oder infolge von Reibung mittels Drucksensoren gemessen und zur Geschwindigkeitsbestimmung herangezogen. | Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Ein Geschwindigkeitsbestimmung über eine Querschnittsverengung ist nur für Messbereiche $> 10 \mu\text{l}/\text{min}$ geeignet. Eine Geschwindigkeitsbestimmung aufgrund Reibung ist für kleine Volumenströme möglich. | Eine Miniaturisierung ist möglich und wurde in [Oost97] und [Berb98] gezeigt. Dabei erfolgte die Bestimmung der Mediumsgeschwindigkeit einerseits nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille, d.h. infolge von Druckverlusten aufgrund von Reibung, andererseits mit einem Prandtl'schen Staurohr. | Mit dem AMANDA-Verfahren wurde bereits in einer früheren Arbeit ein Durchflusssensor nach dem Gesetz von Hagen-Poiseuille realisiert [Mart98]. Abweichungen im Messergebnis bereits bei leichten Verschmutzungen des Kanals erwiesen sich als Nachteil. | Die kostengünstig herzustellenden Sensoren haben den Vorteil, ohne bewegliche Teile in der Strömung zu arbeiten. Jedoch führen Schmutzablagerungen an der Drosselstelle zu hohen Messfehlern. Zusätzlich „drosseln“ sie den Durchfluss und verursachen somit Druckverluste. |

| | | | | | |
|----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wirbelzähler | Die Strömungsgeschwindigkeit ist der Wirbelhofeffizienz hinter einem im Strömungskanal befindlichen Staukörpers proportional. | Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Wirbelablösung erst ab $Re > 300 \Rightarrow$ für kleine Volumenströme ungeeignet. | Ein miniaturisierter Aufbau ist möglich. | Der Aufbau eines Wirbelzählers ist mit dem AMANDA-Verfahren möglich. Aufbau des Kanals, Staukörpers und mögliche thermische Wirbelabnehmer durch Abformung bzw. Membranherstellung. | Dieses Sensorprinzip eignet sich wegen eines linearen Zusammenhangs von Wirbelfrequenz und Volumstrom, der Unabhängigkeit von Druck, Temperatur und Viskosität für größere Durchflüsse. |
| Laufzeitverfahren | Messung der Laufzeit eines sich mit Strömungsgeschwindigkeit im Kanal bewegendes markierten Teilchens. Markierungen: Temperaturimpuls, Feststoffteilchen, Gasblase, Ultraschall. | Für Flüssigkeiten und Gase in allen Messbereichen geeignet. Voraussetzung: Markierung bewegt sich mit Mediumsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung. | Eine Miniaturisierungsmöglichkeit ist in [Yang92] dargestellt. Danach sind zwei Siliziumsäulen im Fluid eingetaucht. Der von einer Säule ausgehende Temperaturimpuls wird nach Strömungsgeschwindigkeit von der zweiten Säule nach der Zeit t detektiert. | Das AMANDA-Verfahren ist für den Aufbau eines Ultraschallsensors eher ungeeignet (vergl. Laser-Doppler-Anemometer). Weitere Aufbauten (Temperaturimpuls, Gasblase, Feststoffteilchen) sind mit dem AMANDA-Verfahren möglich. | Das Laufzeitverfahren ist eine interessante Variante für die Mikrosonik. Ein Sensoraufbau nach dem Temperaturimpulsverfahren kommt aber aufgrund der hohen benötigten lokalen Erwärmung des Fluides nicht in Frage. Die Messungen mittels Festkörper bzw. Gasblase sind eher ungeeignete Messverfahren und können höchstens für Kontrollmessungen verwendet werden. |
| Thermische Massenstrommesser (Kalorimetrisches Prinzip) | Lineare Abhängigkeit zwischen der Masse und dem Betrag der erforderlichen Energie, um das Fluid auf eine bestimmte Temperatur ΔT zu erhöhen. Gemessen wird der von einem Körper ausgehende und im Fluid transportierte Wärmestrom. | Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Messbereich $0,1 \mu\text{l}/\text{min}$ erreichbar. Maximale Erwärmung des zu messenden Mediums einstellbar. | Thermische Massenstrommesser wurden bereits mikromechanisch hergestellt [Bosc94], [Lamm93]. Diese beschränken sich jedoch alle auf die Siliziumtechnik. Dies ist unter anderem mit den schnellen Ansprechzeiten der Sensoren gerechtfertigt. | Ein Aufbau ist mit dem AMANDA-Verfahren möglich und wird im Verlauf der Arbeit beschrieben. | Das eingriffsfreie, für kleine Rohrströmungen gut geeignete Massstrom-Messverfahren ist unabhängig von Druck, Temperatur und Viskosität. Eine Aufbaumöglichkeit wird im Verlauf der Arbeit vorgestellt. |

| | | | | | |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Durchflussmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper</p> | <p>Ein Widerstandskörper, der von einem Fluid angeströmt wird, erfährt eine Kraft, die von der Dichte des Mediums, der in Strömungsrichtung wirkenden Querschnittsfläche und der mittleren Fluidgeschwindigkeit abhängig ist. Ausführungen: Schwabekörper, bewegliche Lochblende.</p> | <p>Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Messbereich 0,1 µl/min erreichbar.</p> | <p>Miniaturisierung möglich (siehe Kapitel 3.2)</p> | <p>Ein Aufbau mit Lochblenden ist mit dem AMANDA-Verfahren möglich und wird im Verlauf der Arbeit theoretisch beschrieben.</p> | <p>Mechanische Bauteile, wie z. B. ein Schwabekörper in einer Strömung sind im mikrotechnischen Maßstab sehr schwierig zu realisieren (vergl. Laufzeitverfahren: mechanisches Bauteil). Ein Aufbau mit Lochblenden kann verwendet werden und wird im Rahmen der Arbeit näher erläutert.</p> |
| <p>Wärme-Anemometrie</p> | <p>Im Gegensatz zum kalorimetrischen Prinzip, beruht das Messprinzip auf der Detektion von durchflussabhängigen Änderungen im Wärmeübergang eines elektrisch erwärmten Körpers an das ihn umströmende Fluid. Sind Temperatur, Zusammensetzung und Druck des Fluids konstant, ist die einzige Variable, die den Wärmeübergang beeinflusst, die Strömungsgeschwindigkeit.</p> | <p>Für Flüssigkeiten und Gase geeignet. Messbereich: <0,1 µl/min erreichbar.</p> | <p>Einige thermisch anemometrische Durchflusssensoren wurden bereits mikromechanisch hergestellt, z.B. [Putt74], [Mull95]. Diese verwenden jedoch ausschließlich Silizium als Werkstoff.</p> | <p>Ein thermisch anemometrischer Durchflusssensor wurde mit Hilfe des AMANDA-Verfahrens aufgebaut, ausführlich getestet und danach optimiert. Eine ausführliche Darstellung erfolgt im Rahmen dieser Arbeit.</p> | <p>In dieser Arbeit wird der erste thermisch anemometrisch arbeitende Durchflusssensor aus Kunststoffen vorgestellt.</p> |

Tabelle 2-1: Bewertung der Durchflussmessverfahren hinsichtlich der zu erfüllenden Anforderungen.

3 Ausgewählte Durchflussmessverfahren

Im folgenden Kapitel wird auf einige Ansätze ausgewählter Durchflussmessverfahren näher eingegangen. Diese zeigten bei der Bewertung gute Eigenschaften hinsichtlich der Erfüllung der messtechnischen Anforderungen, ihrer Miniaturisierbarkeit und eines möglichen Aufbaus mit dem AMANDA-Verfahren. Die in dem folgenden Kapitel dargestellten Figuren sind meist nicht maßstäblich gezeichnet; damit soll erreicht werden, sehr dünne bzw. kleine Strukturen neben vergleichsweise großen Strukturen deutlich zu machen.

3.1 Volumetrische Zähler

Ein Merkmal der Volumenmessung ist die Quantisierung des Volumenstromes. Die Teilmengen werden aufsummiert und bilden pro Zeiteinheit den Volumenstrom:

$$\text{Gleichung 3-1} \quad V = \sum_i \Delta V_i$$

$$\text{Gleichung 3-2} \quad \dot{V} = \Delta V / \Delta t$$

Bei volumetrischen Zählern wird zwischen Verdrängungs- und Auslaufzählern, deren mikrotechnische Aufbaumöglichkeiten nachstehend aufgezeigt werden, unterschieden.

3.1.1 Verdrängungszähler

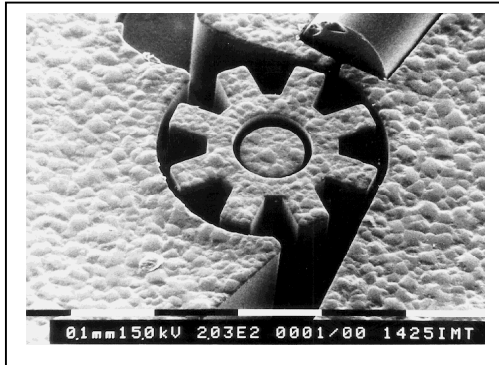
In Verdrängungszählern erfolgt die unmittelbare Volumenmessung mittels beweglicher Messkammerwände, die von dem unter Druck stehenden Messgut angetrieben werden. Verdrängungszähler sind aufgrund ihrer Wirkungsweise meist umkehrbar, d.h. es ist prinzipiell auch ein Förderbetrieb möglich. Als Beispiele sind das Flügelrad und verschiedene Systeme unter Verwendung der Mikroaktorik zu nennen.

Eine im makroskopischen Bereich weit verbreitete Zählart für Flüssigkeiten ist der sogenannte Flügelradzähler. Sein Vorteil liegt in der Förderung definierter Volumina durch vorgegebene Kammern. Da jedoch eine komplette Abdichtung zwischen Flügel und Kammerwand nicht erreicht werden kann, ist dieses Prinzip im mikroskopischen Bereich, d.h. für sehr kleine Volumenströme ungeeignet. Zwar ist durch eine geeignete Anordnung von Strahlein- bzw. austritt, sowie durch Ausnutzung des hydrostatischen Drucks die Möglichkeit gegeben, Leckagen zu minimieren, doch ist damit eine vollkommene Abdichtung nicht zu erreichen. Flexible Lamellen, die an den Messflügeln angebracht sind und das Flügelrad zur Messkammer abdichten, würden dieses Problem zwar lösen, jedoch die Reibungsverluste deutlich erhöhen. Die Umlenkung des Fluids und die Reibung im Lager des Rades haben einen weiteren Druckverlust zur Folge. Für mikromechanische Dimensionen sowie kleine Durchflüsse sind diese Ansätze unbrauchbar, wie das nachfolgende Rechenbeispiel zeigt.

Als mikrotechnische Realisierungsmöglichkeit kommt in erster Näherung eine Mikroturbine, die im Institut für Mikrostrukturtechnik am Forschungszentrum Karlsruhe in der LIGA-

Technik aufgebaut wurde, in Frage (siehe Abbildung 3-1) [Wall96]. Die Turbine besitzt folgende Abmaße: $d=130 \mu\text{m}$ / $\text{Höhe}=150 \mu\text{m}$ / $\text{Zähne}=8$.

Als Lagerungsart wird ein Luftgleitlager verwendet. Bei einem Volumenstrom von:



$$\dot{V} = 750 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$$

ergibt sich eine Turbinendrehzahl von 2000 U/sec . Für entsprechend kleinere Volumenströme sind nachfolgend die dazu gehörigen Drehzahlen angegeben:

$$\dot{V} = 0.1 \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \Rightarrow 1 \text{ U/h}$$

$$\dot{V} = 50 \frac{\mu\text{l}}{\text{min}} \Rightarrow 8.33 \text{ U/min}$$

Abbildung 3-1: Mit dem LIGA-Verfahren hergestellte Mikroturbine.

Erkennbar ist, dass durch niedrige Volumenströme niedrige Drehzahlen und lange Messzeiten entstehen. Die ermittelten Werte sind mit den konstant angenommenen Reibungsverlusten der hohen Drehzahl skaliert worden. Als Ergebnis ist festzustellen, dass aufgrund der hohen Lagerreibung im Verhältnis zur kleinen Antriebskraft, es zu keiner Bewegung der Turbine kommt. Der vorhandene Volumenstrom zieht sich vielmehr durch die Spalte zwischen Messflügel und Kammer. Dieses Messprinzip ist deshalb nur für Volumenströme $\gg 50 \mu\text{l/min}$ geeignet.

Während der Einsatz eines Mehrstrahl-Flügelradzählers [Trän98] lediglich eine gewisse Verringerung des Druckverlustes aufgrund der Lagerreibung bewirken würde, ist ein servogesteuerter Aufbau in der Lage, dieses Problem zu beseitigen. Bei diesem Ablauf wird der Volumenstrom derart geregelt, dass der Betrag des Eingangsdrucks gleich dem Ausgangsdruck ist. Der servogesteuerte Antrieb kann durch ein Aktorsystem, z.B. mit einem elektrostatischen Antrieb, realisiert werden. Unabhängig davon ist die Schmutzempfindlichkeit eines miniaturisierten Flügelradzählers ein weiterer Nachteil. Durch Ablagerungen kann es unter anderem zum Verklemmen eines oder mehrerer Messflügel mit der Kammerwand kommen.

Mit Hilfe von Aktoren lassen sich dennoch Energieflüsse oder Volumenströme zielgerecht einstellen. In der Mikroaktorik werden verschiedene Aktorprinzipien untersucht. Elektrostatische, piezoelektrische oder Formgedächtnis-Prinzipien besitzen beispielsweise ein günstiges Skalierungsverhalten bzw. ein hohes spezifisches Arbeitsvermögen; dies ist für den Einsatz in Mikrosystemen sehr gut geeignet [Jano92]. Im nachfolgenden werden deshalb verschiedene volumetrische Zähler mit integrierten Aktoren, einschließlich ihrer Eigenschaften, dargestellt.

Ein einfacher schematischer Aufbau eines Zählers ist in Abbildung 3-2a zu sehen. Der Sensor besteht aus 3 Aktoren und einer Messkammer. Die Aktoren werden derart geschaltet, dass die Messkammer vollständig befüllt und danach aktiv durch die Hubbewegung von Aktor 2 wieder entleert werden kann. Ein zweiter Aufbau ist in Abbildung 3-2b dargestellt. In diesem Fall werden die Aktoren 1 und 3 durch zwei passive Ventile ersetzt. Wird der Aktor in der Messkammer nach oben bewegt, entsteht in diesen ein Unterdruck und das Messfluid wird durch das linke passive Zulaufventil angesaugt. Gleichzeitig dichtet das zweite passive Ventil rechts (Ablaufventil) die Messkammer nach außen ab. Nach der Kammerbefüllung bewegt sich der Aktor nach unten und das Fluid kann, bei gleichzeitiger Dichtwirkung des Zulaufventils, über

das Ablaufventil hinausgefördert werden. Als Messsignal dient jeweils die Anzahl der Befüllungen. Unter Verwendung von Aktoren mit geringen Schaltzeiten, wie z.B. Piezoantrieben und einer parallelen Anordnung mehrerer Messkammern, ist damit eine quasi-kontinuierliche Messung möglich. Die passiven Ventile können mit flexiblen, strukturierten Membranen realisiert werden.

Die Vorteile dieses Messprinzips sind die definiert messbaren Volumina, ausgelöst durch definierte Hübe der Aktorantriebe oder die Pumpwirkung des Aktors über der Messkammer. Probleme können dennoch durch Undichtigkeiten der passiven als auch aktiven Ventile, sowie durch ein eventuelles Totvolumen in den Messkammern hervorgerufen werden.

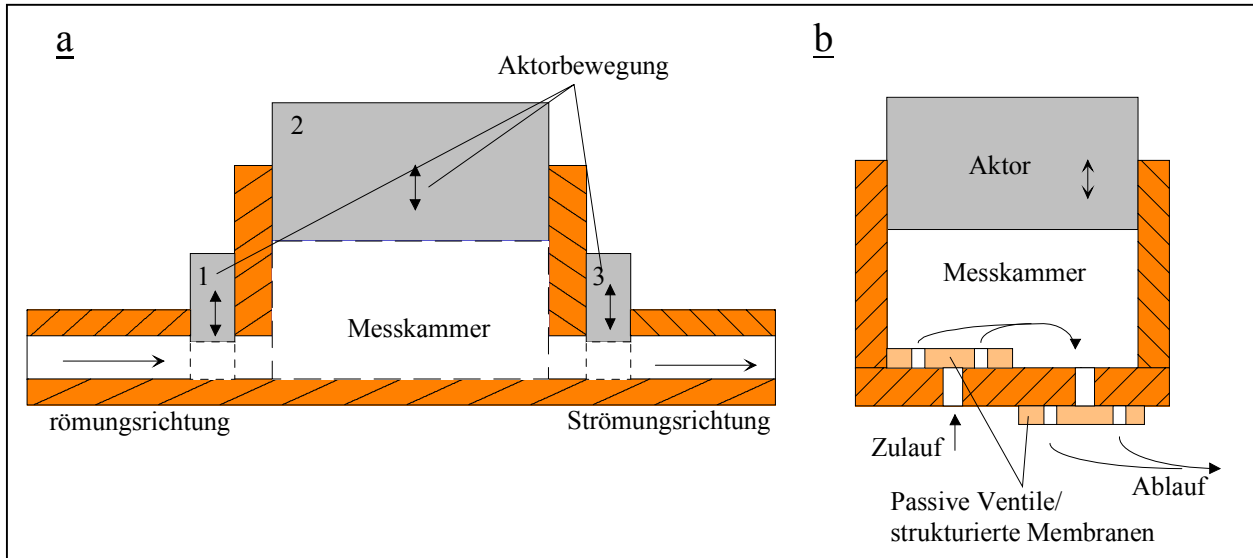


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung eines: a) volumetrischen Zählers mit drei aktiven Antrieben und b) eines volumetrischen Zählers mit einem aktiven Antrieb und zwei passiven Ventilen.

3.1.2 Auslaufzähler

Auslaufzähler sind durch feste Messkammerwände gekennzeichnet. Die Messräume werden unter geringem Überdruck befüllt und selbsttätig wieder entleert. Abbildung 3-3 zeigt einen einfachen, für große Volumina geeigneten Auslaufzähler. Es ist leicht erkennbar, dass bei kleinen Volumina die drucklose Entleerung der Kammern aufgrund adhäsiver Probleme und zusätzlicher Kapillareffekte problembehaftet ist. Die Messkammern müssen vielmehr aktiv mittels Aktoren, wie unter Kapitel 3.1.1 beschrieben, oder mittels Druckluft entleert werden.

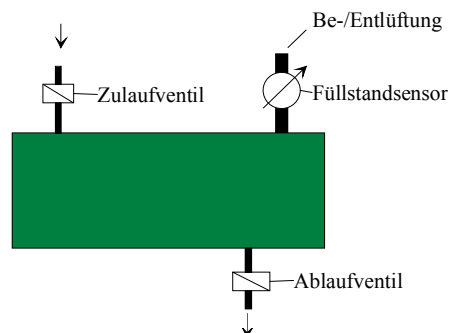


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung eines einfachen Auslaufzählers.

Der Aufbau eines in dieser Arbeit neuartig konzipierten polymeren membranbasierenden volumetrischen Zählers, der mit dem AMANDA-Verfahren realisiert werden kann und ohne aktiven Aktorantrieb auskommt, wird nachfolgend dargestellt. Der Sensor besteht im wesentlichen aus zwei Messkammern mit fluidischen Anschlüssen, die durch eine flexible, am Rand fest eingespannte Membran, getrennt sind. Abbildung 3-4 zeigt den schematischen Aufbau.

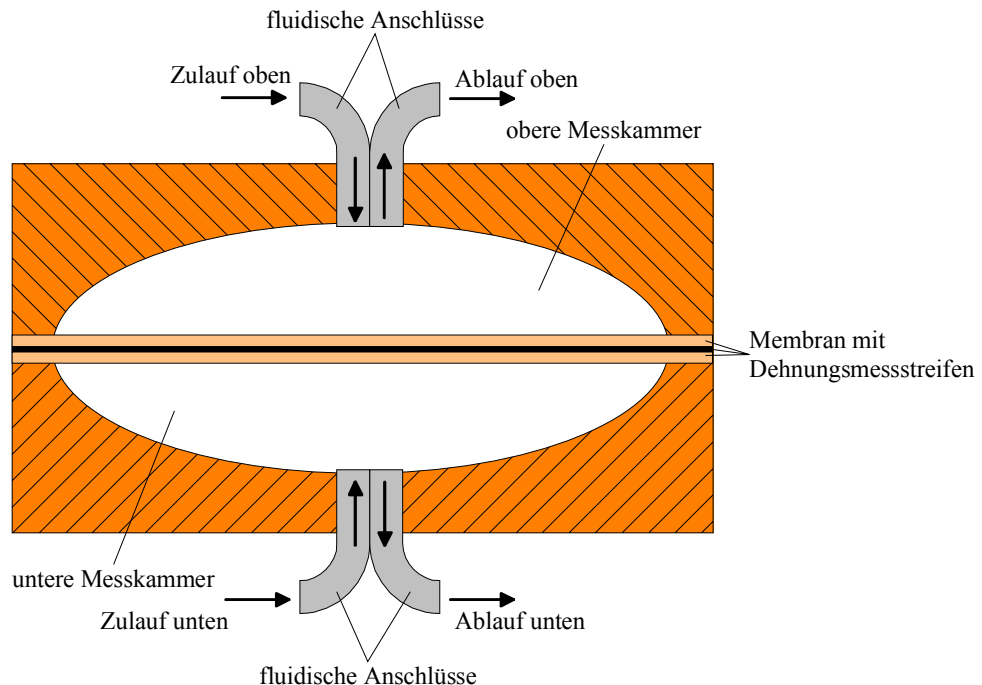


Abbildung 3-4: Mit dem AMANDA-Verfahren aufgebauter volumetrischer Zähler ohne aktiven Antrieb.

Die beiden Messkammerhälften werden mit den bekannten Methoden der Mikroabformung gefertigt und sind gehäuseseitig in der Form einer Hohlkugel ausgebildet. Auf der Gegenseite werden diese durch die flexible Membran begrenzt. Die am Rand fest eingespannte Membran besteht aus zwei jeweils $1\mu\text{m}$ dicken Lagen Polyimid, zwischen denen 100 nm dicke Dehnungsmessstreifen aus Platin oder Gold angebracht sind.

Für den Betrieb dieses Sensors werden zunächst außerhalb des Sensors liegende Ventile so geschaltet, dass der untere Hohlraum über den unteren Fluidanschluss (Ablauf) entleert wird. Dabei wird die Membran, die sich zunächst in Mittelstellung befand, durch das, durch den oberen Fluidanschluss (Zulauf), einströmende Medium auf das untere Gehäuseteil zu bewegt (Abbildung 3-5a). Dies ist aufgrund der im Verhältnis zu ihrer lateralen Ausdehnung dünnen Membran aus dem leicht dehnbaren, elastischen Material Polyimid möglich. Die Membran ist mit einer so geringen mechanischen Vorspannung im Gehäuse angebracht, dass sie der Bewegung des in die Hohlräume einfließenden Mediums, ohne wesentliche Druckdifferenz, problemlos folgen kann. Die Membrandehnung nimmt bei diesem Vorgang solange zu, bis der bewegliche Teil der Membran sich entweder an die Kammerwand angelegt oder ein vorher definiertes Maximum erreicht hat (Abbildung 3-5b).

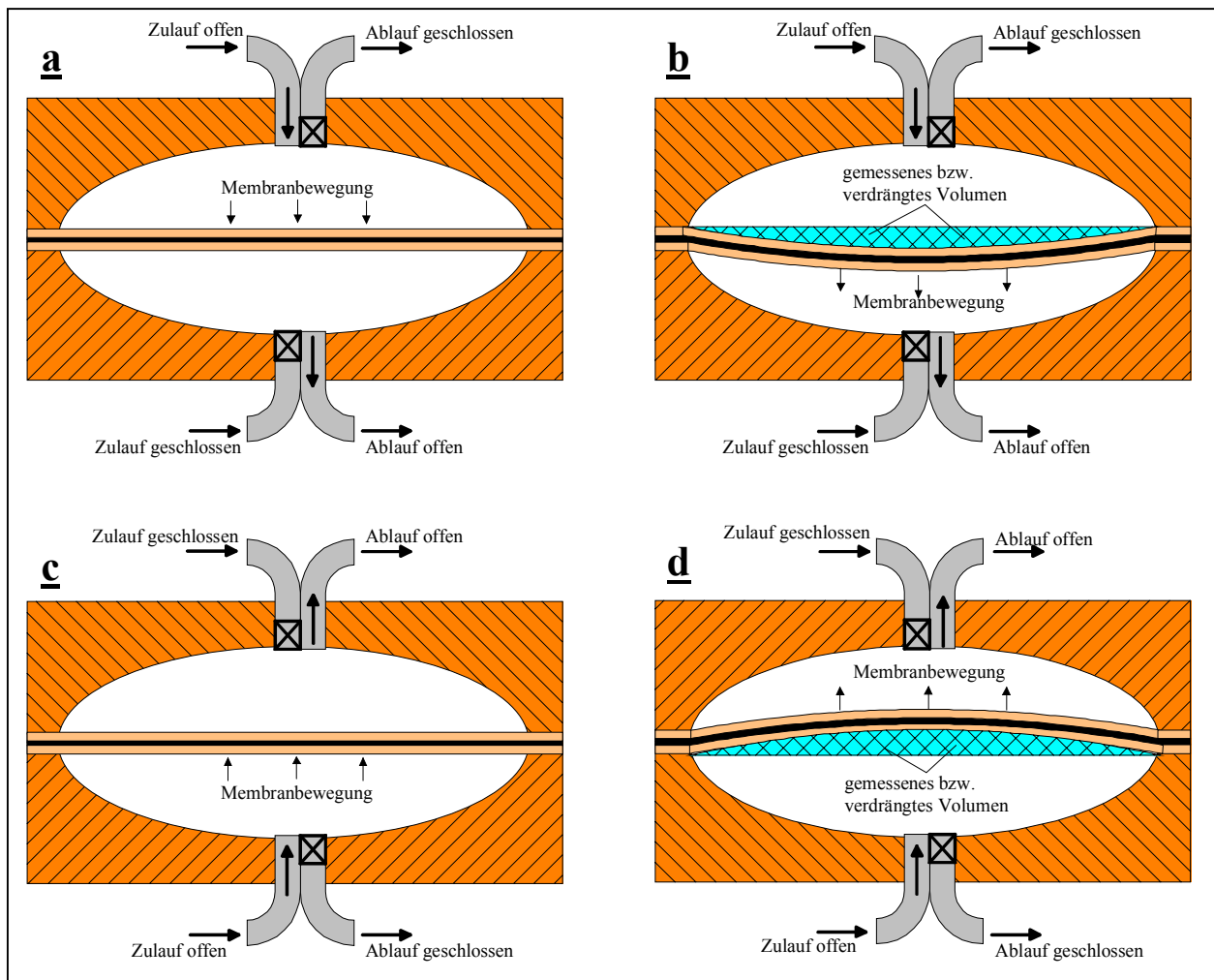


Abbildung 3-5a-d: Funktionsweise des volumetrischen Zählers bei verschiedenen Membranstellungen (a-d).

Der elektrische Widerstand des Dehnungsmessstreifens erhöht sich während des Vorgangs und wird mit einer Wheatstone'schen Brückenschaltung gemessen. Die Auslenkung der Membran ist eine lineare Funktion der in den Sensor eingeströmten Fluidmenge. Das erhaltene Messsignal entspricht somit dem halben Kammervolumen bzw. dem Volumen zwischen Mittelstellung und definierten Maximum der Membran (Abbildung 3-5b). In Abbildung 3-6 ist der durch geeignete Gestaltung des Dehnungsmessstreifens linearisierte elektrische Widerstand schematisch als Funktion der Zeit dargestellt. Zusätzlich sind in Abbildung 3-6 die verschiedenen Membranstellungen (vergleiche Abbildung 3-5a-d) gekennzeichnet. Die Steigung der in Abbildung 3-6 dargestellten Kurvenstücke ist zusätzlich auch ein direktes Maß für die Strömungsgeschwindigkeit.

Durch Umschalten der Ventile strömt das zu messende Medium durch den unteren Zulauf und bewegt die Membran in die entgegengesetzte Richtung. Dabei wird das vorher volumetrisch bestimmte Medium durch den oberen Ablauf wieder aus der Kammer hinausbefördert. Der elektrische Widerstand nimmt dabei wieder ab, bis er sein Minimum in der Mittelstellung erreicht hat (Abbildung 3-5c). Danach nimmt er stetig wieder zu, bis er ein oberes Maximum erreicht hat (Abbildung 3-5d). Durch Umschalten der Ventile bewegt sich die Membran wieder in Richtung der Mittelstellung, so dass sich der gerade beschriebene Vorgang wiederholt.

Der elektrische Widerstand des Dehnungsmessstreifens ist in der Regel abhängig von Temperaturänderungen. Durch diese Änderungen könnte eine Strömung vorgetäuscht werden, so dass sich der Wert des elektrischen Widerstandes des Dehnungsmessstreifens mit der Zeit langsam verändern würde. Der Vorteil des Sensors liegt darin, dass der elektrische Widerstand des Dehnungsmessstreifens durch ein Minimum geht, wenn die Membran sich über die Mitte zwischen beiden Gehäuseteilen bewegt. Zu diesem Zeitpunkt (Erreichen des minimalen elektrischen Widerstands) kann eine Rekalibrierung des Sensors vorgenommen werden.

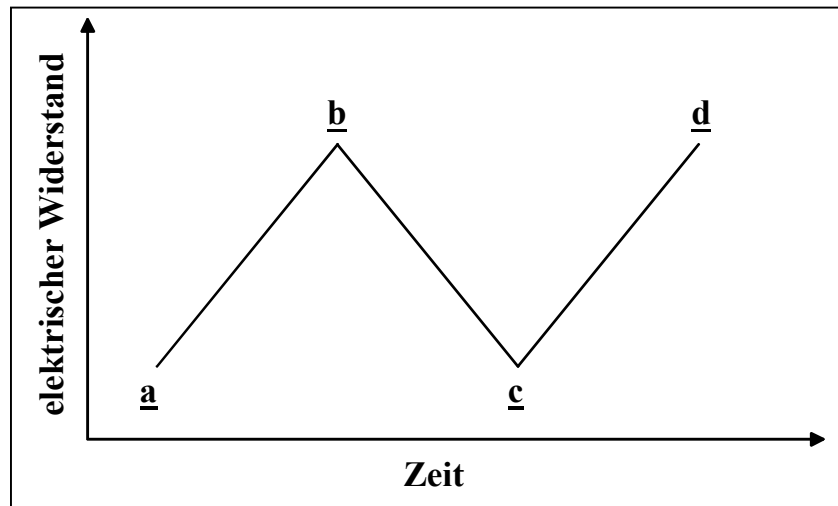


Abbildung 3-6: Elektrischer Widerstand der Dehnungsmessstreifen als Funktion der Zeit.

Die beschriebene Ausgestaltung des Durchflusssensors hat den Vorteil, dass auch kleine Flussraten, die unterhalb der Nachweisgrenze liegen, erfasst werden können, da sie über lange Zeiten zu merklichen Änderungen der Membrandehnung führen. Darüber hinaus wirken sich Verschmutzungen im Sensor oder in den Zuleitungen und Änderungen der mechanischen Spannung der Sensormembran nicht auf das Messergebnis aus, weil die Auslenkung der Membran unmittelbar proportional zur durchströmten Fluidmenge ist.

Ein Nachteil dieses Sensors besteht darin, dass eine Umkehr der Strömungsrichtung in dem Moment, in dem sich die Membran in der Nähe ihrer Mittelstellung befindet, nicht erkannt werden kann, weil der elektrische Widerstand des Dehnungsmessstreifens an dieser Stelle durch ein Minimum läuft und es unabhängig von der Strömungsrichtung zu einem Anstieg des Widerstandes kommt. In Abbildung 3-7 ist deshalb eine diesen Nachteil vermeidende Anordnung dargestellt. Dabei ist auf der unteren Gehäusenhälfte eine seitliche Abstützung der Membran vorgesehen. In diesem Bereich ist ein weiterer Dehnungsmessstreifen zwischen den Membranlagen angebracht, dessen Signal darüber Auskunft gibt, in welche Richtung die Membran ausgelenkt ist. Der Dehnungsmessstreifen erfährt eine geringere Dehnung, wenn die Membran in Richtung des unteren Hohlraumes ausgewölbt wird. Wird die Membran in die umgekehrte Richtung ausgelenkt, wird dagegen der Dehnungsmessstreifen mehr gedehnt.

Als Messstoffe kommen in erster Linie inkompressible Medien, d.h. Flüssigkeiten in Frage. Gase sind aufgrund ihrer Kompressibilität eher ungeeignet. Nachteilig bei dem hier beschriebenen Sensorkonzept ist, dass vier 2/2-Wege-Ventile bzw. zwei 3/2-Wege-Ventile (z. B. Piezomikroventil oder Formgedächtnismikroventil [Kohl00], [Ditt98]) für den Betrieb benötigt werden. Die Ansprechzeiten des Sensors hängen demnach von den Ansprechzeiten der Ventile ab. Da zur Zeit der Planungen die Ventile noch nicht zur Verfügung standen bzw. die Ansprechzeiten der Ventile noch zu groß waren, wurde dieser Sensortyp im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiterverfolgt.

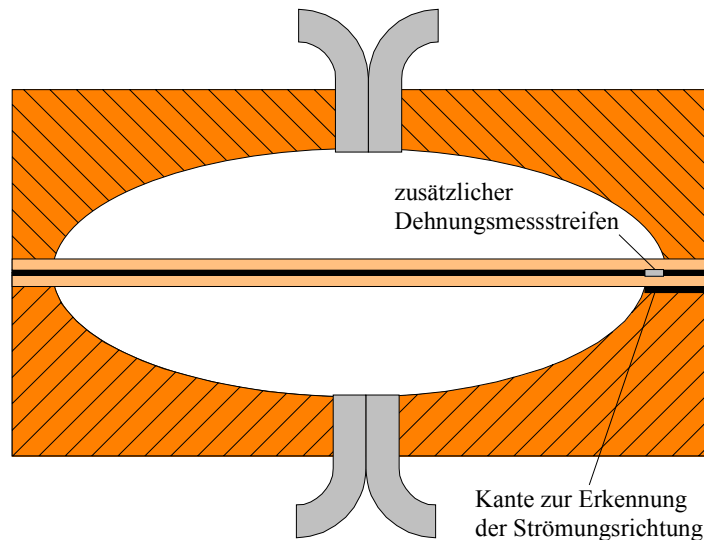


Abbildung 3-7: Zur Erkennung der Strömungsrichtung optimierter Aufbau des volumetrischen Zählers.

3.2 Durchflussmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper

Wird ein Widerstandskörper von einem zu messenden Fluid angeströmt, erfährt dieser eine Kraft, die von der Dichte des Mediums, der in Strömungsrichtung wirkenden Querschnittsfläche und der mittleren Fluidgeschwindigkeit abhängig ist. Das in diesem Zusammenhang wahrscheinlich bekannteste Messprinzip ist die Schwebekörper-Durchflussmessung, die wegen einer optischen Lagedetektierung des Schwebekörpers besonders für die Messung von optisch transparenten Flüssigkeiten und Gasen geeignet ist. Nichttransparente Fluide erfordern dagegen einen Metallschwebekörper, da die Positionserfassung induktiv erfolgen muss. Verschiedene Modifikationen, wie der Federscheiben- oder der Klappendurchflussmesser, werden in [Bonf90] beschrieben. Auf den Aufbau eines mikromechanischen Schwebekörperdurchflussmessers wird in dieser Arbeit nicht eingegangen, da es sich um ein Messprinzip handelt, das nur mit großem Aufwand realisiert werden könnte, weil sich ein frei bewegliches Bauteil in der Strömung befindet.

Eine weitere Modifikation eines Schwebekörperdurchflussmessers ist in [Kobo93] zu finden und wird kurz beschrieben. In einem zylindrischen Rohr gleitet entlang der Innenwand ein Widerstandskörper mit einer Lochblende. Durch deren Öffnung strömt das gesamte Messfluid und lenkt diese aus. Der Bewegung wirkt eine Federkraft entgegen. Wesentliches Bauteil ist bei diesem System die Lochblende, die der Norm einer Messblende entspricht. Der Druckverlust an der Lochblende ist der Strömungskraft proportional und über einen weiten Bereich viskositätsunabhängig. Während dies zu den besonderen Vorteilen des Meßsystems zählt, ist die Wurzelabhängigkeit des Volumenstroms zur Auslenkung negativ zu bewerten. Um diese Abhängigkeit zu vermeiden, wird eine Feder mit progressiver Kennlinie eingesetzt, d.h. eine Feder, deren Richtkraft mit der Auslenkung zunimmt.

Wird dieses Messprinzip in die Mikrosystemtechnik übertragen, kann die Blende in Form einer Membran mit Mitteloch aufgebaut werden. Bei einem Volumenstrom durch das Mittel-

loch wird die Membran aufgrund des Druckverlustes in Strömungsrichtung ausgelenkt. Dehnungsmessstreifen, die auf der Membran angeordnet sind, messen die Auslenkung, die als Maß für den Volumenstrom dient. Als Membranmaterialien können verschiedene Kunststoffe, Glas, Silizium oder Metalle verwendet werden. Nachfolgend wird die Konzeptionsphase eines temperaturkompensierten Durchflusssensors mit Lochblenden aus Polymeren in den einzelnen Phasen dargestellt.

Grundlage für die Durchflussberechnung einer laminaren Strömung aufgrund des Druckverlustes ist laut [Grav93],[Zier93] die aus der Bernoulli-Gleichung und der Kontinuitätsgleichung entstandene Torricelli-Gleichung:

$$\text{Gleichung 3-3} \quad \dot{V} = \frac{A}{\sqrt{\xi}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}}$$

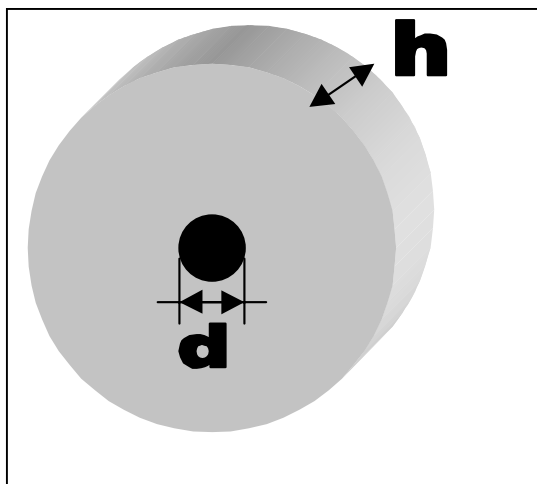
(mit A =Querschnittsfläche der Membranöffnung, ξ =dimensionslose Verhältniskonstante ρ =Dichte des Fluids)

sowie das Gesetz von Hagen-Poiseuille:

$$\text{Gleichung 3-4} \quad \dot{V} = \frac{A^2}{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot L} \cdot \Delta p$$

(mit A =Querschnittsfläche der Membranöffnung, η =dynamische Viskosität des Fluids, L =Länge der Reibungsstrecke bzw. nachfolgend Dicke der Membran h).

Ausschlaggebend für die Formelwahl zur Berechnung des Volumenstroms ist sowohl die Fluggeschwindigkeit als auch das Verhältnis von Öffnungsdurchmesser d zur Dicke h der



Membran (siehe Abbildung 3-8). Ist dieses Verhältnis sehr klein, bestimmt die Reibung den Druckverlust, d.h. den Volumenstrom, der mit dem Gesetz von Hagen-Poiseuille beschrieben werden kann. Ist das Verhältnis dagegen sehr groß, bestimmt die Beschleunigung des Fluids durch die Membranöffnung größtenteils den Druckverlust. In diesem Fall kann der Volumenstrom mit der Torricelli-Gleichung ermittelt werden. Sollte das Verhältnis der Öffnung zur Membrandicke im mittleren Bereich liegen, müssen beide Ansätze zur Bestimmung des Druckverlustes bzw. des Volumenstroms berücksichtigt werden. Betrachtet man beide Gesetzmäßigkeiten, ist zu erkennen, dass in

Abbildung 3-8: Lochblende.

$$\text{Gleichung 3-3} \quad \dot{V} \sim \sqrt{\Delta p}$$

und in

$$\text{Gleichung 3-4} \quad \dot{V} \sim \Delta p \quad \text{ist.}$$

Folglich wird der Druckverlust bei höher werdender Fließgeschwindigkeit, jedoch gleichbleibender Querschnittsfläche, immer stärker durch den Ansatz von Torricelli bestimmt; dies bestätigt die oben formulierte Aussage. Quantitative Angaben zu den Geometrieverhältnissen werden zu einem späteren Zeitpunkt in diesem Kapitel gemacht.

3.2.1 Konzeptphase 1: Volumenstrommessung mittels am Rand fest eingespannter Lochblende

Der einfachste Aufbau besteht in der Positionierung einer am Rand ringsherum fest eingespannten Membran mit Mittelöffnung in einem Fluidkanal. Abbildung 3-9 zeigt eine schematische Darstellung. Eine derartige Sensoranordnung wurde bereits 1998 vorgestellt und mit den Methoden der Siliziumtechnik aufgebaut [Rich98]. Wie in der Darstellung gezeigt, verläuft die Strömungsrichtung von unten nach oben. Dabei dehnt sich die Membran in Richtung der Strömung aus. Die Detektierung einer gegenläufigen Strömung ist, wegen der sich um 180 Grad drehenden Dehnungsrichtung, durch die bereits in Kapitel 3.1.2 beschriebenen gestalterischen Maßnahmen (zusätzliche DMS bzw. Kante im Gehäuse zur Erkennung der Strömungsrichtung) ebenfalls möglich. Somit kann der Sensor auch Rückflüsse erkennen bzw. messen.

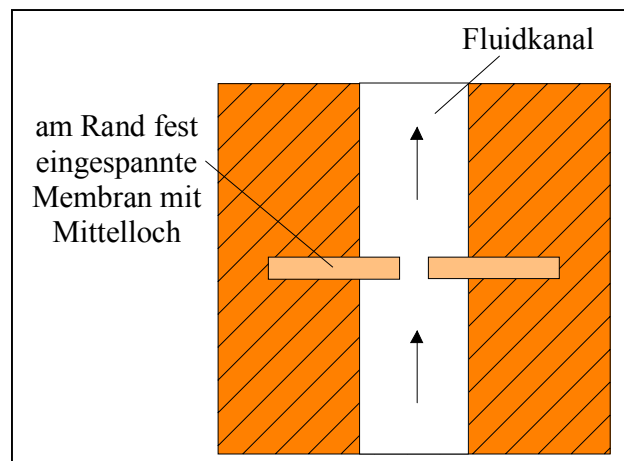


Abbildung 3-9: Volumenstrommessung mittels einer am Rand fest eingespannten Membran mit Mittelloch.

Die maximale Auslenkung w_{\max} am Rand der Öffnung einer Kreismembran mit Loch ist laut [Timo59]:

$$\text{Gleichung 3-5} \quad w_{\max} = k_1 \cdot \frac{p \cdot a^4}{E \cdot h^3}$$

Die maximale Spannung ist:

$$\text{Gleichung 3-6} \quad \sigma_{\max} = k \cdot \frac{p \cdot a^2}{h^2}$$

(mit k bzw. k_1 =Koeffizient in Abhängigkeit des Verhältnisses a/b von Membran- zu Öffnungsdurchmesser, p =anliegender Druck, a =Membrandurchmesser, b =Öffnungsdurchmesser, h =Membrandicke)

In Tabelle 3-1 sind bei einseitig anliegendem Druck k bzw. k_1 -Faktoren für verschiedene Lagerungen der Kreismembranen dargestellt.

| a/b | 1,25 | | 1,5 | | 2 | | 3 | | 5 | |
|----------------------------------------|-------|----------------|-------|----------------|------|----------------|-------|----------------|------|----------------|
| | k | k ₁ | k | k ₁ | k | k ₁ | k | k ₁ | k | k ₁ |
| Am Rand fest eingespannte Kreismembran | 0,11 | 0,002 | 0,26 | 0,014 | 0,48 | 0,058 | 0,657 | 0,13 | 0,73 | 0,175 |
| Am Rand lose GELAGERTE Kreismembran | 0,592 | 0,184 | 0,976 | 0,414 | 1,44 | 0,664 | 1,88 | 0,824 | 2,19 | 0,813 |

Tabelle 3-1: k bzw. k₁-Faktoren für verschiedene Lagerungen von Kreismembranen [Timo59].

Aus einem, für diese Arbeit erforderlichen polymeren Aufbau mit einer am Rand fest eingespannten Membran, würde sich jedoch folgendes Problem ergeben:

Aufgrund unterschiedlicher Materialien von Membran und Gehäuse mit entsprechenden unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten würde die Membran bei verschiedenen Betriebstemperaturen jeweils unterschiedlichen Vorspannungen unterliegen. Wird darüber hinaus der Druckverlust bzw. der Volumenstrom ausschließlich nach dem Hagen-Poiseuille'sche Gesetz bestimmt, ist das Messergebnis einer weiteren Temperaturabhängigkeit unterworfen. Laut Gleichung 3-4 ist der Volumenstrom proportional zur dynamischen Viskosität η , welche ihrerseits stark von der Temperatur abhängig ist. Somit könnte der Sensor nur bei einer permanent konstant gehaltenen Temperatur eingesetzt werden. Geeignete Anwendungen wären die Implantation in den menschlichen Körper, oder der Einsatz unter Laborbedingungen bei konstanter Raumtemperatur.

3.2.2 Konzeptphase 2: Volumenstrommessung mittels am Rand frei gelagerter Lochblende

Entwicklungsziel ist jedoch ein Sensor, dessen Funktion vollkommen temperaturunabhängig ist. Unter dieser Bedingung ist zunächst der Membranaufbau zu betrachten. Wird anstelle einer fest eingespannten eine am Rand lose aufgehängte Membran verwendet, können thermische Dehnungen des Gehäuses nicht auf die Membran übertragen werden. Abbildung 3-10 links zeigt ein Modell mit einer an der Messkammerwand lose gelagerten Membran, die durch eine schlaff aufgehängte Membran mit dem Gehäuse verbunden ist. Die schlaffe bzw. nicht vorgespannte Membran dient in diesem Fall zur Trennung der oberen und unteren Messkammer, so dass das zu messende Medium automatisch durch die Öffnung der Membran geleitet wird. Dabei legt sich die Membran mit Mittelloch an die Kammerwand an. Die ovale Geometrie der Sensorkammern ermöglicht eine definierte lose Lagerung der Membran, auch wenn diese verkippen sollte (siehe Abbildung 3-10 rechts). Eine Membranlagerung nach diesem Prinzip wurde bereits für einen Drucksensor (Membran ohne Mittelloch) im Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt und ist in [Wulf00] ausführlich beschrieben. Durch den symmetrischen Aufbau von oberer und unterer Kammer können zusätzlich Rückflüsse gemessen werden. Die maximale Auslenkung bzw. maximale Spannung einer am Rand lose gelagerten Membran berechnet sich mit Gleichung 3-5 und Gleichung 3-6. Wird für den Sensor ein relativ großer Volumenstrom, der ausschließlich über die Torricelli-Gleichung ermittelt wird, gewählt, ist dieser somit unabhängig von Temperatureinflüssen.

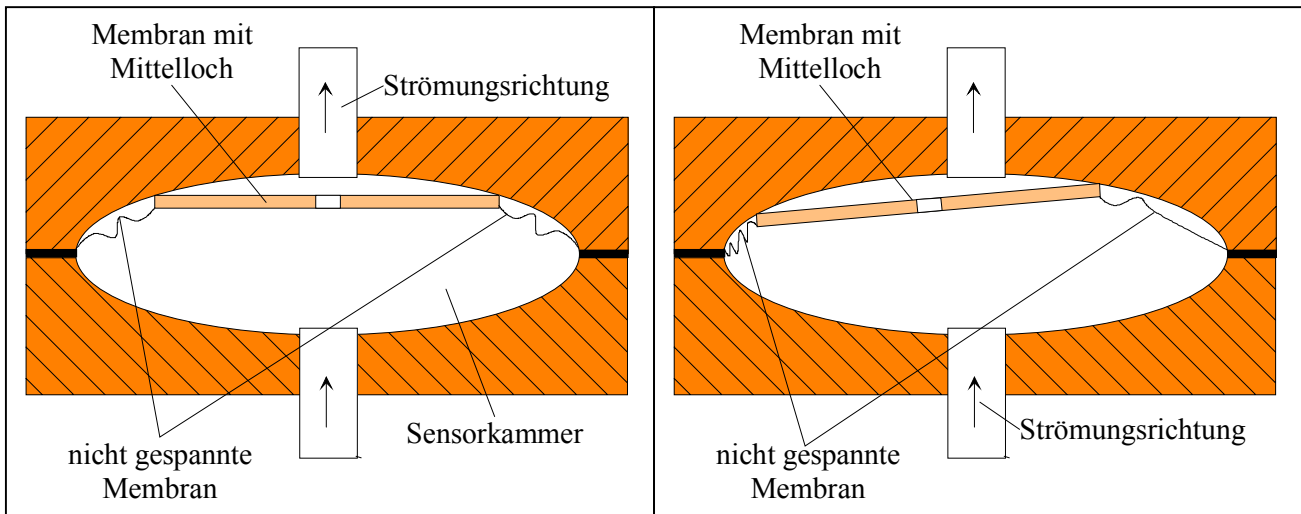


Abbildung 3-10: Volumenstrommessung mittels einer am Rand frei gelagerten Membran mit Mittelloch in zwei möglichen Betriebszuständen. links: Gerade anliegende Membran. rechts: Verkippte Membran.

3.2.3 Konzeptphase 3: Temperaturabhängiger Durchflusssensor für sehr kleine Volumenströme

Mit dem in dieser Arbeit zu entwickelnden Durchflusssensor sollen kleinste Volumenströme gemessen werden. Um dies zu verwirklichen, müsste der Reibungsweg, den das Medium zurücklegt, erhöht werden, da laut Gleichung 3-4

$$\dot{V} \sim \frac{1}{L}$$

ist. Ein Sensor, basierend auf dem Gesetz von Hagen-Poiseuille, mit einer langen mäanderförmigen Messkapillare aus Silizium wird in [Guve85] vorgestellt. Übertragen auf den bisher behandelten Aufbau bedeutet dies, dass der Reibungsweg des Fluides künstlich verlängert werden muss, z.B. mittels einer zusätzlichen Struktur auf der Membran. Abbildung 3-11 zeigt einen möglichen Aufbau. Um hier einen Volumenstrommessbereich von z.B. 0,1–10 µl/min realisieren zu können, ist bei einem Lochdurchmesser von 100 µm, ein Reibungsweg von ca. 90 µm notwendig. Die daraus resultierenden Differenzdrücke ergeben sich zu 0,1 bzw. 10 Pa. (Rechnung siehe Anhang 8.1.1).

Da das Messsignal jedoch aufgrund von dynamischen Viskositätseinflüssen laut Gleichung 3-4 abhängig von Temperaturänderungen im Fluid ist, muss ein temperaturunabhängiger Aufbau verwendet werden, der nachfolgend vorgestellt wird.

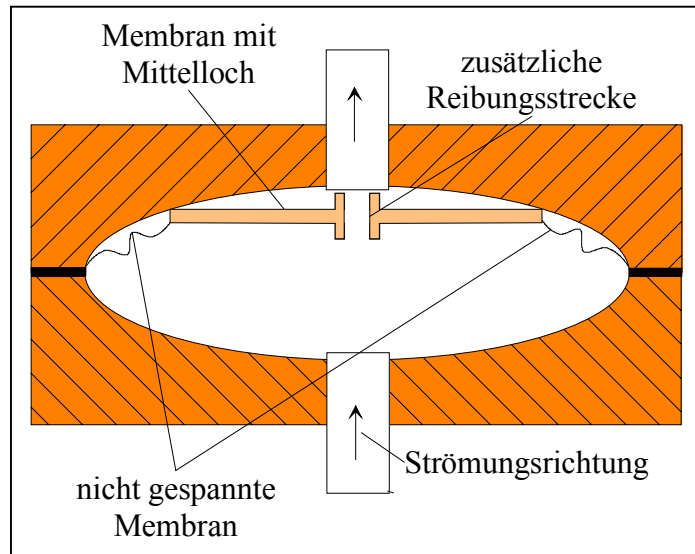


Abbildung 3-11: Volumenstrommessung mittels einer frei gelagerten Membran mit Mittelloch und zusätzlicher Reibungsstrecke.

3.2.4 Konzeptphase 4: Temperaturunabhängiger Durchflusssensor für sehr kleine Volumenströme

Werden anstelle eines einzelnen Messelements (Membran mit Mittelloch) zwei Membranen mit Mittelloch untereinander angeordnet (siehe Abbildung 3-12), die derart dimensioniert sind, dass der Druckverlust zu gleichen Maßen über die Torricelli-Gleichung und das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz bestimmt werden kann, kann eine Temperaturunabhängigkeit der Messanordnung erreicht werden. Folgendes für den polymeren Aufbau entwickeltes Modell soll dies verdeutlichen:

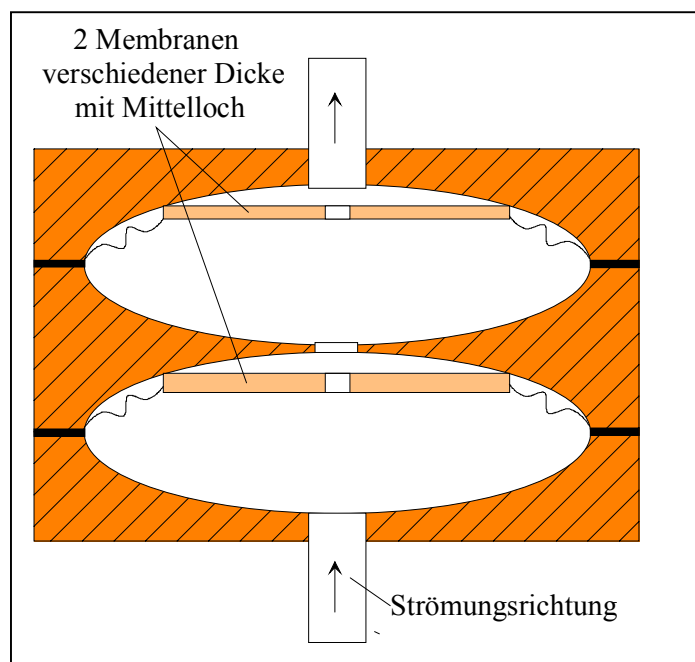


Abbildung 3-12: Volumenstrommessung mittels zweier hintereinander angeordneter, unterschiedlich dicker Membranen mit Mittelloch.

Für den Druckverlust an einer Membran gilt dann die Grundbedingung:

$$\text{Gleichung 3-7} \quad \Delta p = \Delta p_{\text{Tor}} + \Delta p_{\text{Hagen-P.}}$$

Für die Ermittlung des Messbereichs werden beide Membranen einzeln betrachtet.

Membran 1:

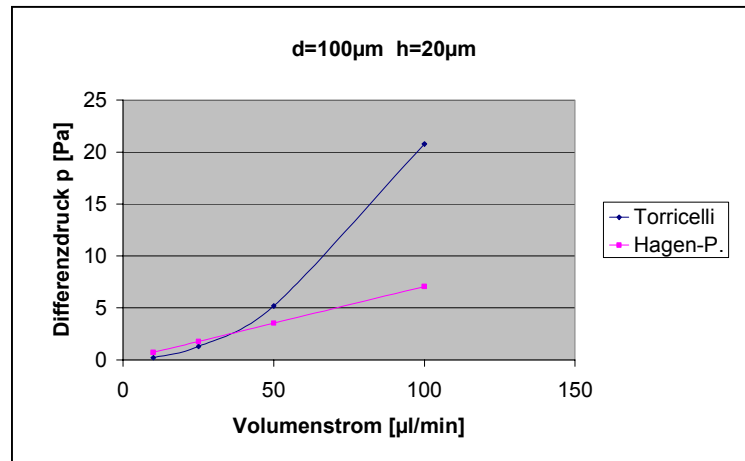


Abbildung 3-13: Differenzdruck nach Torricelli und Hagen- Poiseuille in Abhängigkeit des Volumenstroms von Membran 1.

Membran 1 besitzt einen Öffnungsdurchmesser von $d=2r=100\mu\text{m}$ und eine nominelle Membrandicke von $h=20\mu\text{m}$. Aus Abbildung 3-13 ist ersichtlich, dass bei einem Volumenstrom von ca. $40\mu\text{l/min}$ der Druckverlust aufgrund der Torricelli-Gleichung und des Gesetzes von Hagen-Poiseuille identisch ist. Bei kleineren Volumenströmen wird die Druckdifferenz zunehmend über das Hagen-Poiseuille'sche Gesetz, bei größeren Volumenströmen über die Torricelli-Gleichung bestimmt. Der Druckverlust an Membran 1 beträgt laut Gleichung 3-3, Gleichung 3-4 und Gleichung 3-7:

$$\text{Gleichung 3-8} \quad \Delta p_1 = \frac{\rho}{2} \cdot \xi \cdot \frac{\dot{V}^2}{\pi^2 \cdot r^4} + \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot L_1}{\pi \cdot r^4}$$

Membran 2:

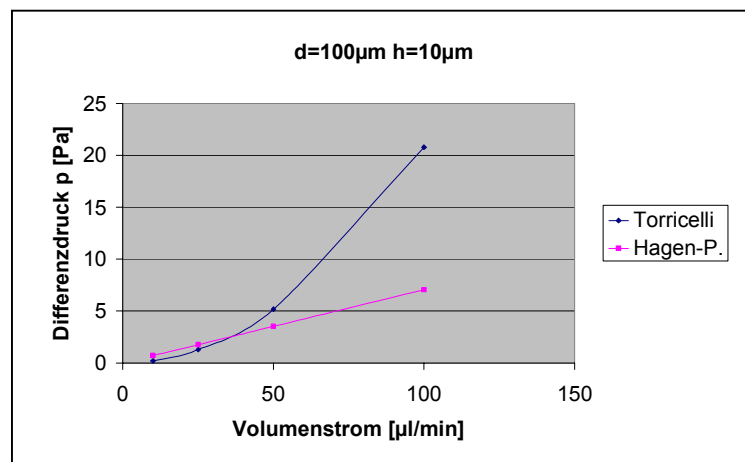


Abbildung 3-14: Differenzdruck nach Torricelli und Hagen- Poiseuille in Abhängigkeit des Volumenstroms von Membran 2.

Aufgrund der geringeren Dicke von Membran 2 (Öffnungsdurchmesser 100µm, Membrandicke 10µm) gegenüber Membran 1 und der dadurch geringeren Reibungsstrecke ist der Schnittpunkt der beiden Kennlinien nun bei einem Volumenstrom von ca. 35µl/min zu finden. Für Membran 2 gilt mit Gleichung 3-3, Gleichung 3-4 und Gleichung 3-7:

$$\text{Gleichung 3-9} \quad \Delta p_2 = \frac{\rho}{2} \cdot \xi \cdot \frac{\dot{V}^2}{\pi^2 \cdot r^4} + \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot L_2}{\pi \cdot r^4}$$

Aufgrund der separaten Betrachtung beider Membranen ist erkennbar, dass ein nahezu identischer Messbereich vorhanden ist. Dies ermöglicht die weitere Vorgehensweise.

Wird nun Gleichung 3-9 von Gleichung 3-8 subtrahiert erhält man:

$$\text{Gleichung 3-10} \quad \Delta p_1 - \Delta p_2 = \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot (L_1 - L_2)}{\pi \cdot r^4}$$

Durch Umformen ergibt sich die dynamische Viskosität:

$$\text{Gleichung 3-11} \quad \eta = \frac{(\Delta p_1 - \Delta p_2) \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \dot{V} \cdot (L_1 - L_2)}$$

Gleichung 3-11 in Gleichung 3-8 eingesetzt ergibt den Volumenstrom:

$$\text{Gleichung 3-12} \quad \dot{V} = \sqrt{\left(\Delta p_1 - \frac{L_1(\Delta p_1 - \Delta p_2)}{(L_1 - L_2)} \right) \cdot \frac{2 \cdot \pi^2 \cdot r^4}{\rho}}$$

der unabhängig von der dynamischen Viskosität η und somit von der Temperatur ist.

Wie bereits beschrieben, kann auch in diesem Fall die Auslenkung der Membran mit Gleichung 3-5 ermittelt werden. Laut [Timo59] beeinflusst ein relativ kleines Loch im Mittelpunkt das Biegeverhalten einer Membran nicht (Lochdurchmesser / Membrandurchmesser $\ll 1$), so dass im Folgenden auf eine Darstellung mittels k_1 -Faktoren verzichtet werden kann.

Die Biegelinie einer lose aufliegenden, kreisförmigen Membran unter gleichförmigen Druck p ist in einer besseren Darstellung laut [Somm95]:

$$\text{Gleichung 3-13} \quad w(r) = \frac{3}{16} \cdot (a^2 - r^2) \cdot \left[\left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) \cdot a^2 - r^2 \right] \cdot \frac{p}{h^3} \cdot \frac{(1 - \nu^2)}{E}$$

(mit $w(r)$ =Durchbiegung in Abhängigkeit des Abstands zur Membranmitte, a =Membranradius, ν =Querkontraktionszahl, h =Membrandicke, E =E-Modul, r =Abstand zur Mitte).

Die maximale Durchbiegung w_{max} tritt im Zentrum der Membran ($r=0$) auf und beträgt:

$$\text{Gleichung 3-14} \quad w_{max} = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu} \right) \cdot \frac{a^4 (1 - \nu^2)}{h^3 E}$$

Maximale Spannungen bzw. Dehnungen treten ebenfalls in der Mitte der Membran auf. Sie betragen:

$$\text{Gleichung 3-15} \quad \sigma_{r, \max} = \sigma_{t, \max} = 3 \cdot \frac{(3 + \nu)}{8} \cdot p \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2$$

bzw.

$$\text{Gleichung 3-16} \quad \varepsilon_{r, \max} = \varepsilon_{t, \max} = 3 \cdot \frac{(3 + \nu)}{8} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2$$

Die Spannungen bzw. Dehnungen am Rand sind jeweils Null.

Wird die Membran allein durch Biegung beansprucht, ist die Beziehung zwischen mechanischer Druckbelastung und Dehnungen der Membran nach der Plattentheorie linear. Bei hohen Drücken entsteht jedoch laut Membrantheorie neben der Biegung ein Aufbläh-Effekt, der eine zunehmende Linearitätsabweichung von Druck zu Dehnung bewirkt [Birk67]. Laut [Somm95] ist der Unterschied zwischen Platten- und Membrantheorie einer kreisförmigen Platte bzw. Membran (*Radius a, Dicke h, Durchbiegung w*) unter gleichförmigen Druck wie folgt definiert:

Plattentheorie:

$h/a \ll 1$; d.h. Scherkräfte können vernachlässigt werden.

$w/h \ll 1$; d.h. nur kleine Verformungen werden zugelassen.

Membrantheorie:

$w/h \gg 1$; d.h. die Platte wird als flexible Membran betrachtet, deren Widerstand gegen die Biegung vernachlässigt wird. Ihre Auslenkung kann mit der Gleichung von Cabrera beschrieben werden [Beam59].

$$\text{Gleichung 3-17} \quad \Delta p = \frac{4 \cdot w_0 \cdot d}{R_M^2} \left[\sigma_0 + \frac{2}{3} \cdot \frac{E}{(1 - \nu)} \cdot \left(\frac{w_0}{R_M}\right)^2 \right]$$

(mit Δp =Druckdifferenz zur Auslenkung der Membran, w_0 =Membranauslenkung im Zentrum, R_M =Membranradius, d =Membrandicke, σ_0 =Innere Spannung der Membran, E =Elastizitätsmodul des Membranmaterials, ν =Querkontraktionszahl).

Ist die maximale Durchbiegung w_{\max} in der Membranmitte kleiner als ca. ein Viertel der Membrandicke h ($w_{\max} \leq s \cdot h$), kann die Membran mit Hilfe der Plattentheorie beschrieben werden. Mit Gleichung 3-13 ergibt sich diese Aussage zu:

$$\text{Gleichung 3-18} \quad w_{\max} = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu}\right) \cdot \frac{a^4 (1 - \nu^2)}{h^3 E} \leq s \cdot h$$

s wird mit 0,2-0,3 angegeben [Elga95],[Wen97]. Die Linearitätsabweichungen zwischen Druck und Dehnung beträgt danach $<0,3\%$ [NN82]. Aus Gleichung 3-18 ergibt sich das Verhältnis zwischen Radius und Dicke der Membran:

Gleichung 3-19

$$\frac{a}{h} = \sqrt[4]{\frac{16}{3} \cdot \frac{(1+\nu)}{(5+\nu)} \cdot \frac{1}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{E}{p}}$$

das als Grundlage für die Sensordimensionierung dient.

3.2.5 Dimensionierung eines Durchflusssensors

Der Lochdurchmesser der Membranen wird aus Gründen möglicher Verstopfungen durch im Fluid befindliche Partikel auf $d_{min}=100\mu\text{m}$ festgelegt. Als Messfluid wird im ersten Anlauf Wasser (H_2O) gewählt. Das Membranmaterial ist Polyimid (PI). In Tabelle 3-2 sind die dazugehörigen Materialkennwerte aufgelistet. Die Membranen aus Polyimid werden mit den üblichen AMANDA-Herstellungsverfahren gefertigt und mittels optischer Lithographie strukturiert. Auf die Herstellung von Membranen wird in Kapitel 4 genauer eingegangen.

| LochØ Membran [μm] | Membran- dicke 1 [μm] | Membran- dicke 2 [μm] | Dichte ρ H_2O [kg/m^3] | Quer-Zahl ν [1] (PI) | E-Modul PI [GPa] |
|------------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------------------------------------|-----------------------------|---------------------|
| 100 | 20 | 10 | 1000 | 0,31 | 3 |

Tabelle 3-2: Verschiedene Kennwerte.

Mit Gleichung 3-8, Gleichung 3-9 und Gleichung 3-19 wird für einen bestimmten Volumstrommessbereich (in dem das Hagen-Poiseuille Gesetz und die Torricelli-Gleichung zu gleichen Maßen gilt) und vorgegebener Membrandicke h der Membranradius a bestimmt (*hier $a_1=2095\mu\text{m}$ und $a_2=1103\mu\text{m}$*). Durch zusätzliche Einbindung von Gleichung 3-16 ergibt sich der Volumenstrom als Funktion der mechanischen Dehnung, welcher graphisch in Abbildung 3-15 dargestellt ist. Die dazugehörigen Rechnungen sind in Anhang 8.1.2 zu finden.

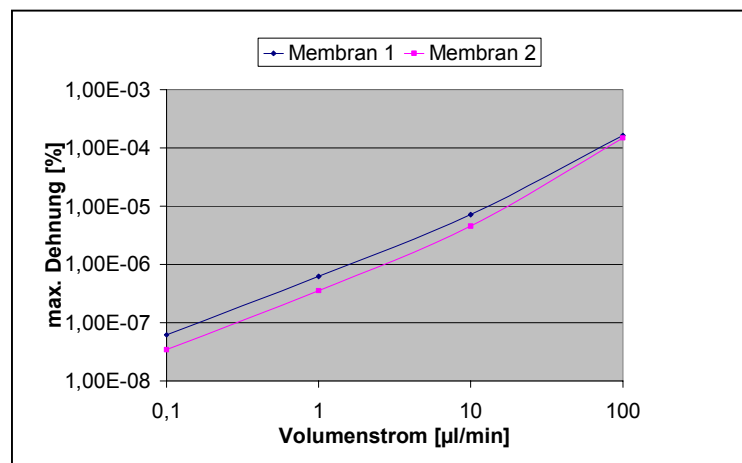


Abbildung 3-15: Volumenstrom als Funktion der Dehnung bei linearer Annahme.

3.2.6 Konzeptbewertung

Das hier vorgestellte theoretisch entwickelte Modell eines polymeren membranbasierenden Durchflusssensors ist zur Messung von Flüssigkeiten und Gasen geeignet. Es besitzt, bei gleichzeitig maximalem Druckverlust von 36Pa, für Flüssigkeiten einen Volumstrommess-

bereich von $0,1\text{--}100\mu\text{l}/\text{min}$. Darüber hinaus ist die mechanische Dehnung der Sensormembranen unabhängig von Temperatureinflüssen. Dies wird durch 1. eine frei gelagerte Membran und 2. die Entstehung eines Druckverlusts aufgrund der Beschleunigung des Fluids an einer Querschnittsverengung (Torricelli-Gleichung) in Verbindung mit Kanalreibung (Hagen-Poiseuille Gesetz) erreicht. Der Aufbau des Sensors kann mit dem AMANDA-Verfahren realisiert werden. Ein Nachteil könnte die Wurzelabhängigkeit des Volumenstroms vom Druckverlust und folglich von der Dehnung (vergleiche Gleichung 3-12 und Gleichung 3-16) sein. Eine entsprechende Wahl der Membran- und Gehäusegeometrie (vergleiche Progressive Feder in der Schwebekörpermessung [Kobo93]) könnte dies jedoch kompensieren. Die Ermittlung der dafür notwendigen Geometrien muss über FEM-Rechnungen erfolgen.

Zur Bestimmung der Membrandurchbiegung bzw. -dehnung sind Präzisionsmessungen, die Verschiebungen $<1\mu\text{m}$ registrieren, notwendig. Für derartige Messaufgaben sind optische Verfahren, die die Eigenschaften des Lichts ausnutzen, kapazitive Verfahren, die druckinduzierte Abstandsänderung einer beweglichen Elektrode gegen eine feste Gegenelektrode ausnutzen oder das Dehnungsmessstreifenprinzip, das eine mechanische Größe (Druck) in ein elektrisches Signal umwandelt, geeignet. Im Folgenden wird ausschließlich auf das Messen mit Dehnungsmessstreifen näher eingegangen.

Die Wandlung der mechanischen Größe „Druck“ in ein elektrisches Signal erfolgt in mehreren Stufen. In der ersten Stufe wird der zu messende Druck in eine Oberflächendehnung umgewandelt. Die Oberflächendehnung ϵ ist definitionsgemäß die Längenänderung, bezogen auf die Länge im ungedehnten Zustand. Die in der Membran auftretende Dehnung wandelt ein Dehnungsmessstreifen in eine Widerstandsänderung um. Eine Wheatstone'sche Brücke wandelt anschließend die Widerstandsänderung des Dehnungsmessstreifens in eine proportionale Spannungsänderung um, die danach mit einem nachgeschalteten Messverstärker weiterverarbeitet wird.

Folien-Dehnungsmessstreifen, die seit mehr als drei Jahrzehnten im Druckaufnehmerbau verwendet werden, finden aufgrund ihrer geometrischen Abmessungen und ihres relativ hohen Druckbereichs (unterhalb 5 bar weniger geeignet [Trän98]) im mikroskopischen Bereich geringe Anwendung. Geeignete Dehnungsmessstreifen für den Bereich der Mikrosystemtechnik werden mittels Dünnschicht-Technologie (Aufdampfen, Sputtern, CVD-Verfahren) hergestellt. In Kapitel 4 wird die Herstellung von Leiterbahnen für die Realisierung von Dehnungsmessstreifen (Leiterbahnen) ausführlich dargestellt.

Die Empfindlichkeit von metallischen Dehnungsmessstreifen hat einen Faktor von 2, d.h. die relative Widerstandsänderung wird höchstens doppelt so groß wie die zugehörige Dehnung. Typisch messbare Dehnungen liegen im Bereich von $10^{-6}\dots 10^{-3}$ [Schr88]. Die daraus resultierende geringe Größe der relativen Widerstandsänderung wird, wie oben bereits kurz angesprochen, in eine dazu proportionale Messspannung umgewandelt. Dies geschieht mit Hilfe einer Wheatstone'schen Brückenschaltung.

Eine in der Druckmessung auf kreisförmigen Membranen weit verbreitete Anordnung von DMS ist die Membranrosette. Eine solche Rosette fasst auf einer möglichst kleinen Fläche vier zu einer Vollbrücke verschaltbare Messgitter zusammen, deren Messrichtungen in idealer Weise den Richtungen der in einer Membran auftretenden Dehnungen angepasst sind. Eine ideale Anordnung der radialen und tangentialen Dehnungsmessstreifen für eine am Rand frei gelagerte Membran ist in [Wulf00] zu finden.

Die Ergebnisse der Brückenausgangsspannung liegen in diesem Fall im Milli- bzw. Mikrovoltbereich. Um dieses Signal auf einen Pegel im Voltbereich anheben zu können, werden Messverstärker eingesetzt, mit denen eine möglichst fehlerfreie Abbildung der Messgröße erreicht werden soll; dabei sollen sich Störgrößen, wie Thermospannungen und Netzeinstreuungen, nicht auswirken. Eine für einen Drucksensor verwendete SMD-Verstärkerschaltung wird in [Mart98] gezeigt. Der Gleichspannungsmessverstärker enthält einen Generator, der eine stabilisierte Gleichspannung zur Speisung der Brückenspannung liefert. Statische wie auch dynamische Frequenzen (bis 10 kHz) können verstärkt werden. Zusätzliche elektrische oder magnetische Felder sind Störeinstreuungen. Werden diese nicht abgeschirmt, gehen sie in vollem Umfang in das Messergebnis ein. Andere Einflüsse, wie Thermospannungen, können durch Umpolen der Speisespannung nicht nur erkannt, sondern gleichzeitig auch korrigiert werden. Grundlegende Probleme der Anschlusskabel (ohmscher Kabelwiderstand, Einfluss der Kabelkapazität) können durch eine entsprechende Anordnung der Elektronik, nahe am Messort oder mittels der üblichen Verschaltungsregel behoben werden. Da diese Verstärker jedoch eine gewisse Auflösungsgrenze besitzen, liegen die typisch messbaren Dehnungen, wie oben bereits erwähnt, im Bereich von 10^{-6} ... 10^{-3} [Schr88]. Wird Abbildung 2-15 mit dieser Erkenntnis betrachtet, ist zu erkennen, dass der in diesem Kapitel vorgestellte theoretische Aufbau eines Durchflusssensors einen Messbereich von ca. 2.5-100 μ l/min besitzt. Die untere Grenze wird von der Auflösung des Messsignals bestimmt. Die obere Grenze wird dagegen durch die Linearitätsbeziehung gemäß Gleichung 3-19 zwischen anliegendem Druck und mechanischer Dehnung der Membran bestimmt. Um den Messbereich weiter absenken zu können, müsste deshalb eine geringe Nichtlinearität der Sensorkennlinie in Kauf genommen werden. Setzt man in Gleichung 3-16 für die maximale Dehnung die obere Grenze von $\varepsilon_{max}=10^{-3}$ ein und geht zugleich von einem maximalen Volumenstrom von 100 μ l/min aus, ergibt sich bei einer Membrandicke von $h_1=20\mu$ m, $h_2=10\mu$ m ein Membranradius von $a_1=5,17$ mm und $a_2=2,87$ mm. Die zugehörige Rechnung ist in Anhang 8.1.3 zu finden. In Abbildung 3-16 ist die nichtlineare Beziehung zwischen mechanischer Dehnung und Volumenstrom graphisch dargestellt.

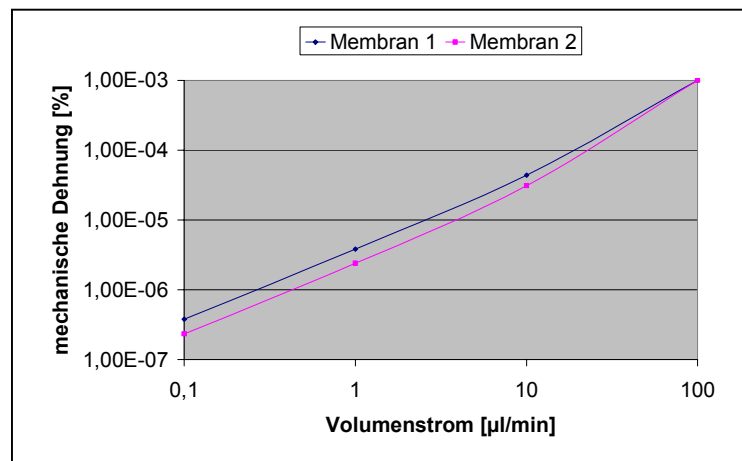


Abbildung 3-16: Volumenstrom als Funktion der Dehnung bei nichtlinearer Annahme.

Werden Abbildung 3-15 und Abbildung 3-16 verglichen, ist zu erkennen, dass sich im nichtlinearen Fall der untere Wert des Messbereichs um ca. eine Zehnerpotenz, auf 0,3 μ l/min, verkleinert hat. Der Sensor besitzt somit einen Messbereich von 0,3-100 μ l/min. Die nichtlinearen Kennlinien können abschließend durch eine geeignete Elektronikschaltung linearisiert werden; dies gilt auch für den Zusammenhang zwischen Volumenstrom und Druckdifferenz.

3.3 Wärme-Anemometrie

Das Messprinzip beruht auf der Detektion von Änderungen im Wärmeübergang eines elektrisch erwärmten Körpers an das ihn umströmende Fluid. Sind Temperatur, Zusammensetzung und Druck des Fluids konstant, ist die einzige Variable, die den Wärmeübergang beeinflusst, die Strömungsgeschwindigkeit [Stri74].

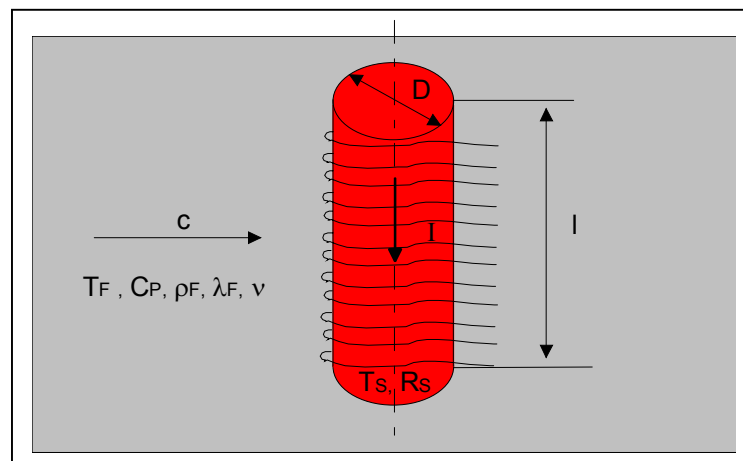


Abbildung 3-17: Wärmeableitung eines stromdurchflossenen zylindrischen Leiters aufgrund vorhandener Umströmung.

Der Wärmeverlust einer stromdurchflossenen Sonde setzt sich aus einem Konvektions- und einem Strahlungsanteil zusammen. Der Strahlungsanteil ist jedoch vernachlässigbar klein und beträgt in der Regel weniger als 0,1%, so dass erzwungene Konvektion vorherrscht. Die ersten systematischen Untersuchungen sind 1914 von L.V. King sowohl theoretisch als auch experimentell durchgeführt worden. Die dabei erhaltene Beziehung für den Wärmeverlust eines senkrecht angeströmten stromdurchflossenen Leiters (siehe Abbildung 3-17), in der Form:

$$\text{Gleichung 3-20} \quad \dot{Q} = (A + B \cdot c^{0,5}) \cdot \Delta T$$

ist unter der Bezeichnung „King`sche Formel“ bekannt und wird im folgenden genauer untersucht.

Bei stationärer und quasistationärer Betrachtung wird die Wärmeabgabe durch die Nusselt-, die Prandtl- und die Reynolds-Zahl beschrieben [Leuc96].

Die Nusselt-Zahl ist definiert als

$$\text{Gleichung 3-21} \quad Nu = \alpha_w \cdot \frac{D}{\lambda_F}$$

Mit

$$\text{Gleichung 3-22} \quad \alpha_w = \frac{q}{(T_s - T_F) \cdot A_M}$$

und

$$\text{Gleichung 3-23} \quad q = \dot{Q} = I^2 \cdot R_s$$

ergibt sich die Wärmemenge, die je Zeiteinheit von der Sonde an das Medium abgegeben wird:

$$\text{Gleichung 3-24} \quad I^2 \cdot R_S = Nu \cdot \pi \cdot \lambda_F \cdot l \cdot (T_S - T_F)$$

(mit α_w =Wärmeübergangszahl, q =Wärmemenge je Zeiteinheit, T_S =Temperatur der Sonde, T_F =Temperatur des Fluids, I =Sondenstrom, R_S =Widerstand der Sonde bei der Temperatur T_S , D =Durchmesser der Sonde, l =Länge der Sonde, λ_F =Wärmeleitfähigkeit des Fluids, A_M =Mantelfläche der Sonde).

Die Prandtl-Zahl ist definiert als:

$$\text{Gleichung 3-25} \quad Pr = \frac{c_p \cdot \eta}{\lambda_F}$$

(mit c_p =spezifische Wärmekapazität bei konstanten Druck, η =dynamische Zähigkeit bzw. Viskosität).

Die Reynolds-Zahl lautet:

$$\text{Gleichung 3-26} \quad Re = \frac{c \cdot D}{\nu}$$

(mit c =Strömungsgeschwindigkeit, ν =kinematische Zähigkeit $\nu=\eta/\rho_F$, ρ_F =Dichte des Fluids)

Eine allgemeine Beziehung der Nusselt-Zahl für den Wärmeverlust einer stromdurchflossenen Sonde, in Abhängigkeit von der Prandtl-Zahl und von der Reynolds-Zahl, basierend auf Messungen in Luft, Wasser und Öl, wird in [Henn85] vorgeschlagen:

$$\text{Gleichung 3-27} \quad Nu = 0,42 \cdot Pr^{0,26} + 0,57 Pr^{0,53} \cdot Re^{0,5}$$

wobei sie im Bereich $2 \leq Nu \leq 20$ und $0,71 \leq Pr \leq 525$ gültig ist und die Stoffwerte bei T_F berechnet werden.

Aus Gleichung 3-24 bis Gleichung 3-27 entsteht mit $R_S \approx \text{const.}$ die zu Beginn dieses Kapitels vorgestellte Kingsche Beziehung:

Gleichung 3-28

$$I^2 \cdot R_S = [0,42 \cdot \pi \cdot l \cdot (c_p \cdot \eta)^{0,26} \cdot \lambda_F^{0,74} + 0,57 \cdot \pi \cdot l \cdot (c_p \cdot \eta)^{0,33} \cdot \left(\frac{D \cdot c}{\nu}\right)^{0,5} \cdot \lambda_F^{0,67}] \cdot (T_S - T_F)$$

Gleichung 3-29

$$I^2 \cdot R_S = (A + B \cdot c^{0,5}) \cdot (T_S - T_F)$$

Der Gesamtwärmeverlust eines stromdurchflossenen zylindrischen Leiters hängt, wie in Gleichung 3-28 hergeleitet, von der Strömungsgeschwindigkeit des Mediums, der Temperaturdifferenz zwischen Leiter und Medium, den physikalischen Eigenschaften des Mediums und den Abmessungen und physikalischen Eigenschaften des Leiters ab.

Eine Hitzdrahtsonde besteht aus einem elektrisch erwärmten Draht, der zwischen zwei Haltespitzen aufgespannt ist. Der Drahtwiderstand R_S dient zur Gewinnung der Messgröße und wird durch die lineare Relation dargestellt:

$$\text{Gleichung 3-30} \quad R_S = R_0 [1 + \alpha(T_S - T_0)]$$

(mit R_0 = Widerstand des Drahtes bei T_0 , α = Temperaturkoeffizient)

Für sehr hohe Arbeitstemperaturen ist der Zusammenhang zwischen Aufnehmerwiderstand und –temperatur nichtlinear; diese Erkenntnis wäre in Gleichung 3-30 durch das Hinzufügen noch mindestens eines quadratischen Terms zu berücksichtigen.

Die Wahl des Sondenlänge/Sondendurchmesser Verhältnisses (l/D) stellt immer einen Kompromiss dar. Wegen guter zeitlicher und räumlicher Auflösung, reduzierter Störung der Strömung durch den Aufnehmer und geringem Wärmeverlust an den Sondenenden ist ein kleiner Durchmesser wünschenswert. Ein großer Durchmesser bietet dagegen den Vorteil der höheren Robustheit.

Ein Hitzdraht in einem Rohrstück bzw. Kanal kann mit den Methoden der Mikrosystemtechnik leicht realisiert werden. In einem nach der Abkühlmethode arbeitenden Messsystem kühlt die Strömung den durch einen elektrischen Strom erwärmten Hitzdraht ab. Mit einem Betriebsmodus, bei dem die Temperaturdifferenz zwischen Medium und Hitzdraht konstant gehalten wird, ist die dazu notwendige Heizleistung aus Gleichung 3-29 mit Gleichung 2-7 dann ein Maß für den Volumenstrom. Darüber hinaus ist der Wärmestrom vom Heizelement in das Fluid nach Gleichung 3-28 (mit $v = \eta/\rho_F$) der Wurzel aus dem Massenstrom je Fläche $(\rho_F \cdot c)^{0,5}$ nahezu proportional. Mit der Konstanten $B_0 = B_1 \cdot \rho_F^{0,5}$ wird aus Gleichung 3-29:

$$\text{Gleichung 3-31} \quad \dot{Q} = (T_S - T_F)[A_0 + B_1 \cdot (\rho_F \cdot c)^{0,5}]$$

Die Konstanten A_0 und B_1 sind von den geometrischen Abmessungen des Sensors abhängig. B_1 hängt außerdem von der Wärmeleitfähigkeit und der spezifischen Wärme des Fluids ab. Im Konstant-Temperatur Betrieb bleibt die Temperaturdifferenz zwischen Medium und Draht konstant, in dem die Heizleistung nachgestellt wird. Die zugeführte Heizleistung ist mit:

$$\text{Gleichung 3-32} \quad I^2 \cdot R_S = \dot{Q}$$

die Messgröße für den Massenstrom je Fläche:

$$\text{Gleichung 3-33} \quad I^2 \cdot R_S = A_2 + B_2 \cdot (\rho_F \cdot c)^{0,5}$$

Durch Multiplikation mit der durchströmenden Fläche A erhält man den Massenstrom:

$$\text{Gleichung 3-34} \quad \dot{m} = \rho_F \cdot c \cdot A$$

Wird der Hitzdraht unter Normbedingungen auf die Fluidichte ρ_{F0} (Dichte bei Bezugstemperatur T_0 und Bezugsdruck p_0) und somit auf den Massenstrom je Fläche $(\rho_{F0} \cdot c_0)$ kalibriert, gibt das Durchflusssystem stets den Massenstrom unter Normbedingungen an. Die Strömungsgeschwindigkeit c_0 ist die auf den Normzustand bezogene Geschwindigkeit c :

$$\text{Gleichung 3-35} \quad c_0 = c \cdot \frac{\rho_F}{\rho_{F0}}$$

Damit wird der Massenstrom zu:

$$\text{Gleichung 3-36} \quad \dot{m} = \rho_{F0} \cdot c_0 \cdot A$$

und der Volumenstrom zu:

$$\text{Gleichung 3-37} \quad \dot{V} = c_0 \cdot A$$

Für ideale Gase ergibt sich mit:

Gleichung 3-38 $\rho_0 \cdot T_0 \cdot p = \rho \cdot T \cdot p_0$
 (mit T, p = Arbeitstemperatur und -druck).

und aus Gleichung 3-35 die temperatur- und druckkorrigierte Strömungsgeschwindigkeit:

Gleichung 3-39
$$c_0 = \frac{c \cdot T_0 \cdot p}{T \cdot p_0}$$

Die automatische Temperatur- und Druckkorrektur gehört zu den Vorzügen thermischer Durchflussmesser. Für Gasmessungen sind solche Angaben bedeutsam. Werden als Bezugs-
 werte $T_0=273\text{K}$ und $p_0=1,013\text{bar}$ festgelegt, ergibt sich in diesem Fall nach Gleichung 3-39:

Gleichung 3-40
$$c_0 = c \cdot \frac{[273(1,013 + \Delta p)]}{[(273 + \vartheta) \cdot 1,013]}$$

(mit $1,013 + \Delta p$ = Arbeitsdruck in bar, ϑ = Arbeitstemperatur in °C).

Aufgrund von Gleichung 3-30 sollte ein Drahtmaterial mit einem hohen Temperaturkoeffizienten α eingesetzt werden. Jedoch würde ein Draht in einem mikrotechnisch gefertigten Kanal einen viel zu geringen ohmschen Widerstand aufweisen, um ein akzeptables Messsignal zu erhalten.

Hitzfilmsonden sind in ihren Eigenschaften den Hitzdrähten sehr ähnlich. Die Hitzfilmsonde besitzt jedoch anstelle des Hitzdrahtes einen auf einem Trägersubstrat aufgebrachtten dünnen mäanderförmigen Metallfilm mit erheblich höherem ohmschen Widerstand. Im Gegensatz zu Hitzdrähten weisen Hitzfilme aufgrund hoher spezifischer Wärmekapazitäten der dicken Trägersubstrate jedoch eine schlechtere zeitliche Auflösung auf.

Die Vorteile der beiden Messprinzipien sind, zusammenfassend dargestellt, die gute zeitliche und räumliche Auflösung der Hitzdrähte sowie die größeren ohmschen Widerstandswerte der Hitzfilme. Um diese Vorteile zu vereinen, wurden Messaufnehmer mit hohen ohmschen Widerständen und dünnen Trägerkörpern aus Polymeren mikrotechnisch hergestellt. Der Trägerkörper besteht aus einer $10\mu\text{m}$ dicken und $500\mu\text{m}$ breiten Polyimidmembran, auf der eine Leiterbahn aus 100nm dickem Gold mäanderförmig appliziert ist. Leiterbahnen mit ohmschen Widerstandswerten zwischen $1\text{-}10\text{k}\Omega$ wurden damit gefertigt. Auf die Herstellung der Messaufnehmer wird in Kapitel 4.3 genauer eingegangen. Diese Messaufnehmer wurden in gefräste Fluidkanäle aus PMMA mit einer Breite von 1mm positioniert. Abbildung 3-18 zeigt ein erstes handgefertigtes Funktionsmuster. Für erste Versuche wurden die Leiterbahnen mit einem konstanten elektrischen Strom beaufschlagt. Mit einer Wheatstone'schen Brückenschaltung wurde die Widerstandsänderung aufgrund des einsetzenden Volumenstroms gemessen. Versuche sowohl mit Gasen als auch mit Flüssigkeiten wurden unternommen. Wie erwartet, zeigten die ersten Ergebnisse, dass in Abhängigkeit von der Stromstärke, größere bzw. kleinere, sehr gut messbare ohmsche Widerstandsänderungen das Ausgangssignal und zusätzlich die Empfindlichkeit des Sensors veränderten. Probleme ergaben sich jedoch bezüglich des zeitlichen Ansprechverhaltens. Dies lag an der immer noch zu hohen spezifischen Wärmekapazität der Polyimidmembran im Sekundenbereich. Mittels dünnerer Membranen müsste es möglich sein, dass zeitliche Verhalten der Aufnehmer deutlich zu verbessern. Zusätzlich wurden statische Messkurven für Flüssigkeiten und Gase mit guter Auflösung über einen sehr großen Dynamikbereich aufgenommen. In Abbildung 3-19 ist eine aufgenommene statische Kennlinie im Gasbetrieb dargestellt; sie zeigt das verstärkte Brückenausgangssignal als Funktion des Volumenstroms.

Da es sich um einen relativ großen Aufbau (Kanalquerschnitt $1 \times 1 \text{ mm}^2$) handelte, wurden diese Messergebnisse für Kanäle im Mikrometerbereich skaliert. Daraus ließ sich ableiten, dass ein, den Anforderungen entsprechender Volumenstrom-Messbereichs von $0,1\text{-}50 \mu\text{l}/\text{min}$ mit diesem Messprinzip realisiert werden könnte. Jedoch konnten eventuelle thermischen Störeffekte in den kleinen Kanälen und den Messaufnehmern zu diesem Zeitpunkt noch nicht richtig abgeschätzt werden.

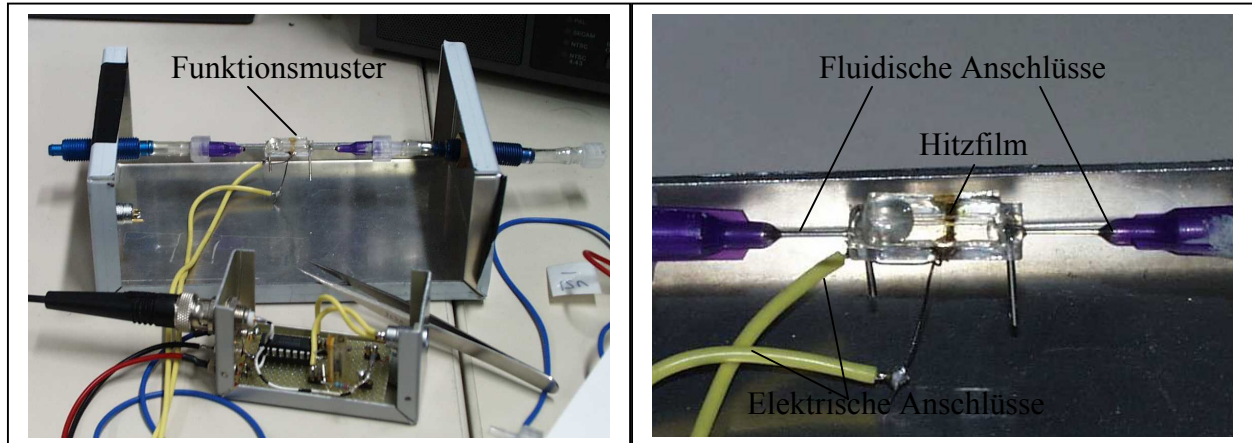


Abbildung 3-18: Erstes handgefertigtes Funktionsmuster nach dem anemometrischen Prinzip. links: Gesamter Aufbau mit Brückenschaltung. rechts: Gehäuse mit fluidischem Kanal und integriertem Funktionselement).

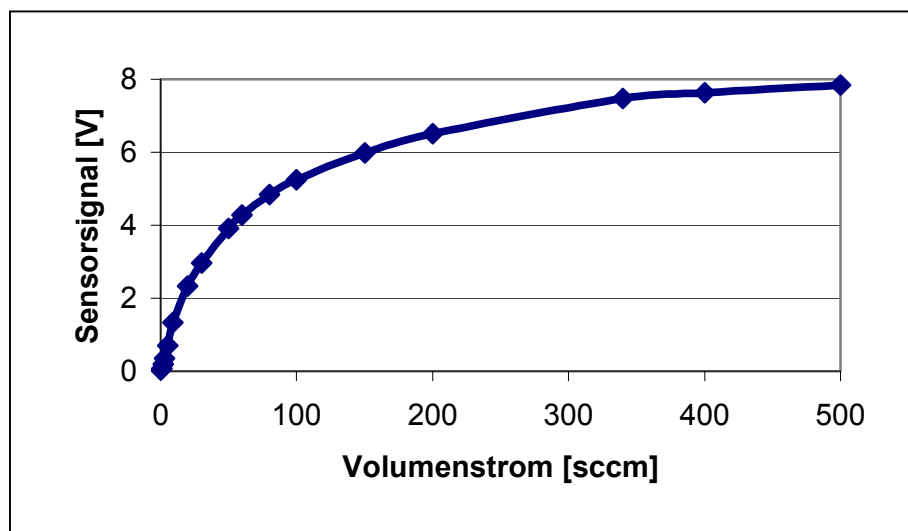


Abbildung 3-19: Ausgangssignal des Funktionsmusters (Brückenausgangssignal) als Funktion des Volumenstroms im Gasbetrieb.

Messungen über einen großen Dynamikbereich sowie eine bequeme Datenerfassung in Form einer elektrischen Spannung sind die großen Vorteile dieses Messprinzips. Ein gutes zeitliches Verhalten käme möglicherweise hinzu. Ein Hitzfilmanemometer erfüllt in verschiedener Hinsicht die Anforderungen an ein ideales Messinstrument. Die Hitzfilme sind aufgrund möglicher geringer Sondenabmessungen prädestiniert für den Einsatz in der Mikrosystemtechnik. Die Einfachheit des Messprinzips und die daraus resultierenden möglichen geringen Kosten machen Hitzfilme zu geeigneten Messfühler für industrielle Anwendungen. Diese werden bisher für Messungen in geschlossenen Rohrsystemen, z.B. in Klimaanlage oder für Messungen in Reinräumen verwendet. Geschwindigkeitsmessungen in Luftströmungen werden

auch in Einspritzmotoren und in der Medizintechnik, z.B. bei der Messung von Atemluft durchgeführt. Die nicht eingriffsfreie Meßmethode ist ein Nachteil, da das Messelement in das Fluid eintaucht. Die Verschmutzungsanfälligkeit stellt jedoch den größten Nachteil für derartige Anwendungen dar. Sie beeinflusst den Wärmeübergang am Film und dadurch auch die Kalibrierkurve der Sonde. Die Reinigung der Filme ist aufgrund der kleinen Abmessungen und wegen der Gefahr der mechanischen Zerstörung nicht möglich. Dieses Problem könnte möglicherweise durch ein einfaches Designkonzept, einen Aufbau mit wenigen Arbeitsschritten und einer kostengünstigen Herstellung des Sensors mit dem AMANDA-Verfahren gelöst werden. Verschmutzte Messaufnehmer bzw. Sensoren könnten dann einfach ausgetauscht, d.h. als Einwegartikel verwendet werden.

Wie bereits erwähnt, besitzen Hitzfilme einen großen Dynamikbereich und sind daher auch zur Messung kleinster Strömungsgeschwindigkeiten bzw. Volumenströme von Gasen und Flüssigkeiten geeignet. Daher könnte ein derartiger Messaufnehmer z.B. für medizinische Dosiersysteme, die im $\mu\text{l}/\text{min}$ -Bereich arbeiten, verwendet werden. Das Messergebnis ist von den physikalischen Eigenschaften des Fluids, die sich mit der Temperatur ändern, abhängig. Daher ist es notwendig, Temperaturmessungen in der Strömung vorzunehmen und diese mit dem Messergebnis zu verrechnen. Ziel ist deshalb der Aufbau eines Funktionselements, mit dem die Temperatur- und die Strömungsmessung gleichzeitig stattfinden können. Dabei sollten auch Temperatureinflüsse aufgrund unterschiedlicher Ausdehnungskoeffizienten keinen Einfluss auf die einzelnen Komponenten des Sensors haben.

Aufgrund der bisher, in dieser Arbeit, gewonnenen Erkenntnisse wurde eine Entscheidung zugunsten eines Durchflusssensors, basierend auf dem physikalischen Prinzip der Wärme-Anemometrie, getroffen. Jedoch konnten hierfür nicht die üblichen Materialien und Designvorlagen verwendet werden, sondern es musste ein neuartiger, für Polymere geeigneter Aufbau entwickelt werden. Im folgenden Kapitel 4 wird der Sensoraufbau, d.h. die Materialwahl, das Design und die Herstellung des Sensors mit dem AMANDA-Verfahren ausführlich vorgestellt.

4 Werkstoffauswahl, Sensordesign und Herstellung mit dem AMANDA-Verfahren

Wie bereits im vorhergehenden Kapitel dargelegt, wird die Entwicklung eines Durchflusssensors, basierend auf dem thermisch anemometrischen Prinzip angestrebt. Zunächst wird auf die Materialwahl des Messwertaufnehmers eingegangen, bevor das Sensordesign und dessen Funktionsweise beschrieben wird. Die Herstellung des Sensors mit dem AMANDA-Verfahren wird in Unterkapitel 4.3 beschrieben. Auch hier sind, wie im vorherigen Kapitel, die dargestellten Figuren meist nicht maßstäblich gezeichnet, damit sehr dünne bzw. kleine Strukturen neben vergleichsweise großen Strukturen deutlich zu erkennen sind.

4.1 Werkstoffauswahl

An die Werkstoffe des Messwertaufnehmers müssen einige wichtige Forderungen hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften gestellt werden. Als erstes muss die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes linear und möglichst stark ausgeprägt sein. Die lineare Relation der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstandes ist für den verwendeten Temperaturbereich wieder durch

$$\text{Gleichung 4-1} \quad R_S = R_0[1 + \alpha(T_S - T_0)]$$

gegeben und gilt für alle weiteren Betrachtungen. In einer im Anhang 8.2 zu findenden Messreihe ist der lineare Zusammenhang des elektrischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Temperatur von aufgedampftem Platin dargestellt. Um zu veranschaulichen, welche Bedeutung ein hoher Temperaturkoeffizient α hat, wird von einer Beaufschlagung des Messwertaufnehmers mit einem konstanten Strom ausgegangen. Hier entspricht einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit c eine Temperaturdifferenz ΔT und damit einem Widerstand R_S . Ändert sich die Geschwindigkeit auf einen Wert $c+c^*$, hat dies eine Temperaturänderung auf T_S-T^* und somit auch eine Widerstandsänderung auf R_S-r^* zur Folge. Aus Gleichung 4-1 ergibt sich der Zusammenhang:

$$\text{Gleichung 4-2} \quad r^* = \alpha \cdot R_0 \cdot T^*$$

Der Temperaturkoeffizient α ist somit direkt proportional zur temperaturbedingten Widerstandsänderung r^* ; dies begründet die Forderung nach einem möglichst stark ausgeprägten Temperaturkoeffizienten. In Tabelle 4-1 sind Temperaturkoeffizienten verschiedener elektrisch leitender Materialien aufgelistet.

Eine zweite, vom Messwertaufnehmer zu erfüllende Forderung ist eine möglichst kleine elektrische Leitfähigkeit χ bzw. ein großer spezifischer elektrischer Widerstand ρ ($\rho=1/\chi$). Der Einfachheit halber wird für diese Betrachtung ein einfacher Draht mit dem Durchmesser d und der Länge l herangezogen. Daher folgt aus Gleichung 4-2 und dem spezifischen elektrischen Widerstand ρ :

Gleichung 4-3

$$r^* = \alpha \cdot \frac{4 \cdot l}{\chi \cdot \pi \cdot d^2} \cdot T^*$$

Unter sonst gleichen Bedingungen wird damit die Widerstandsänderung r^* , d.h. das Ausgangssignal, bei gegebener Temperaturänderung T^* um so größer, je kleiner die elektrische Leitfähigkeit χ ist. In Tabelle 4-1 sind die elektrischen Leitfähigkeiten bzw. die spezifisch-elektrischen Widerstandswerte von verschiedenen Materialien aufgelistet.

Dem steht aber eine, für große Widerstandswerte benötigte hohe elektrische Leistung, die zur Erwärmung der Leiterbahn auf eine bestimmte Temperatur notwendig ist, entgegen. Ziel ist deshalb eine geringe Leistungsaufnahme, wie sie z. B. für den Sensorbetrieb mit einer Batterie benötigt wird. Für erste Versuche wurden, wie in Kapitel 3.3 beschrieben, Leiterbahnen mit elektrischen Widerständen zwischen 1-10k Ω realisiert. Um jedoch den beiden oben beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, wurden nun Leiterbahnen mit Ohmschen Widerständen zwischen 500 – 1000 Ohm verwendet.

Ein weiterer Grund für einen möglichst hohen spezifischen Widerstand ist der Platzbedarf auf dem Sensor-Trägerkörper. Aufgrund der Beziehung:

Gleichung 4-4

$$R[\Omega] = \frac{\rho \cdot l}{A} = \frac{\rho \cdot l}{h \cdot b}$$

kann bei doppeltem spezifischen Widerstand ρ die effektive Leiterbahnlänge l (bei gleichbleibenden Sensorwiderstand R) auf die Hälfte reduziert werden. Dies führt zu einer Verkleinerung des Sensors. Die Fläche A , d.h. die Höhe h und die Breite b der Leiterbahnen werden zusätzlich in die Dimensionierung des Widerstandwertes eingebunden. Sie unterliegen jedoch einer unteren Grenze; einer minimal möglichen Höhe aufgrund sonst auftretender elektrischer Durchbrüche und einer fertigungstechnisch minimal möglichen Leiterbahnbreite.

Eine weitere vom Messwertaufnehmer zu erfüllende Forderung ist die Korrosionsbeständigkeit des Werkstoffes. An der Luft kann die Oberfläche des Aufnehmers verändert werden. Dies führt zu einer Änderung des elektrischen Widerstandes sowie der mechanischen Eigenschaften und des Wärmeleitvermögens. Auch kann das Arbeitsmedium chemisch aggressive Bestandteile enthalten, die ebenfalls den Werkstoff angreifen. Diese Gefahren können durch die Verwendung edler Metalle bzw. durch eine geeignete Schutzschicht auf der Oberfläche eliminiert werden. Eine Schutzschicht hat gleichzeitig den Vorteil, dass der Aufnehmer beim Einsatz in elektrolytischen Flüssigkeiten gegenüber dem Medium elektrisch isoliert ist. Allerdings führt das Auftragen einer Schutzschicht zu einer gewissen Verzögerung im Ansprechverhalten, da die Wärmeträgheit des Aufnehmers erhöht wird. Dieser Effekt wird um so geringer, je dünner die aufgetragene Schutzschicht ist.

Eine zusätzliche vom Messwertaufnehmer zu erfüllende Forderung ist die gegenseitige Angleichung der thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Träger-, Leiter- und Gehäusewerkstoff. Dies ist aufgrund möglicher Temperaturänderungen während des Sensorbetriebs und daraus folgender Messwertverfälschungen notwendig. Da sich diese Angleichung sehr schwierig gestaltet, mussten Lösungen gefunden werden, die in Kapitel 4.2 erläutert werden.

Unter Berücksichtigung der gestellten Anforderungen wurde die Entscheidung getroffen, in einer ersten Anwendung Polyimid als Trägerkörpermaterial zu verwenden. Als Leiterbahnmaterial wurde neben Titan, das einen sehr hohen spezifischen Widerstand und eine gute Bio-

kompatibilität aufweist, und Gold, das eine hohe Wärmeleitfähigkeit hat sowie als Standardmaterial bei der Leiterbahnherstellung für die AMANDA-Mikropumpe verwendet wird, Platin als Material neu für den AMANDA-Prozess eingeführt. Platin weist einen ca. 5 mal höheren spezifischen Widerstand als Gold auf und zeichnet sich als edles Material beständig gegen viele äußere Einflüsse aus. Als isolierende Schutzschicht wurde wiederum Polyimid, als Gehäusematerial herstellungsbedingt PSU (Polysulfon) verwendet, das sich durch eine gute Temperaturbeständigkeit und die Verwendbarkeit in medizintechnischen Geräten auszeichnet. Aufgrund des flexiblen AMANDA-Verfahrens könnten in einem weiteren möglichen Entwicklungsprozess wegen ihrer chemischen Inertheit Materialien, wie Glas bzw. Glaskeramiken oder PTFE (Teflon) als Trägerkörper verwendet werden.

| Material | Spez. elektr. Widerstand ρ bei 20°C [μΩcm] | Temperatur-Koeffizient α bei 0-100°C [1/K] | Spez. Wärmeausdehnung 0-100°C 10^{-6} [1/K] | Elektr. Leitfähigkeit χ bei 20°C [1/μΩcm] | Wärmeleitfähigkeit 0-100 °C [W/m K] |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Gold | 2,2 | 0,0040 | 14,1 | 0,45 | 318 |
| Platin | 10,58 | 0,00392 | 9 | 0,095 | 71,6 |
| Titan | 54 | 0,0038 | 8,9 | 0,0185 | 21,9 |
| Polyimid | - | - | 30-60 | - | 0,1-0,35 |
| PTFE | - | - | 100-160 | - | 0,25 |
| PSU | - | - | 50-60 | - | 0,26-028 |
| PMMA | - | - | 70-77 | - | 0,17-0,19 |
| Quarzglas | - | - | 0,5 | - | 1,4-1,9 |
| Glaskeramik | - | - | 13 | - | 1,5 |

Tabelle 4-1: Materialkennwerte.

4.2 Sensordesign

AMANDA-Standardkomponenten wie Pumpe, Ventil oder Drucksensor [Büst96] [Goll97],[Mart98] enthielten bisher Funktionselemente in Form von Membranen, die über ihren gesamten Umfang am Rand fest mit dem Gehäuse verbunden sind. Problematisch ist bei dieser Membranbefestigung, dass es bei auftretenden Temperaturänderungen zu einer Messwertverfälschung kommen kann. Diese entsteht aufgrund der unterschiedlichen Materialien bzw. thermischen Ausdehnungskoeffizienten von Gehäuse und Membran. Wie aus Tabelle 4-1 ersichtlich, besitzt das Gehäusematerial PSU eine größere thermische Ausdehnung als das Membranmaterial Polyimid. Bei einer über den gesamten Umfang mit dem Gehäuse verbundenen Membran zieht das Gehäuse aufgrund von Temperaturänderungen an der Membran. Dadurch stellen sich sowohl eine erhöhte Vorspannung der Membran, als auch eine Verlängerung der darauf befindlichen Leiterbahnen ein. Dieser Dehnungsmessstreifeneffekt würde aufgrund der Verlängerung der Leiterbahnen zu einem verfälschten elektrischen Widerstandsmesssignal, d.h. Ausgangssignal führen. Daher wurde ein neuartiger Messwertaufnehmer entwickelt, der nur einseitig mit dem Gehäuse verbunden ist. In Abbildung 4-1 ist der schematische Aufbau des entwickelten Messwertaufnehmers zu sehen. Hierbei wurde die mäanderförmige Leiterbahn auf einen Trägerkörper aus 1,2 µm dickem Polyimid appliziert und zusätzlich mit einer Schutzschicht abgedeckt, die ebenfalls aus 1,2 µm dickem Polyimid besteht und eine, der Trägermembran identische Geometrie aufweist.

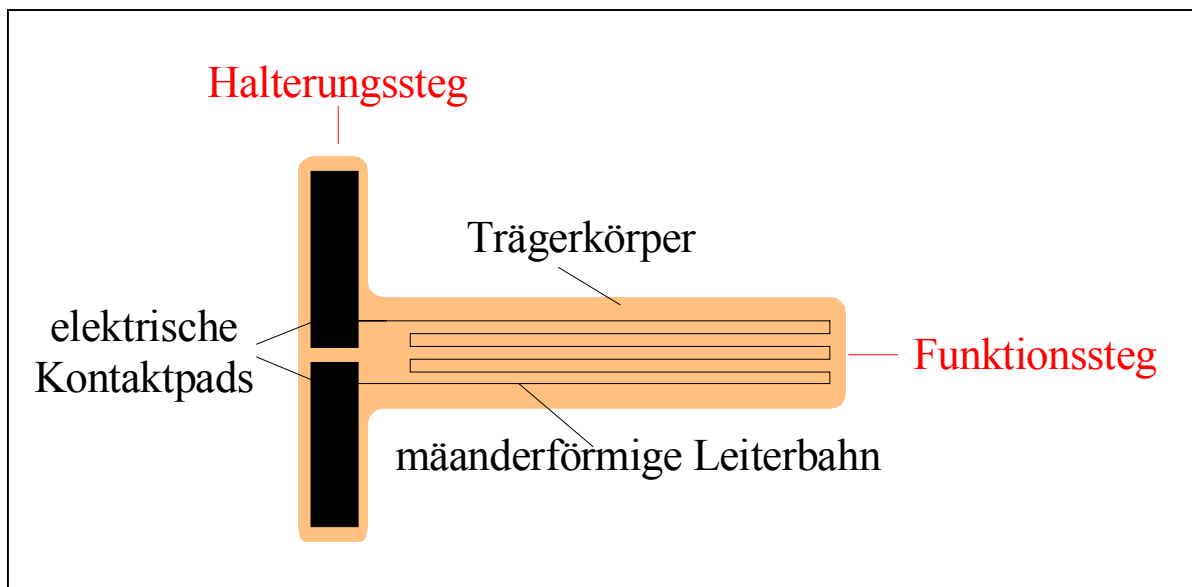


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des entwickelten Messwertaufnehmers mit einseitiger Befestigung.

Der komplette Messwertaufnehmer wird an einem Gehäuse aus PSU über einen fluidischen Kanal mittels Kammerklebetechnik einseitig befestigt. Der Kanal wird danach mit einem Deckel aus PSU, ebenfalls mittels Kammerklebetechnik abgedeckt. In Abbildung 4-2 ist eine schematische Darstellung des im Fluidkanal einseitig befestigten Messwertaufnehmers in Seiten- bzw. Draufsicht zu sehen.

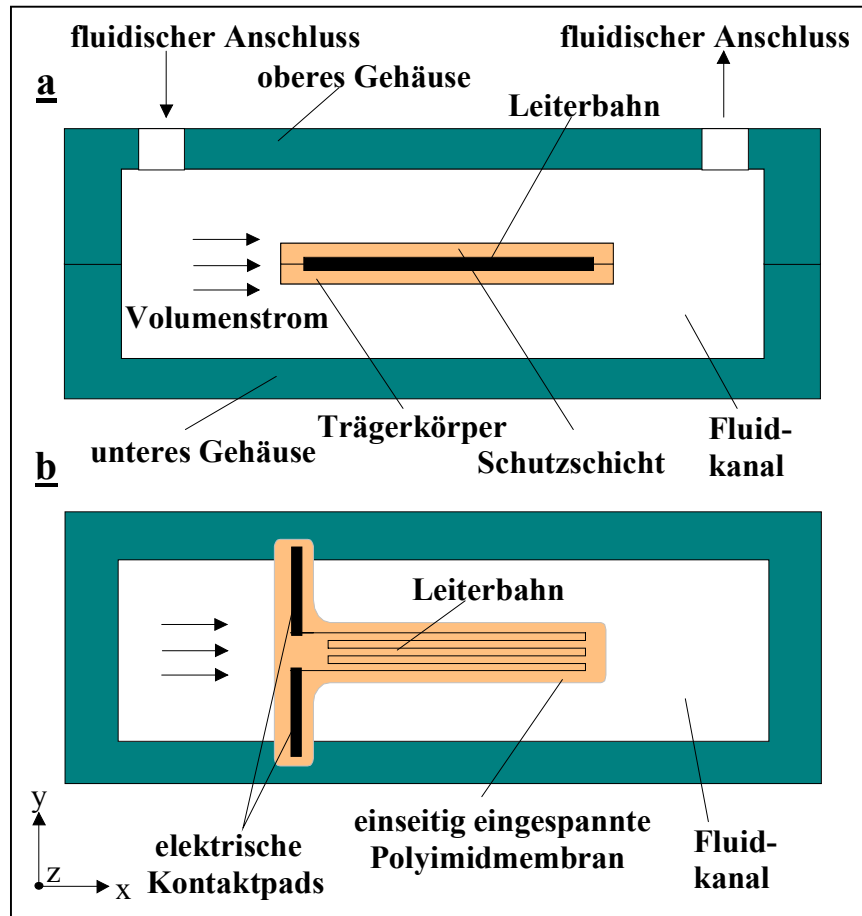


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung des Messwertaufnehmers im Fluidkanal
 a) Seitenansicht b) Draufsicht.

Wie aus Abbildung 4-1 zu erkennen ist, besteht der Messwertaufnehmer aus einem Halterungssteg (vertikal) und einem Funktionssteg (horizontal). Da das Trägermaterial aus $1,2 \mu\text{m}$ dicken Polyimid besteht, kann sich diese Fahnenstruktur in der z -Ebene frei bewegen. Die elektrisch kontaktierten Leiterbahnen besitzen über dem gesamten Querschnitt des Aufnehmers eine identische Dicke, die je nach Typ zwischen $60\text{-}200 \text{ nm}$ liegt. Dabei befindet sich der mäanderförmige, effektive Messleiter auf dem Funktionssteg und die Zuleitungen auf dem Halterungssteg. Letztere besitzen gegenüber dem Messleiter einen erheblich größeren Querschnitt, damit ausschließlich die effektiven Widerstandsänderungen des Messleiters in das Messergebnis eingehen. Aufgrund des frei in der z -Ebene beweglichen Funktionssteges werden eventuelle temperaturbedingte Dehnungen, hervorgerufen durch die unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Trägerkörper und Gehäuse, vom Halterungssteg aufgenommen. Aus diesem Grund wird der Funktionssteg mit der darauf befindlichen effektiven Leiterbahn nicht beeinflusst. Das Messsignal erfährt somit keinen zusätzlichen Dehnungsmessstreifen effekt. Um darüber hinaus zu vermeiden, dass immer wiederkehrende Dehnungen bzw. Stauchungen des Funktionssteges, hervorgerufen durch eine flatternde bzw. oszillierende Bewegung der Fahnenstruktur, den Messwert beeinflussen, ist ein symmetrischer Schichtaufbau des Messwertaufnehmers gewählt worden. Besitzen der Trägerkörper und die Schutzschicht eine identische Dicke, liegen die Leiterbahnen in der neutralen Faser der Biegelinie (siehe Abbildung 4-3). und zeigen keinen Dehnungsmessstreifen effekt. Durch diese konstruktiven Maßnahmen wurde ein temperaturkompensierter Sensoraufbau geschaffen.

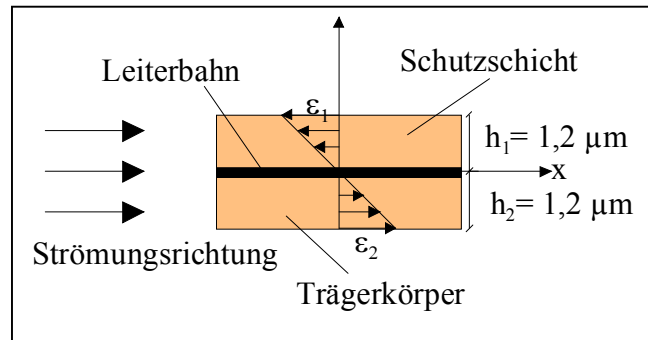


Abbildung 4-3: Seitenansicht des Messgrößenaufnehmers mit den Dehnungen $\epsilon_{1/2}$ der beiden Membranschichten und der in der neutralen Faser der Biegelinie liegenden Leiterbahnen.

Ein weiteres Problem der relativ dünnen und frei beweglichen Aufhängung des Aufnehmers könnte eine, gegenüber einem dicken Trägerkörper, geringere Reißfestigkeit sein. Da mit diesem Sensor jedoch nur kleine Strömungsgeschwindigkeiten (vergleiche Kapitel 5.2) gemessen werden sollen, sind die auf das Funktionselement ausgeübten Kräfte relativ gering. Für größere Geschwindigkeiten können dickere Trägerkörper gewählt werden. Für ein gutes Zeitverhalten des Sensors sind jedoch, aufgrund guter Wärmeübergänge vom Medium zur Leiterbahn, geringe Schichtdicken von Vorteil.

Die Länge des Funktionssteges spielt eine weitere wichtige Rolle. Bei zu langen Stegen kann es während des Betriebs aufgrund des Eigengewichts und somit aufgrund der geringen Steifigkeit der langen, dünnen Membranen zu Berührungen bzw. zu adhäsiven Kontakten mit dem Gehäuse und somit zu Verschlechterungen im Wärmeübergang kommen. Im Gegensatz dazu besitzen kurze Fahnen die nötige Steifigkeit bzw. die Länge, um den Kanalboden nicht zu berühren. Ein weiterer Vorteil einer kurzen Fahne sind die daraus resultierenden kurzen Leiterbahnen. Die Fahne wird dadurch nahezu punktförmig, d.h. ohne einen ausgeprägten Temperaturgradienten über die Leiterbahnlänge erwärmt. Aufgrund dieses Verhaltens wird für die Realisierung kurzer Leiterbahnen nur ein kurzer, hinreichend steifer Funktionssteg benötigt.

Bei der Konzeptrealisierung ist auch der Einfluss der Fluidtemperatur zu berücksichtigen. Wie in Gleichung 3-28 gezeigt, ist die Messspannung eine Funktion der Wärmeabgabe des Funktionselementes an das ihn umströmende Fluid. Bei konstant bleibender Zusammensetzung des Fluids ist die übertragene Wärmemenge nur eine Funktion der Strömungsgeschwindigkeit und der Fluidtemperatur. Es lässt sich jedoch anhand der gemessenen Spannung nicht unterscheiden, ob eine Spannungsänderung durch Geschwindigkeits- oder Temperaturschwankungen hervorgerufen wird. Da sich die Temperatur bei vielen Anwendungen während der Messung ändern kann, können erhebliche Fehler in der Strömungsgeschwindigkeitsmessung die Folge sein. Aus diesem Grund ist eine Temperaturänderung zu berücksichtigen. Eine Möglichkeit, dies zu berücksichtigen, besteht darin, die Temperatur des Messwertaufnehmers sehr viel höher als die des Mediums zu wählen; dadurch ergeben kleinere Temperaturschwankungen im Medium vernachlässigbar kleine Messfehler. Da hohe Übertemperaturen für bestimmte medizinische Anwendungen aber nicht akzeptabel sind und nur ein Temperaturunterschied zwischen Aufnehmer und Fluid von unter 10°C zugelassen werden soll, muss die Fluidtemperatur unabhängig von der Strömungsgeschwindigkeit gemessen werden. Die gemessenen Temperaturdaten werden mit den ebenfalls gemessenen Geschwindigkeitswerten verrechnet, um das Messergebnis temperaturkompensiert zu erhalten. Als Messschaltung kommt

zu diesem Zweck eine in der anemometrischen Messtechnik weit verbreitete Konstant-Temperatur-Brückenschaltung oder eine während dieser Arbeit neu entwickelte Schaltung (vergleiche Kapitel 5.1.3) zur Anwendung.

In Abbildung 4-4 sind verschiedene Designvarianten des Funktionselements zur Strömungsmessung mit zusätzlich integrierter Leiterbahn zur Temperaturbestimmung schematisch dargestellt.

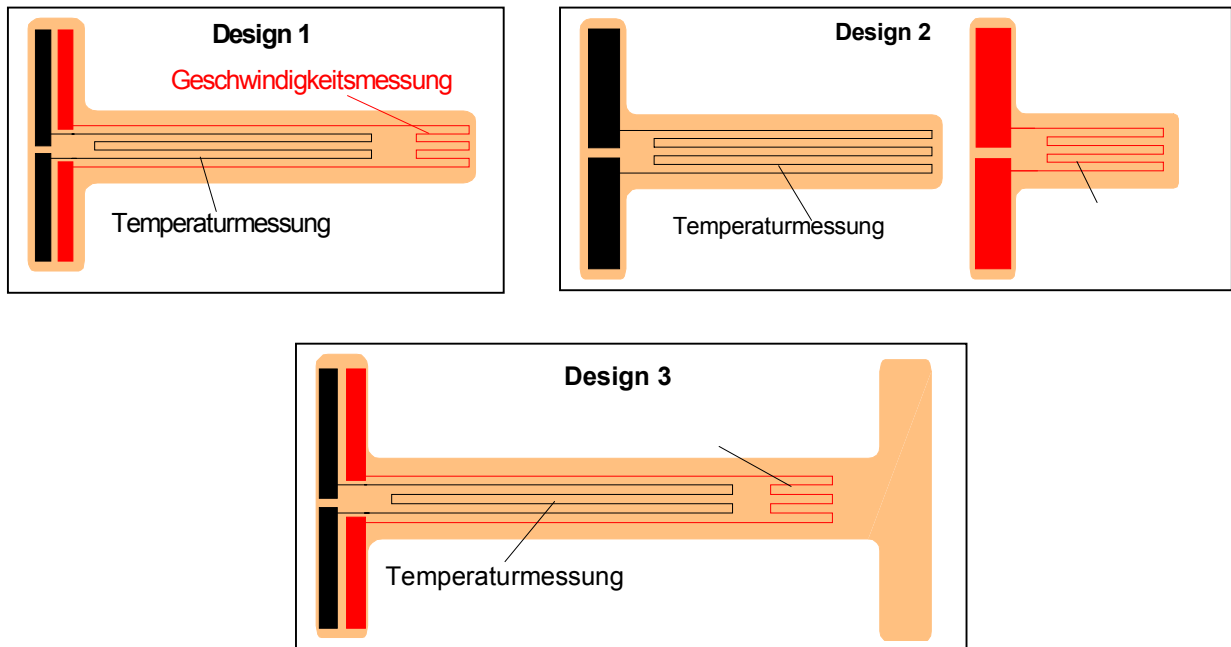


Abbildung 4-4 Schematische Darstellung verschiedener Designvarianten der Sensorelemente. links oben: Design 1 mit einem einseitig eingespannten Trägerkörper und zwei Leiterbahnen. rechts oben: Design 2 mit zwei einseitig eingespannten Trägerkörpern mit je einer Leiterbahn. unten: Design 3 mit einem beidseitig eingespannten, im Betrieb leicht durchhängenden Trägerkörper mit zwei Leiterbahnen.

Die Temperaturbestimmung erfolgt mit den in den Abbildung 4-4 links angeordneten, langen mäanderförmigen Leiterbahnen, die im nahezu unbeheizten Zustand der Strömung ausgesetzt sind. Die Leiterbahnhöhen von Temperatur- und Strömungsmessung sind aus fertigungstechnischen Gründen identisch. Wie aus allen drei Varianten zu erkennen ist, besitzen die Leiterbahnen zur Temperaturmessung eine größere effektive Länge als die Leiterbahnen zur Strömungsmessung. Dies liegt in der Tatsache begründet, dass die Signalauswertung mit Hilfe einer unsymmetrischen Wheatstone'schen Brückenschaltung möglich ist (siehe Kapitel 5.1.3.1 Abbildung 5-4). In dieser Schaltung ist die Brückenverzweigung:

$$\text{Gleichung 4-5} \quad I = I_1 + I_2$$

(mit I = Brückenspeisestrom, I_1 =Strom zur Widerstandserwärmung R_S im aktiven Brückenweig, I_2 =Strom zur Temperaturbestimmung an R_T im passiven Brückenweig)

die den Sondenstrom I_1 liefert, der vom Widerstandsverhältnis im aktiven (wird zur Geschwindigkeitsmessung verwendet) und passiven (wird zur Temperaturmessung verwendet) Brückenweig bestimmt wird:

Gleichung 4-6

$$I_1 = \frac{I}{\left[1 + \frac{(R_1 + R_S)}{(R_2 + R_3 + R_T)}\right]}$$

(mit R_S = Widerstand zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung, R_T = Widerstand zur Temperaturmessung, R_1, R_2, R_3 = Vergleichswiderstände)

Für den Erhalt einer hohen Brückenempfindlichkeit, müssen die Widerstände R_1 und R_S bzw. R_2 und R_T identische Werte aufweisen [Schr88]. Aufgrund der Bedingung des lastfreien, nahezu nicht elektrisch erwärmten Zustandes der Temperaturleiterbahn bzw. um einen möglichst großen Teil des Speisestromes für die Sondenheizung zu nutzen, sollte zusätzlich ein Brückenwiderstandsverhältnis des aktiven und passiven Zweiges von mindestens:

Gleichung 4-7

$$\frac{(R_1 + R_S)}{(R_2 + R_3 + R_T)} \approx 1 : 20$$

gewählt werden. Das bedeutet gleichzeitig, dass 95% des Brückenspeisestromes zur Erwärmung des Widerstandes R_S verwendet werden. Der Rest fließt durch den Widerstand R_T . Je größer das Verhältnis eingestellt wird, desto weniger wird demnach die Temperaturleiterbahn im Vergleich zur Sonde erwärmt. Aufgrund der Begrenzung der Applikationsfläche auf dem Funktionselement wird jedoch die Erhöhung des in Gleichung 4-7 gewählten Widerstandsverhältnisses nach oben begrenzt; dies bestimmt gleichzeitig die Messgenauigkeit der Mediumtemperatur und somit die Empfindlichkeit des kompletten Sensors.

Design 1 in Abbildung 4-4 zeigt ein Funktionselement, auf dem die Leiterbahnen zur Strömungs- und Temperaturmessung gemeinsam untergebracht sind. Beide Leiterbahnen sind so weit voneinander entfernt, dass die beheizte Leiterbahn die unbeheizte nicht erwärmen und dadurch beeinflussen kann. In Design 2 sind zwei verschieden große Messwertaufnehmer zu sehen. Die linke, längere Leiterbahn stellt wieder die zur Temperaturmessung und die rechte, kürzere Leiterbahn die für die Strömungsmessung dar. Design 3 schließlich hebt sich etwas von den beiden ersten Designs ab. Hier ist zu erkennen, dass das Funktionselement aus zwei Haltestegen besteht. Damit auch bei dieser Anordnung die Gehäusedehnung keinen Einfluss auf das Messergebnis nimmt, wird das Funktionselement unter erhöhter Temperatur mit dem Gehäuse verklebt, so dass es ohne Membranvorspannung im Strömungskanal liegt.

Aus Kosten- als auch aus messtechnischen Gründen wurde ein viertes Sensordesign realisiert, welches in Abbildung 4-5 zu sehen ist. Bei diesem Modell wird sowohl die Strömungsgeschwindigkeit als auch die Temperatur mit nur einer Leiterbahn gemessen. Dies erfolgt über ein messtechnisches Pulsverfahren, bei dem die Leiterbahn für eine kurze Zeit aufgeheizt wird und die Strömungsgeschwindigkeit misst. Nachdem der Heizimpuls ausgeschaltet ist, kühlt sich die Leiterbahn auf die Fluidtemperatur ab, die ebenfalls gemessen wird. Beide Signale werden miteinander verrechnet. Dieser Vorgang wiederholt sich mehrmals in der Sekunde. Das Pulsverfahren kam nur zur Anwendung, weil sich die Leiterbahn bzw. das Funktionselement im Fluidkanal sehr schnell aufheizt (<3ms) bzw. abkühlt (<3ms) (siehe Kapitel 5.1.3.2 Abbildung 5-5). Hierfür musste, wie bereits angesprochen, eine Messschaltung entwickelt werden, die in Kapitel 5.1.3.3 ausführlich erläutert wird. Konstruktiv unterscheidet sich dieser Sensor nicht von den oben vorgestellten, d.h., dass auch in diesem Fall die einseitige Aufhängung verwendet worden ist. Der Vorteil dieses Designs liegt in der ausschließlichen Verwendung nur einer Leiterbahn. Das exakte Einstellen eines Widerstandsverhältnisses zweier Leiterbahnen entfällt hierdurch. Dies führt zu einer zusätzlichen Platzersparnis auf dem Träger-

körper, die eine Verkleinerung des Sensors möglich macht und somit zur Kostenreduzierung beiträgt.

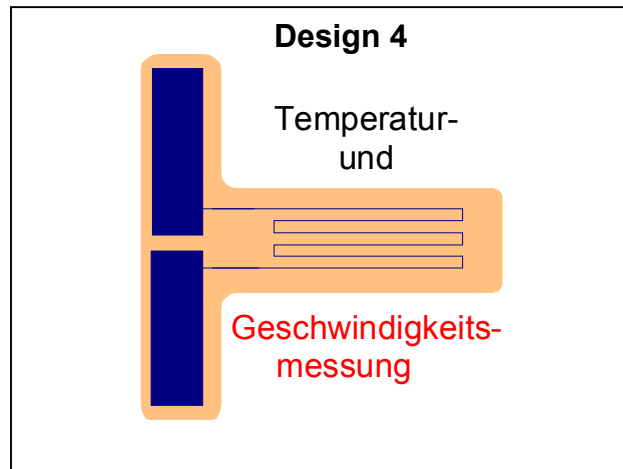


Abbildung 4-5: Schematische Darstellung des Sensorelements zur Messung der Temperatur und Strömungsgeschwindigkeit des Fluids mit nur einer Leiterbahn.

4.3 Herstellung des Durchflusssensors mit dem AMANDA-Verfahren

4.3.1 Herstellung der Funktionselemente (Membranherstellung)

In Abbildung 4-6 ist die Herstellung der Funktionselemente unter Verwendung einer nasschemischen Strukturierung der Leiterbahnen schematisch zu sehen. Dabei wird zuerst eine dünne Goldtrennschicht mit einer Dicke von $0,2\ \mu\text{m}$ auf einen Silizium-Wafer, der als Substrat dient, aufgedampft (Abbildung 4-6a). Danach folgt für die (Träger-) Polyimidmembranherstellung das Aufschleudern des Negativ-Photolacks. Dafür wird ein Tropfen des flüssigen Resists auf die Mitte des Substrates gebracht, der sich durch anschließendes Zentrifugieren auf dem Substrat mit einer bestimmten Schichtdicke (hier $1\text{-}5\ \mu\text{m}$) in Abhängigkeit von der Drehzahl verteilt. Anschließend wird der Resist auf einer Heizplatte (Softbake) getrocknet und photolithographisch strukturiert (Abbildung 4-6b). Die durch eine Chrommaske belichteten Strukturen werden dabei durch den UV-Lichteinfluss unlöslich, während unbelichtete Gebiete löslich bleiben und von einem organischen Entwickler herausgelöst werden können. Zur vollständigen Trocknung des Resists und zur Stabilisierung der Struktur Grenzen wird abschließend ein weiterer Ausheizschritt vorgenommen (Post-Exposure Bake).

Für die Leiterbahnherstellung wird eine 60 bis 200 nm dicke Platin-, Titan- oder Goldschicht mit einer darunter befindlichen, 4-10nm hohen Chrom-Haftsicht auf die Trägermembran aufgedampft (Abbildung 4-6c). Auf diese Metallschicht wird ein Positiv-Resist aufgeschleudert, der mit einer weiteren Chrommaske positioniert belichtet wird (Abbildung 4-6d). Dadurch werden die belichteten Gebiete in eine alkalilösliche Form überführt, während die unbelichteten Gebiete unlöslich bleiben. Die Metallschicht wird nun mit einem geeigneten Ätzmedium strukturiert (Abbildung 4-6e). Nach der Entfernung des verbliebenen Resists ist die Herstellung der Leiterbahnstrukturen abgeschlossen (Abbildung 4-6f). Da die nasschemische Strukturierung von Platin in diesen Herstellungsprozess als problematisch bezeichnet werden muss, wurden ausschließlich Leiterbahnen aus Gold und Titan nasschemisch hergestellt.

Zur Abdeckung der Leiterbahnen wird nochmals der Negativ-Photoresist aufgeschleudert und in einem dritten, positionierten Belichtungsschritt photolithographisch strukturiert (Abbildung 4-6g). Das anschließende Ausbacken des Lackes (Cure-Bake) dient wiederum zur Trocknung des Resists und zusätzlich zur Homogenisierung des Metallgefüges der Leiterbahnen.

Die auf diese Weise hergestellten Funktionselemente (Abbildung 4-6h) sind auf einem $4''$ Silizium-Wafer in zwei Nutzen aufgeteilt. Zur Zeit ermöglicht dies die gleichzeitige Herstellung von 50 Durchflusssensoren im Nutzen.

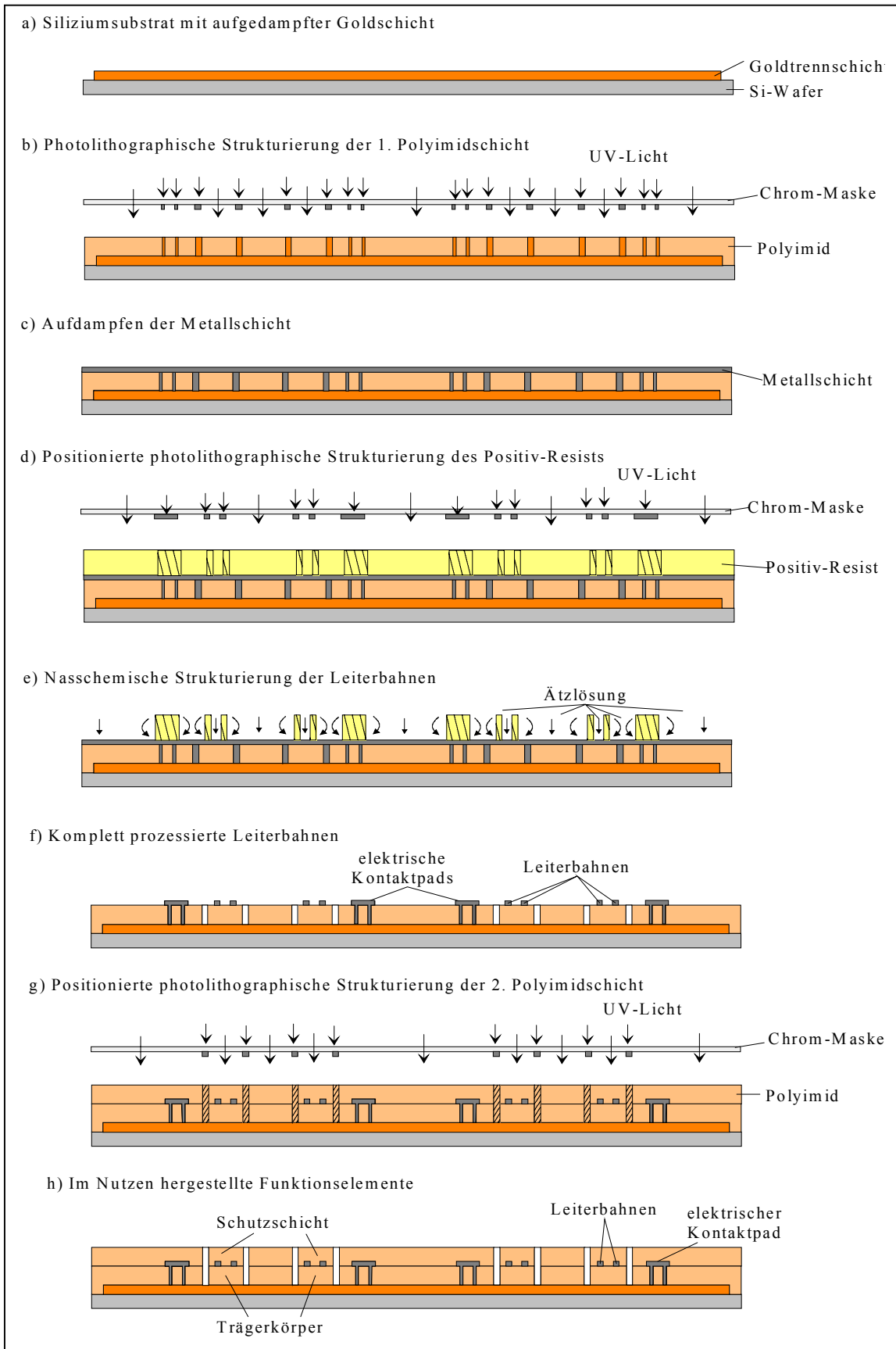


Abbildung 4-6: Herstellung der Funktionselemente unter Verwendung der nasschemischen Ätzmethode.

In Abbildung 4-7 ist ein Trägerkörper aus Polyimid mit einer darauf befindlichen $7\mu\text{m}$ breiten Leiterbahn aus Gold zu sehen; diese wurde mit dem vorstehend dargestellten, aus der Pumpenleiterbahnherstellung bekannten Prozess nasschemisch strukturiert. Die Leiterbahnbreite entspricht dem gewünschten Sollzustand. Da die Pumpenleiterbahnen jedoch eine Breite von $200\mu\text{m}$ aufweisen und mit einer Maßuntreue von 1% nasschemisch gefertigt werden, ist wenn diese Abweichung auf den nasschemischen Herstellungsprozess der $7\mu\text{m}$ breiten Leiterbahnen übertragen wird, mit einer Unterätzung von $2\mu\text{m}$ auf $5\mu\text{m}$ zu rechnen. Dies entspricht einer Reduzierung der Leiterbahnbreite von 30%. Darüber hinaus ist es mit diesem Verfahren nur begrenzt möglich, eine weitere Breitenreduzierung der Leiterbahnen und dadurch eine Verkleinerung des Sensorelements zu erreichen. Für schmale Leiterbahnen ist deshalb ein Herstellungsverfahren anzuwenden, mit der diese Toleranzen weiter verringert werden können.

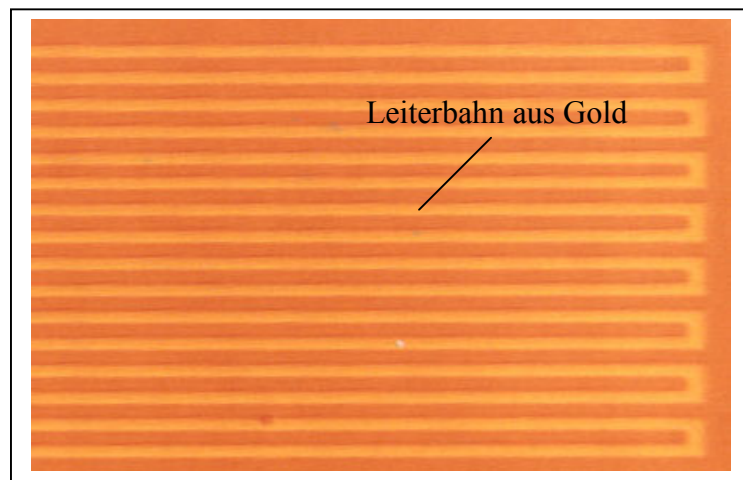


Abbildung 4-7: Nasschemisch hergestellte Leiterbahnen mit einer Breite von $7\mu\text{m}$.

Aufgrund der dargestellten Ergebnisse wurde ein weiterer Strukturierungsprozess gesucht, der einerseits Platin als Leiterbahnmaterial zulässt, andererseits jedoch auf eine nasschemische Ätzmethode verzichtet.

Dafür wurde ein, für das AMANDA-Verfahren bisher nicht angewandtes, lithographisches Verfahren verwendet, welches auf der Lift-off Technik [More88] basiert. Dieses Verfahren ist aufgrund der lithographischen Herstellung von schrägen Wänden mit Hinterschnitt besser als die nasschemische Strukturierungsmethode geeignet, da das Verfahren für jedes zu strukturierende Metall anwendbar ist. Abbildung 4-8 zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung.

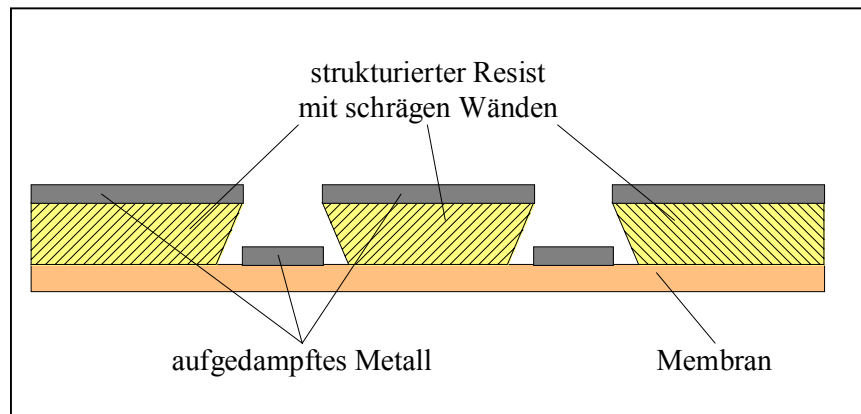


Abbildung 4-8: Schematische Darstellung der schrägen Resistwände die mit dem Lift-off Verfahren hergestellt wurden.

Im Folgenden wird dieser Prozess anhand der Abbildung 4-9 ausführlich beschrieben. Der Aufbau der Membran (Trägerkörper) ist bis Schritt Abbildung 4-6b identisch. Danach wird der Wafer mit einem speziellen Photoresist, der sich für die Lift-off Technik eignet, beschichtet und mit der Leiterbahnmaske positioniert belichtet (Abbildung 4-9a). Mit diesem positiven IR-Photoresist besteht die Möglichkeit, durch eine Tonumkehr (Image-Reverse Schritt) eine negative Form der verwendeten Maske zu erstellen [Prod00]. Diese Tonumkehr wird durch einen speziellen vernetzenden Wirkstoff im Resist, der erst ab einer bestimmten Temperatur und nur in den belichteten Gebieten des Resists aktiv wird, ausgelöst (Abbildung 4-9b/ Image Reversal Bake). Dieser Wirkstoff führt zusammen mit der belichteten, photoaktiven Komponente zu einer, für normale Entwickler unlöslichen und nun lichtunempfindlichen Substanz, während die unbelichteten Bereiche sich wie ein unbelichteter positiver Photoresist verhalten. Nach einer Flutbelichtung lassen sich nun die in eine lösliche Form überführten Bereiche des vorher unbelichteten Resists mit einem Entwickler herauslösen (Abbildung 4-9c). Das Resultat ist ein negativer Abdruck der verwendeten Maske mit einem negativen Winkel des Wandprofils, welches ideal für den Lift-off Prozess verwendet werden kann. Dieser Winkel kommt aufgrund der ersten Belichtung des positiven Photoresist (Schritt Abbildung 4-9a und vor dem Image Reverse Schritt) und dem daraus erhaltenen positiven Profilwinkel zustande [More88]. Dieser positive Photoresist wies im allgemeinen nach einer Belichtung, in Abhängigkeit von den Prozessparametern, einen positiven Winkel von ca. 87° auf. Dieser Winkel kommt aufgrund der Beugung des Lichtes an der Maskenkante und durch Absorption an den photoaktiven Komponenten und der daraus folgenden Abschwächung des Lichtes beim Durchdringen des Resists zustande [More88].

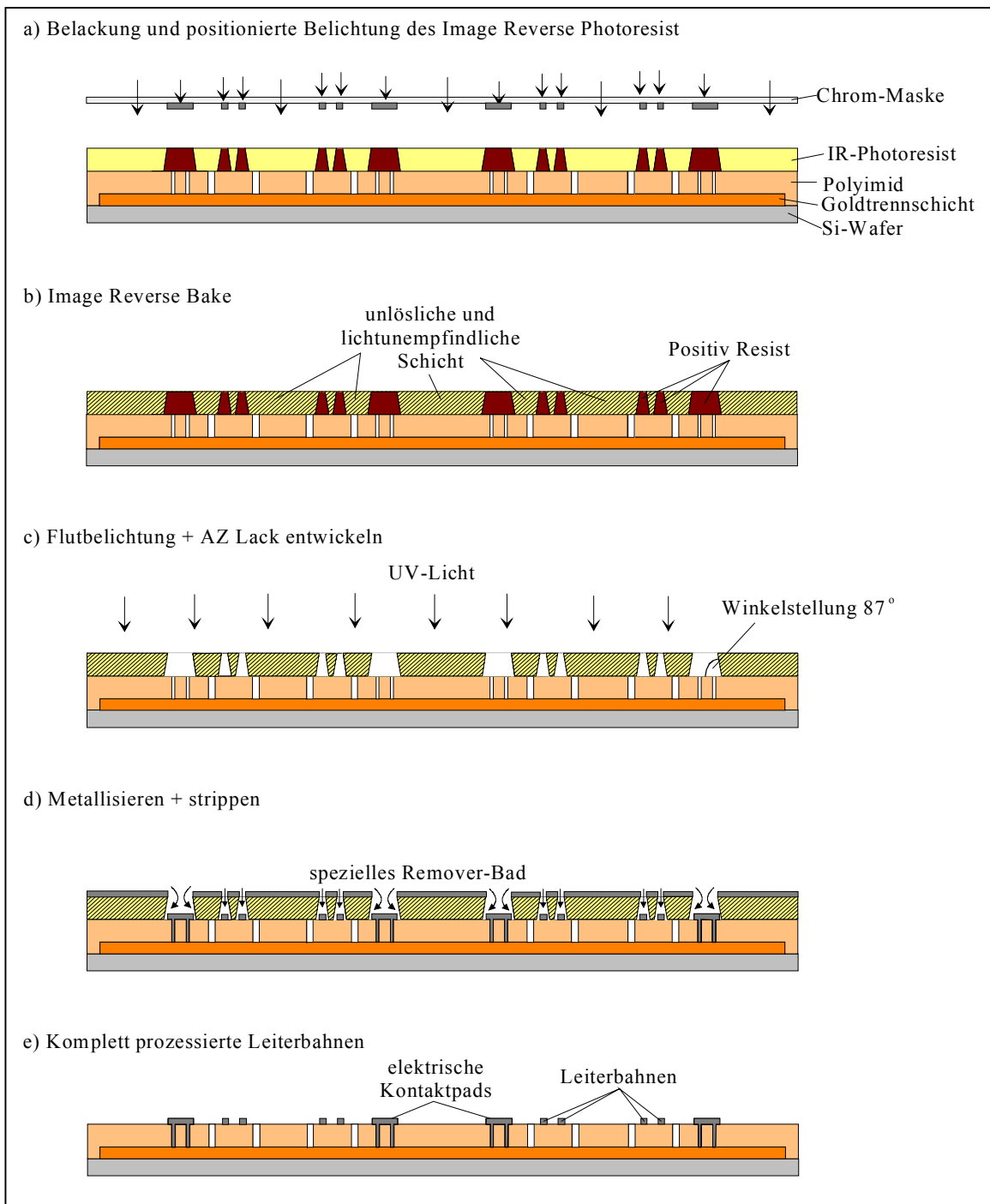


Abbildung 4-9: Lift-off Verfahren.

Im folgenden PVD-Prozessschritt wird der Wafer mit dem Leiterbahnmaterial Platin, Titan oder Gold in wagerechter Lage bedampft, so dass an den negativ abfallenden Wandstrukturen kein Material aufwachsen kann. In Abbildung 4-10 sind Rasterelektronenmikroskop (REM)-Aufnahmen einer Leiterbahnteilstruktur nach dem Metallisieren (Abbildung 4-9d) zu sehen.

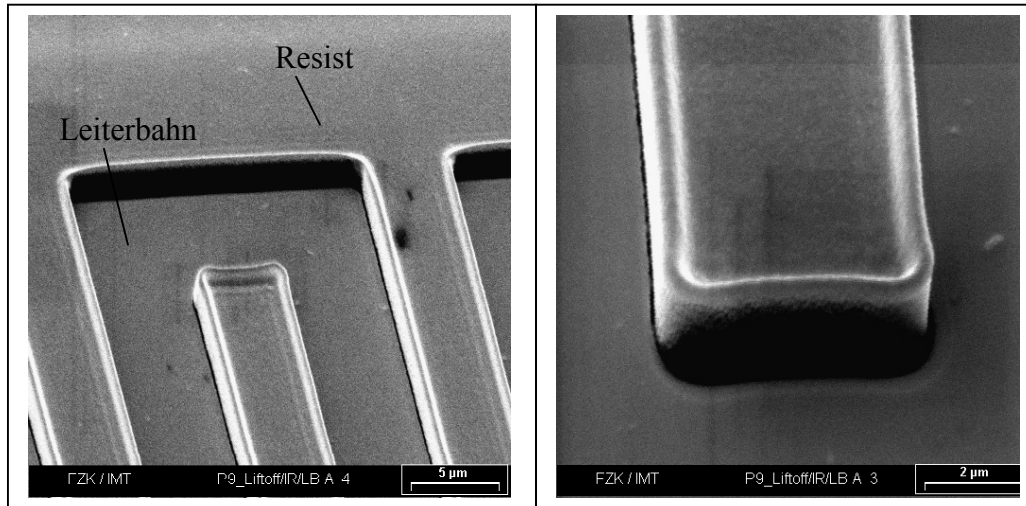


Abbildung 4-10: REM-Aufnahmen der Leiterbahnstrukturen nach dem Metallisieren.

In Abbildung 4-10 links ist der Teil-Abdruck der Maske mit dem negativen Wandprofil (erhöhte Struktur) zu erkennen. Die tiefer liegende Struktur ist in diesem Fall die mäanderförmige Leiterbahn aus Platin. In Abbildung 4-10 rechts ist eine erhöhte Resist-Struktur zu sehen. Betrachtet man deren Stirnseite, ist ein schwarzer Bereich zu erkennen. Dies weist darauf hin, dass an dieser Stelle kein Platin vorhanden ist. Somit ist mit Hilfe eines speziellen Removers ein Entfernen (stripfen) der im Image Reverse Schritt hergestellten erhöhten Strukturen möglich (Abbildung 4-9d).

In Abbildung 4-11 sind die auf der Trägermembran hergestellten Leiterbahnen mit jeweils einer Breite von $7\mu\text{m}$ zu sehen. Dabei zeigt Abbildung 4-11 links ein Sensorelement für sehr kleine Durchflüsse, welches in einem $100\mu\text{m}$ breiten Kanal positioniert werden kann. Abbildung 4-11 rechts zeigt ein Sensorelement für einen $300\mu\text{m}$ breiten Kanal.

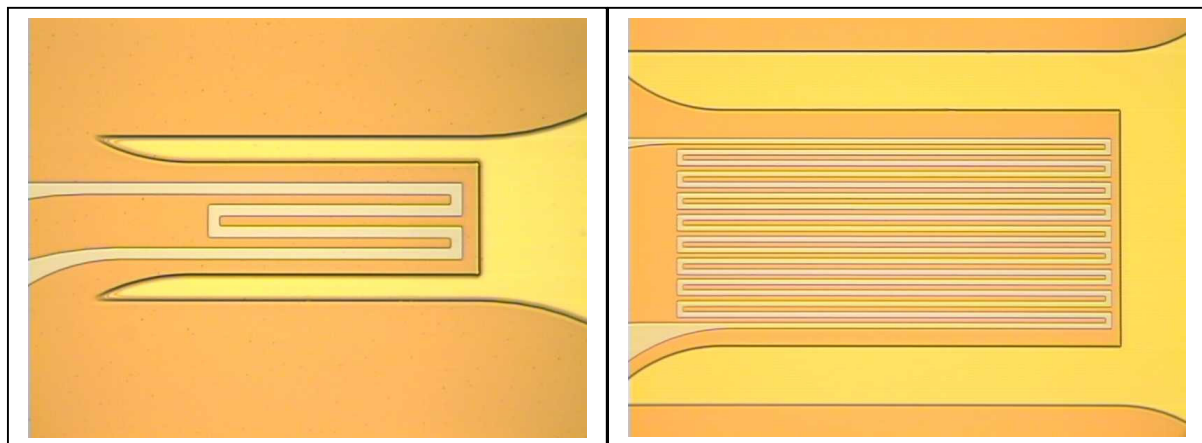


Abbildung 4-11: Aufnahme von zwei verschieden breiten Funktionselementen mit $7\mu\text{m}$ breiten Leiterbahnen aus Platin.

Die so prozessierten Leiterbahnen (Abbildung 4-9e) werden im nächsten Schritt mit der zweiten Polyimidschicht überzogen (vergleiche Schritt Abbildung 4-6g).

Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, die Leiterbahnstruktur mit einem anderen Lift-off Prozess herzustellen. Das sog. „T-Shape Profil“ besitzt gegenüber dem bereits vorgestellten Profil eine größere Prozesssicherheit. In Abbildung 4-12 ist eine schematische Darstellung des in T-Form strukturierten Resists zu sehen.

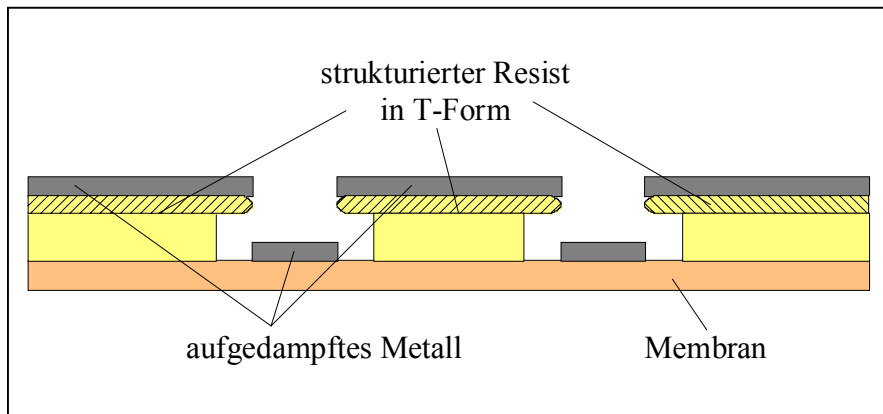


Abbildung 4-12: Schematische Darstellung der mit dem Lift-off Verfahren hergestellten T-Formen.

Diese Struktur wird durch folgende Fertigungsschritte hergestellt (siehe Abbildung 4-13). Im ersten Schritt wird der Wafer mit dem vorstehend verwendeten, speziellen positiven IR- (Image Reverse) Photoresist belackt und vorgetrocknet. Danach erfolgt eine kurze und niederenergetische Flutbelichtung, um die photoaktiven Komponenten an der Oberfläche des Resists zu generieren. Der danach folgende „Image Reversal bake“ wandelt diese Oberflächenbereiche um, so dass sie unlöslich und lichtunempfindlich werden (Abbildung 4-13a). Nach diesem Prozess kann der Resist als ein normaler positiver Photoresist weiterbehandelt werden. Im nächsten Schritt wird der Wafer mit der Leiterbahnmaske positioniert belichtet (Abbildung 4-13b). Im anschließenden Entwicklungsschritt diffundiert der Entwickler durch die unlösliche Oberschicht und löst die belichteten Gebiete heraus. Dabei entsteht die in Abbildung 4-13c gezeigte T-Form. In Schritt Abbildung 4-13d wird der Wafer mit dem Leiterbahnmaterial bedampft. Danach wird die vorher applizierte Resiststruktur entfernt (gestrippt). In Abbildung 4-14 sind zwei REM-Aufnahmen von Leiterbahnteilstrukturen mit T-Profil zu sehen. Die erhöhte Struktur besitzt eine optimale Höhe von 1,6µm. Diese Höhe wird mit der zweiten, positionierten Belichtung erzeugt.

Diese T-Strukturen besitzen einen größeren Überhang gegenüber den mit dem ersten Lift-off Verfahren hergestellten Strukturen und damit eine erhöhte Prozesssicherheit. Ein weiterer Vorteil der T-Struktur ist die kürzere Stripzeit des bedampften Resists. Damit sind die T-Strukturen für den Lift-Off Prozess am besten geeignet.

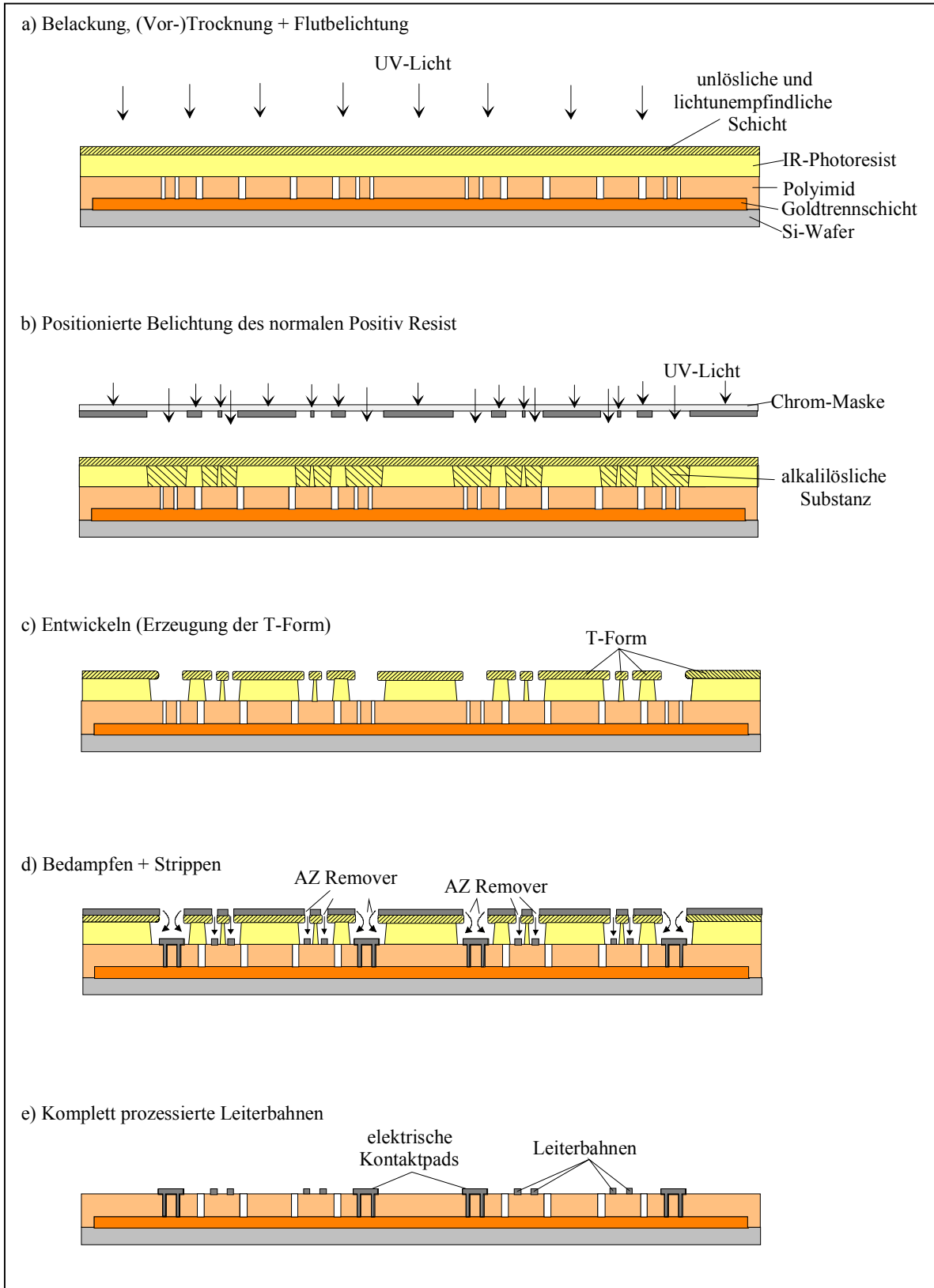


Abbildung 4-13: Lift-off Prozess nach dem T-shape Verfahren.

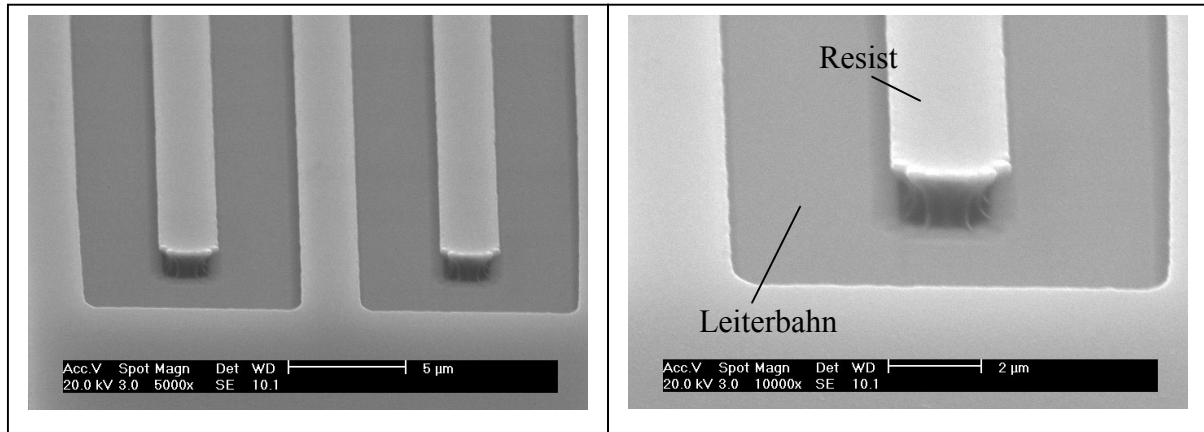


Abbildung 4-14: REM-Aufnahmen von Leiterbahnstrukturen die nach dem T-shape-Lift-off Verfahren hergestellt wurden.

Abbildung 4-15 zeigt zwei mit dem „T-shape“-Lift-off Prozess hergestellte Sensorelemente. Dabei besitzt das in Abbildung 4-15 links zu sehende Sensorelement Leiterbahnen mit einer Breite von 2 µm. Dieses Sensorelement, welches speziell für Messungen minimalster Durchflüsse entwickelt worden ist, wird in einem Fluidkanal mit einer Breite von 45 µm positioniert. Abbildung 4-15 rechts zeigt ein Sensorelement mit 5 µm breiten Leiterbahnen.

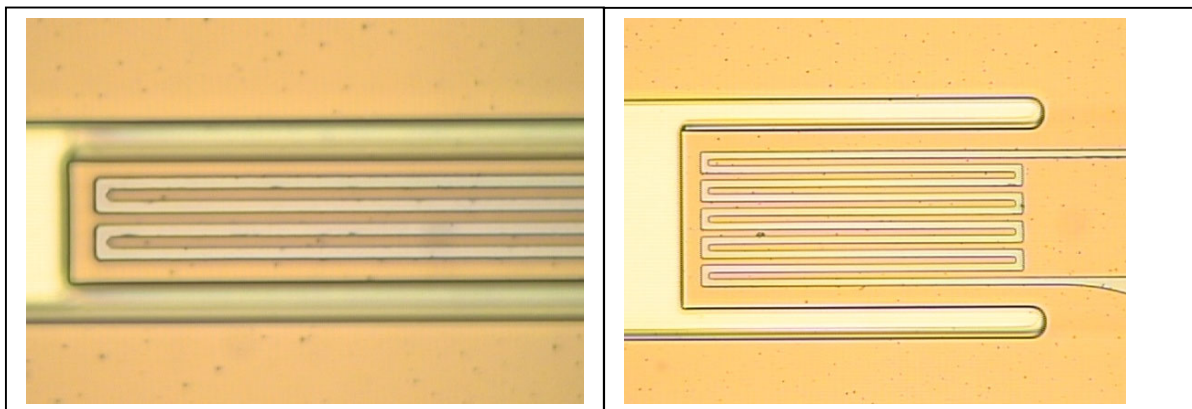


Abbildung 4-15: Funktionselemente mit Leiterbahnen aus Platin mit einer Breite von links: 2 µm. rechts: 5 µm.

Nachdem die Leiterbahnen vollständig prozessiert sind (Abbildung 4-13e), werden sie mit einer Schutzschicht aus Polyimid abgedeckt.

Die beschriebenen „Lift-off“-Herstellungsprozesse verzichten damit vollkommen auf eine nasschemische Strukturierung der Leiterbahnen, so dass Funktionselemente mit beliebigen Materialien hergestellt werden können. Unterätzungen, vor allem der 2 µm breiten Strukturen, können nicht auftreten. Durch die Verwendung der 2 µm breiten Leiterbahnen wurde die benötigte Leiterbahnfläche auf dem Trägerkörper verringert. Hieraus ergaben sich Vorteile im thermischen Verhalten des Sensors, da die Erwärmung des Funktionselements nun über eine kleinere Fläche, d.h. nahezu punktförmig und ohne Temperaturgefälle über der Membran erfolgte. Allerdings stellte die Herstellung der 2 µm breiten Leiterbahn die untere prozessgesicherte Strukturierungsgrenze dar. Diese Abmessung wurde mit Hilfe von unterschiedlich breiten Teststrukturen, wie sie im REM-Bild in Abbildung 4-16 dargestellt sind, ermittelt. Strukturbreiten die kleiner als 2 µm sind, können daher zur Zeit, mit den für das Lift-off Verfahren verwendeten Prozessparametern nicht hergestellt werden.

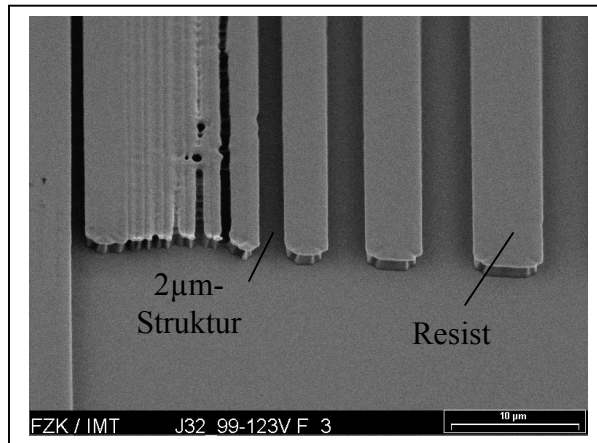


Abbildung 4-16: Teststrukturen zur Ermittlung der unteren Strukturierungsgrenze.

4.3.2 Herstellung der Kunststoffgehäuse

Die Herstellung der PSU-Gehäuseteile erfolgt kostengünstig mit dem Spritzguss- oder dem Heißprägeverfahren. Das zur Fertigung der Gehäuseober- und Gehäuseunterteile benötigte Werkzeug wurde mit einem Diamantfräser mit einem Durchmesser von 300µm, mikromechanisch aus einem Messinghalbzeug, von der Fa. Kern in Murnau hergestellt. Anzumerken ist, dass dieser Formeinsatz schon in einer früheren Arbeit zum Einsatz gekommen ist [Mart98]. Da dieser Einsatz fluidische Kanäle mit verschiedenen Querschnitten enthält, konnte er in dieser Arbeit zur Herstellung der Gehäuse verwendet werden. Vorteilhaft war die beträchtliche Kosten- und Zeitersparnis gegenüber einer sonst notwendig gewesen Neuanfertigung eines Formeinsatzes. Jedoch ergab sich hieraus das Problem der Fertigung von „nur“ 50 Sensoren in zwei nebeneinanderliegenden Nutzen. Abbildung 4-17 links zeigt die mit dem Heißprägeverfahren hergestellten Gehäuseteile (Ober- und Unterteil). Die darauf befindlichen Fluidkanäle besitzen Längen zwischen 2–4mm, Breiten von 45–500µm bei Tiefen zwischen 100–240µm. In Abbildung 4-17 rechts wird ein Detailausschnitt des oberen Gehäuseteils gezeigt. Aufgrund der Länge war es für Testzwecke möglich, jeweils zwei Funktionselemente in einem Kanal vorzusehen. Bei einer Neufertigung eines Formeinsatzes und bei geeigneter Anordnung der oben beschriebenen Kanäle können mindestens 150 Sensoren, die in 2 Nutzen nebeneinander angeordnet sind, hergestellt werden.

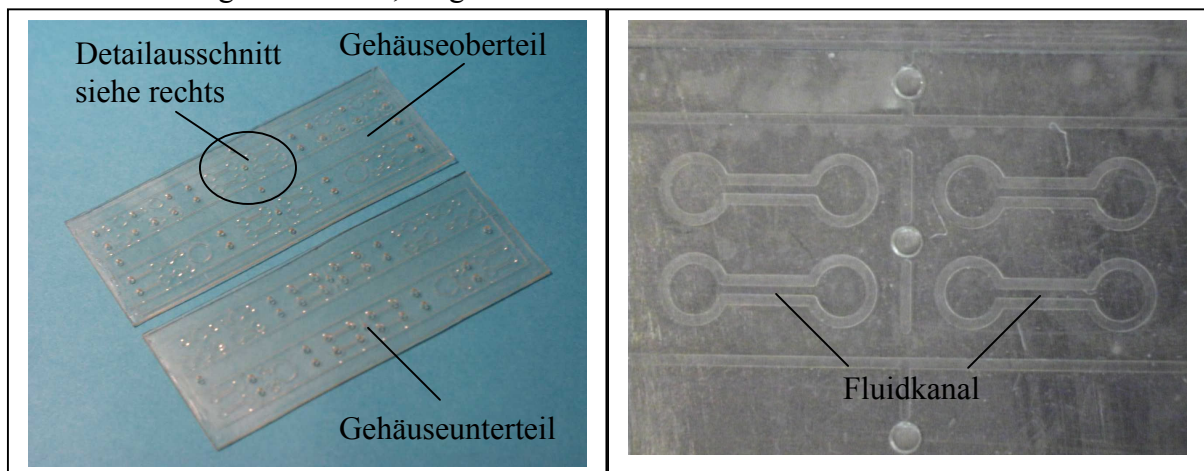


Abbildung 4-17: links: Abgeformtes Gehäuseober- und Unterteil aus PSU. rechts: Kanalstrukturen auf der Gehäuseoberseite.

4.3.3 Membranübertragung mittels Kammerklebetechnik

Die Verklebung der Funktionselemente mit den Kunststoffgehäusen findet in zwei Arbeitsschritten statt. Der Prozess der Membranübertragung ist Bestandteil des AMANDA-Verfahrens und wurde in der Mikropumpenfertigung zum ersten Mal angewendet [Büst96]. Er wird für diesen Flusssensor in Abbildung 4-18a-d graphisch dargestellt. Im ersten Verbindungsschritt wird das Gehäuseoberteil auf den Wafer mit den hergestellten Funktionselementen positioniert. Unter Anwendung der Kammerklebetechnik wird das Gehäuseoberteil mit dem Membrannutzen verklebt (Abbildung 4-18b). Dabei verteilt sich der eingespritzte Epoxidharzklebstoff in speziell dafür vorgesehenen Klebekammern.

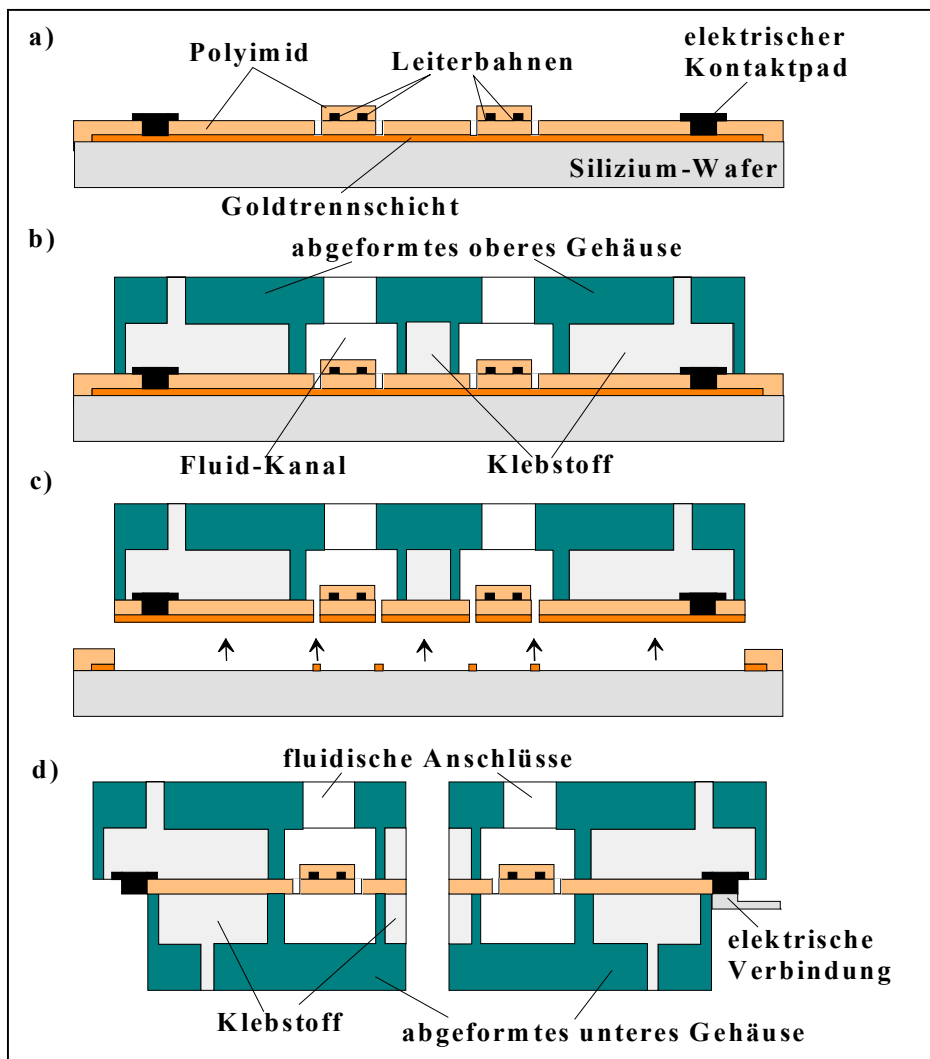


Abbildung 4-18: Herstellung der Sensoren mittels Membranübertragung.

In Abbildung 4-19 links ist die Kammerklebeapparatur mit Positioniertisch und Optik zu sehen. In Abbildung 4-19 rechts ist ein verklebtes Gehäuseoberteil mit einer auf dem Silizium-Substrat befindlichen Membran zu sehen. Bei der Positionierung der Strukturen wurde durch die vorhandene Optik eine Genauigkeit von $\pm 2.5\mu\text{m}$ zum Gehäuse erreicht. Dadurch wurde es möglich, eine $40\mu\text{m}$ breite Fahne in einen $45\mu\text{m}$ breiten Kanal zu positionieren.

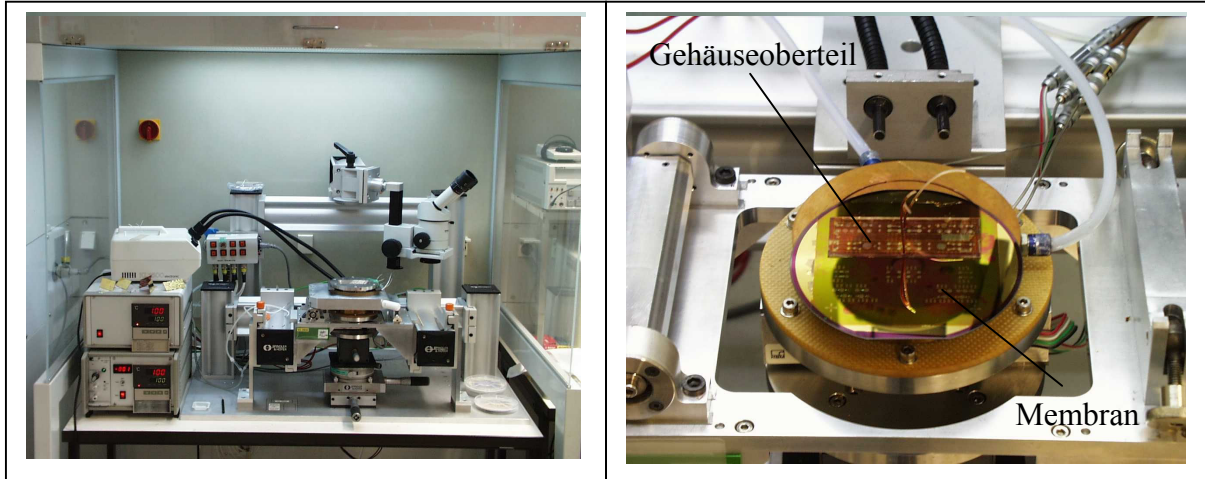


Abbildung 4-19: links: Kammerklebevorrichtung. rechts: Mit der strukturierten Membran verklebtes Gehäuseoberteil.

Abbildung 4-20 links zeigt einen positioniert verklebten $40\mu\text{m}$ breiten Messwertempfänger in einem $45\mu\text{m}$ breiten Kanal. Bei der Mikropumpenherstellung wurde das Gehäuse bisher über einen durch das transparente Gehäusematerial sichtbaren Goldring auf der Membran positioniert. Dieser Ring ist jedoch aufgrund der darunter befindlichen Polyimidmembran relativ dunkel und daher wenig kontrastreich. Für die sehr genaue Positionierung des in dieser Arbeit entwickelten Sensorelementes zum Fluidkanal bzw. Gehäuse erwies es sich als Vorteil, die Gehäuse nicht über diesen einfachen Goldring, sondern auf die unter der Membran befindliche Goldschicht und den darüber liegenden, erzeugten Strukturen zu positionieren. Dazu war es notwendig, die Membran so zu strukturieren, dass die Gold(trenn)schicht in bestimmten Bereichen nicht mit Polyimid abgedeckt wird. Das Ergebnis war ein, für die optische Positionierung verbesserter Kontrast. In Abbildung 4-20 rechts ist die unter dem Gehäuse mit Fluidkanal befindliche, um Δy versetzte Membranstruktur mit der darunter liegenden Goldschicht zu sehen. Aufgrund der in dieser Abbildung dargestellten kontrastreichen Strukturen konnte der Kanal mit der oben angegebenen Genauigkeit durch Verschiebung um Δy über dem Sensorelement positioniert werden.

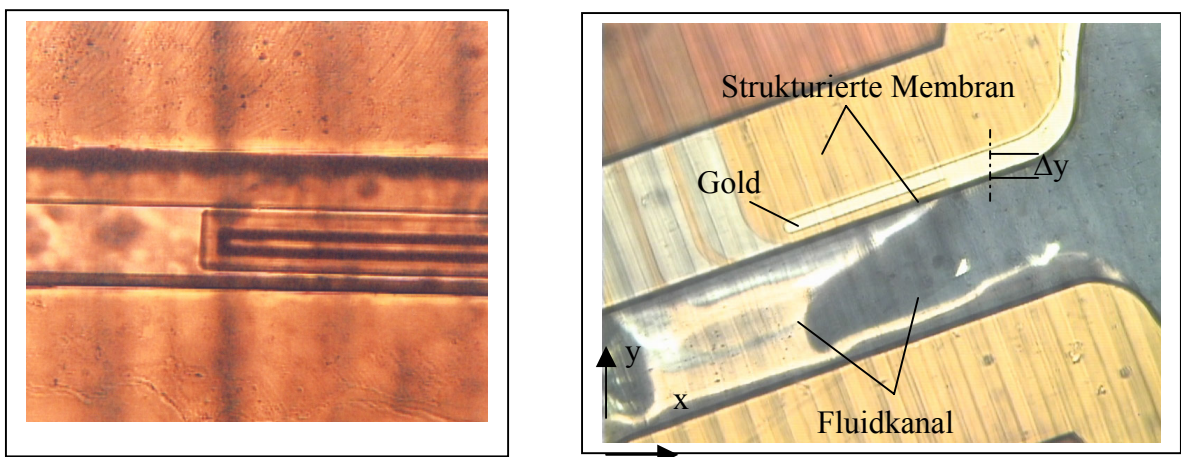


Abbildung 4-20: links: Aufnahme eines $40\mu\text{m}$ breiten Messwertempfänger, der in einem $45\mu\text{m}$ breiten Kanal positioniert verklebt wurde. rechts: Aufnahme einer unter dem Gehäuseteil befindlichen Membranstruktur.

Nach dem Aushärten des Klebstoffs wird die Gehäusemembran um das Gehäuseteil herum durchgetrennt und danach vom Silizium-Wafer abgehoben (Abbildung 4-18c). Dies ist aufgrund der geringen Haftung zwischen dem Silizium und der Goldtrennschicht möglich. Die verbliebene Goldschicht auf der Unterseite der Membran wird entfernt. In einem zweiten Kammerklebeschritt wird das Gehäuseunterteil, ebenfalls mit Hilfe der oben beschriebenen Apparatur, mit dem Gehäuseoberteil verklebt (Abbildung 4-18d). In Abbildung 4-21 ist ein Sensornutzen (beide Gehäusenhälften mit der Membran verklebt) im Detailausschnitt dargestellt. Nach dem der Klebeprozess beendet ist, folgt die Vereinzelung des Nutzens über einen Sägeschnitt.

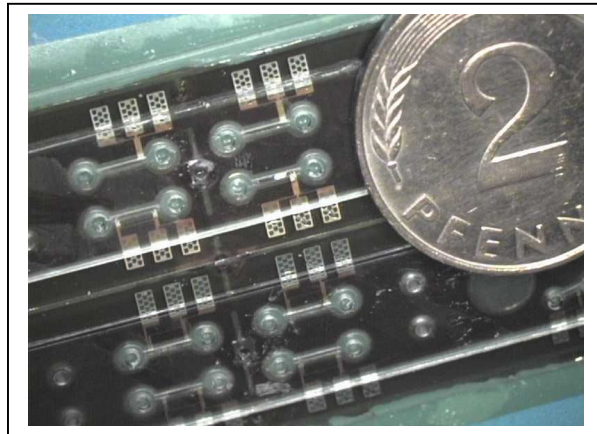


Abbildung 4-21: Sensornutzen im Detailausschnitt (beide Gehäusenhälften mit Membran verklebt)

4.3.4 Elektrische und fluidische Kontaktierung der Sensoren

Im nächsten Fertigungsschritt werden die einzelnen Sensoren sowohl fluidisch als auch elektrisch kontaktiert. Dabei werden bei der fluidischen Kontaktierung Kanülen mit einem Innendurchmesser von $500\mu\text{m}$, mittels eines unter UV-Licht aushärtenden Klebstoffs, in der Einlass- und Auslassbohrung befestigt. Abbildung 4-22 zeigt einen einzelnen, fluidisch kontaktierten Durchflusssensor im Größenvergleich mit einer Rheinschnake.

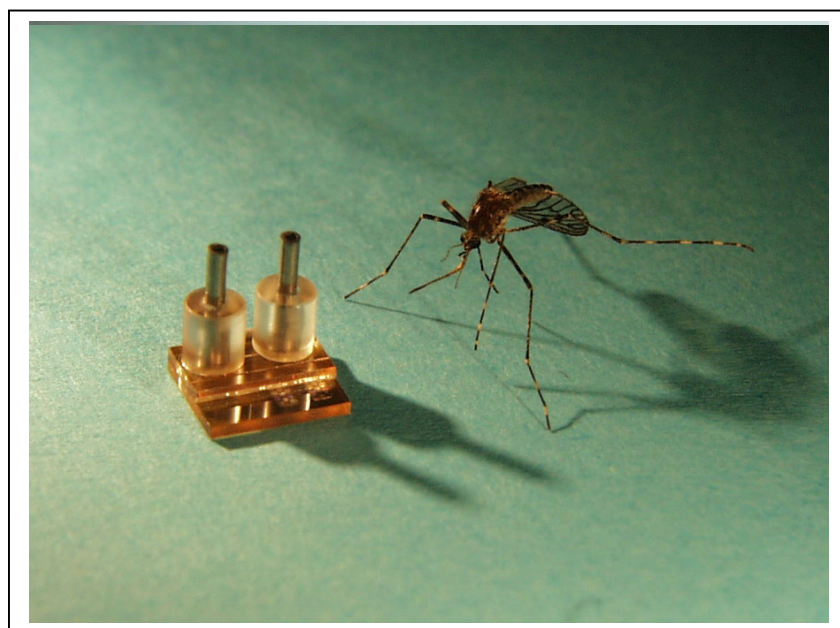


Abbildung 4-22: Durchflusssensor im Größenvergleich mit einer Rheinschnake.

Die elektrische Kontaktierung erfolgt mittels anisotropen Leitkleben [Maas96]. Dabei wird der Klebefilm, der aus einem organischen Träger mit Silberkugeln besteht, zwischen die zusammen zu fügenden Bauteile (Kontaktpad auf der Membran und Flachbandkabel) gelegt und mit Hilfe von Temperatur und Druck elektrisch verbunden. In Abbildung 4-23 links sind die elektrischen Kontaktpads des Durchflusssensors dargestellt. Diese sind aufgrund mechanischer Stabilität zwischen zwei Polyimidmembranen, von dem die obere strukturierte Löcher besitzt, eingepackt. In Abbildung 4-23 rechts ist ein kompletter, sowohl fluidisch als auch elektrisch kontaktierter Durchflusssensor im Größenvergleich mit einem Marienkäfer gezeigt.

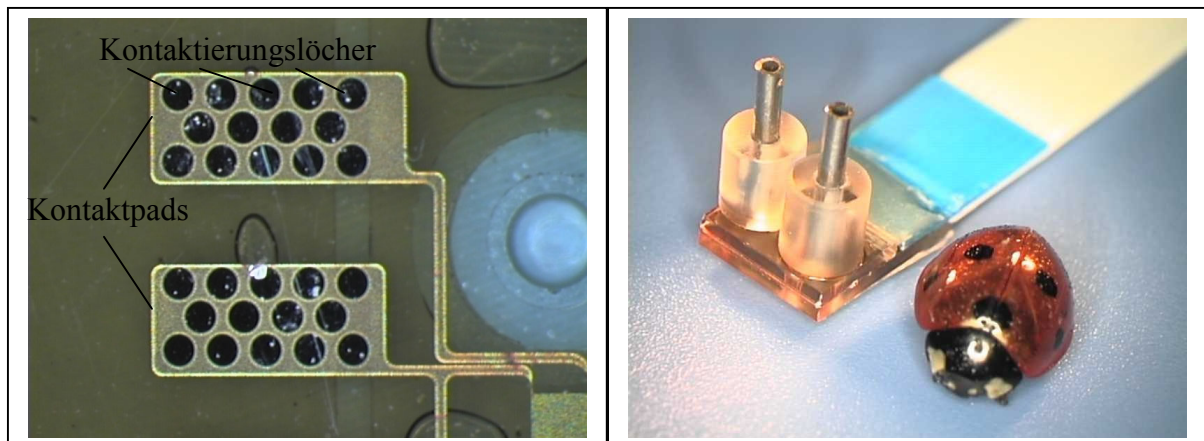


Abbildung 4-23: links: Aufnahme der elektrischen Kontaktpads die von zwei Polyimidmembranen geschützt sind. rechts: Einzelner komplett kontaktierter Sensor im Größenvergleich mit einem Marienkäfer.

Die Herstellung des Durchflusssensors ist nach der beschriebenen elektrischen und fluidischen Kontaktierung abgeschlossen. Jedoch ist vor allem die fluidische Kontaktierung recht aufwendig und dadurch sehr zeitintensiv. Daher wurde zu Testzwecken eine weniger aufwendige fluidische Kontaktierungsmethode verwendet. Dazu werden Polymerschläuche direkt in die auf dem Gehäusenutzen vorgesehenen fluidischen Kontaktierlöcher gesteckt und miteinander verklebt. Für diese Methode wird ein hochviskoser und sehr schnell trocknender 2-Komponenten Epoxidharz-Klebstoff verwendet. Damit wird verhindert, dass der Klebstoff aufgrund unkontrollierten Fließens den Schlauch bzw. das Loch zuklebt. Dieser Klebstoff wurde um die eingesteckten Schläuche herum aufgetragen und innerhalb kürzester Zeit getrocknet. Bei diesem häufig verwendeten Kontaktierungsverfahren wurde eine hinreichende mechanische Festigkeit zwischen Schlauch und Gehäusenutzen, eine sehr gute fluidische Dichtigkeit und damit ein sehr guter fluidischer Kontakt erreicht. Für Tests war es nicht notwendig, die Gehäusenutzen zu vereinzeln. Abbildung 4-24 links zeigt einen für Testzwecke kontaktierten Gehäusenutzen und in Abbildung 4-24 rechts im Vergleich dazu herkömmliche, komplett sowohl fluidisch als auch elektrisch kontaktierte Sensoren.

Die Fertigungsausbeute der im Doppelnutzen hergestellten Durchflusssensoren lag mit den beschriebenen Labormitteln bei achtzig Prozent.

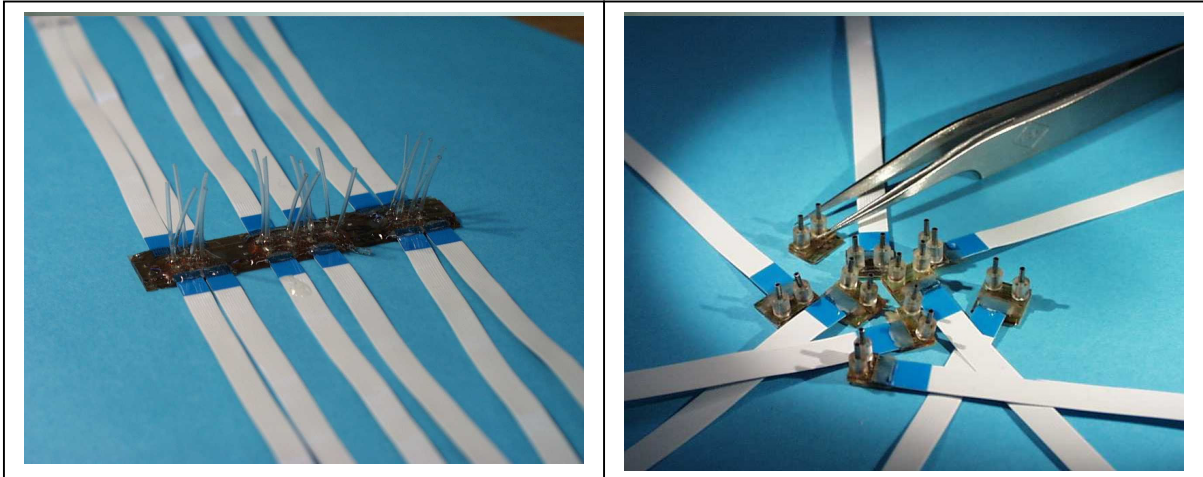


Abbildung 4-24: links: Für Testzwecke fluidisch einfach kontaktierte Durchflusssensoren. rechts: Einzelne herkömmliche Durchflusssensoren.

4.3.5 Herstellungskosten

Die Herstellung des Durchflusssensors mit dem AMANDA-Verfahren führt zu niedrigen Produktionskosten. Die Parallelfertigung der Sensorkomponenten, die Verwendung von Polymeren und die Herstellung der Gehäuseteile mittels Abformung erlauben eine preisgünstige Produktion von Sensoren in großen Stückzahlen. Der in dieser Arbeit entwickelte Durchflusssensor besitzt die äußeren Abmaße von $5.5 \times 4.5 \times 1.2 \text{ mm}^3$. Dies ergibt bei einer optimalen Anordnung der Funktionselemente auf einer Nutzfläche von $80 \times 80 \text{ mm}^2$ eine Sensorausbeute von 150 Stück pro Doppelnutzen. Unter Verwendung der in diesem Kapitel beschriebenen, industriell geeigneten Prozessschritte ergibt sich ein Herstellungspreis von unter 4 € (Euro) pro Sensor (ohne fluidische und elektrische Kontaktierung). Hinzu kommt, dass in Abhängigkeit von der Sensorgröße die Anzahl der auf einem Nutzen angeordneten Komponenten erhöht werden kann. Der eigentlich maßgebende Teil des Durchflusssensors ist der Fluidkanal. Dabei ist auch nur dessen Breite und Tiefe, nicht jedoch seine Länge maßgebend. Daraus folgt, dass die Grundfläche des Sensors weiter verkleinert werden kann, so dass eine größere Anzahl von Sensoren pro Nutzen produzierbar ist. Bei der Verwendung von größeren, in der Industrie bereits verwendeten Substraten kann die Anzahl pro Nutzen und somit der Preis nochmals erheblich reduziert werden. Jedoch müssen preisgünstige Methoden der elektrischen und fluidischen Kontaktierung gefunden werden. Dabei können die fluidischen Anschlüsse z. B. über eine weitere abgeformte Platte, welche bereits Kanülen enthält, realisiert werden. Diese Platte wird mittels Kammerklebtechnik mit dem Gehäusenutzen verbunden.

Die Kostenreduktion des Durchflusssensors ist daher noch lange nicht abgeschlossen. Jedoch ist der bereits erreichte Herstellungspreis von unter 4 € derart niedrig, dass dieser Sensor als Einweg-Artikel eingesetzt werden kann.

5 Charakterisierung der Sensoren

Für die Charakterisierung der Sensoren wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt. Dabei wurden sowohl statische als auch dynamische Messungen zur Bestimmung der Sensorkennlinie, -auflösung und des Ansprechverhaltens durchgeführt. Die dabei verwendete Elektronik wird in Unterkapitel 5.1.3 vorgestellt. Darüber hinaus wurde die Temperatur- und Druckabhängigkeit des Sensors untersucht. Zur Bestimmung der Temperaturverteilung auf der Leiterbahn und ihrer Umgebung wurden Wärmebildaufnahmen mit einer Infrarotkamera aufgezeichnet. Die Ergebnisse wurden mit einer Simulation nach der FEM-Methode verglichen. Zur Auswertung werden die Kenndaten des Sensors zusammengefasst und es wird aufgezeigt, in wie weit der Sensor die an ihn gestellten Anforderungen (vergleiche Tabelle 1-1) erfüllt. Abschließend wird ein Vergleich mit bereits existierenden Durchflusssensoren durchgeführt.

5.1 Messaufbauten

Zur Charakterisierung der Sensoren mussten verschiedene Messanordnungen aufgebaut werden. In den Unterkapiteln 5.1.1 und 5.1.2 werden die Messaufbauten für Stickstoff- und Wasseranwendungen beschrieben.

5.1.1 Messaufbau für Stickstoffanwendungen

Der Messaufbau für die Tests mit Stickstoff im stationären Zustand ist in Abbildung 5-1 schematisch dargestellt. Aus einer Gasflasche (1a) wird das System mit Stickstoff versorgt, dessen Eingangsdruck p_i mit einem Druckminderer (1b) fest eingestellt und mit einem Drucksensor (1c) ermittelt wird. Der Umgebungsdruck wird als p_e bezeichnet. Der Gasfluss durch den Mikrosensor (1d) wird zu dessen Kalibrierung mit einem kommerziell erhältlichen makroskopischen Durchflussmesser (1e) der Fa. MKS Electronics bestimmt. Die Ansprechzeit des MKS-Sensors beträgt 500ms. Der Mikrosensor (1d) wird über die Elektronik (1f) mit Strom versorgt. Die Elektronikschaltung (1f) regelt den Strom, so dass die einstellbare Temperaturdifferenz zwischen Leiterbahn und Stickstoff während des Betriebs konstant bleibt. Für eine erste Testreihe bestand die Elektronik aus einer Wheatstone'schen Brückenschaltung. Danach wurde eine neu entwickelte, im Pulsbetrieb arbeitende, Messschaltung verwendet. Die erhaltenen Messwerte wurden mit Hilfe eines Oszilloskops (1g) graphisch dargestellt. Die nachfolgend verwendete Kenngröße Volumenstrom wird in Standardkubikzentimeter (sccm) angegeben. Ein Standardkubikzentimeter ist ein Kubikzentimeter mit Gas, unter Normbedingungen gefüllt (20°C/ 1023 hPa).

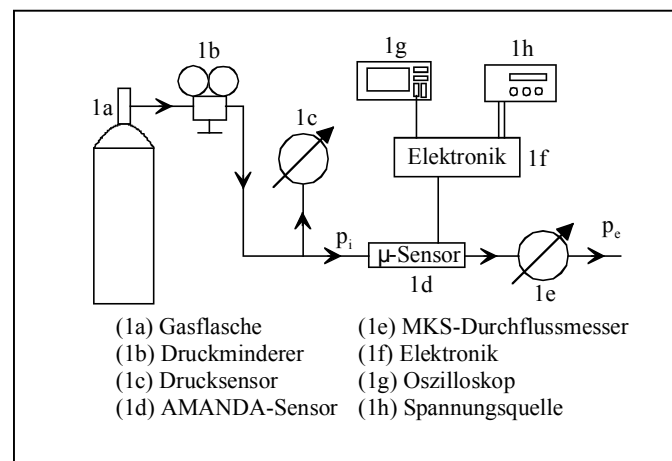


Abbildung 5-1 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für statische Messungen mit Stickstoff.

Zur Ermittlung der Ansprechzeiten des Mikrodurchflusssensors (2a) wurde eine Wheatstone'sche Brückenschaltung (2b) verwendet (siehe Abbildung 5-2). Die Brücke wurde mit der Sensorleiterbahn und drei fest eingestellten Widerständen betrieben. Eine Konstantstromquelle (2c) versorgt die Schaltung mit einem definierten Strom. Eine Gasflasche (2d) mit Druckminderer (2e) versorgt das System mit Stickstoff. Vor den Mikrosensor (2a) wird ein Mikroventil (2f) gesetzt, welches über die Ansteuerung (2g) geschaltet wird. Das verwendete Mikroventil (2f) wurde am Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt und besitzt Öffnungs- bzw. Schließzeiten von unter zwei Millisekunden [Rogg01].

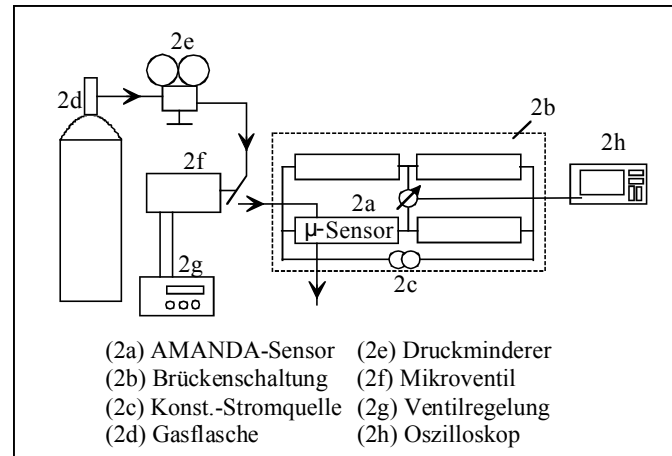


Abbildung 5-2 Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für dynamische Messungen mit Stickstoff.

5.1.2 Messaufbau für Anwendungen mit Wasser

Der Messaufbau für die Versuche mit Wasser wird in Abbildung 5-3 schematisch dargestellt. Aus einer Mikroliterspritze (3a) wird das System mit Wasser versorgt. Diese Spritze wird fest eingespannt und von einem Linear-Schrittmotor (3b) der Fa. Razel S.I. angetrieben. Das zu fördernde Volumen kann über die Größenwahl des Spritzenquerschnitts eingestellt werden. Über eine vom Hersteller mitgelieferte Tabelle kann, bei einem bestimmten Spritzenquer-

schnitt und Motorvorschub, der Durchfluss abgelesen werden. Der eingestellte Durchfluss wurde zusätzlich mit Hilfe des Wägeverfahrens überprüft. Das durch den Mikrosensor (3d) geflossene Wasser wurde auf eine Waage (3c) mit einer Auflösung von 0,1 Milligramm geleitet und seine Masse über den Zeitraum der Messung bestimmt. Der Mikrosensor (3d) wird über eine Messelektronik (3e) mit Strom versorgt. Es wurde wieder das Prinzip der während des Betriebs konstanten Temperaturdifferenz zwischen Leiterbahn und Wasser angewandt. Für die Messungen mit Wasser wurde die im Pulsbetrieb arbeitenden Schaltung von Anfang an, d.h. bereits für die ersten Tests (3e), verwendet. Die erhaltenen Messwerte werden mit Hilfe eines Oszilloskops (3f) graphisch dargestellt.

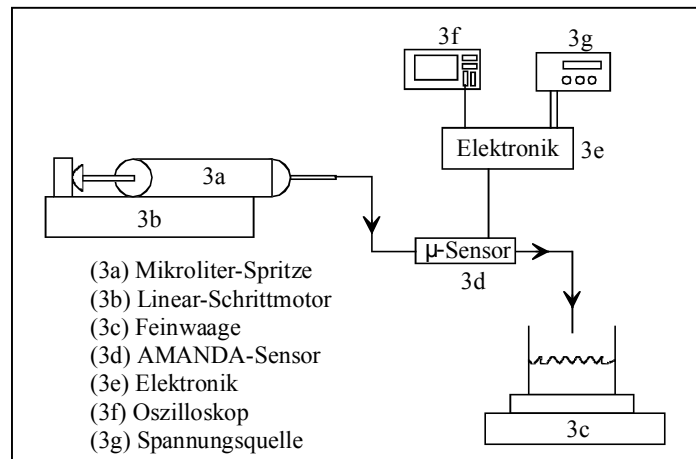


Abbildung 5-3: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus für statische und dynamische Messungen mit Wasser.

5.1.3 Messelektronik

5.1.3.1 Anemometer-Brückenschaltung

Nach Gleichung 3-24 und Gleichung 3-28 ist die vom Funktionselement an das Medium abgegebene Leistung $I^2 \cdot R_S$ zu messen. Dazu wurde in einer ersten Testreihe eine, in der thermischen Durchflussmesstechnik häufig verwendete, Widerstandsbrückenschaltung eingesetzt. Bei dieser sog. Konstant-Temperatur-Anemometerschaltung werden die Sondentemperatur d.h. der Sondenwiderstand R_S oberhalb der Mediumtemperatur konstant gehalten [Fied92]. Abbildung 5-4 zeigt die schematische Messanordnung, in der die Brückenschaltung und ein Differenzverstärker zu einem Regelkreis verbunden sind. Dabei sind R_S der Leiterbahnwiderstand, der zur Strömungsgeschwindigkeitsmessung und R_T der Widerstand, der zur Temperaturmessung verwendet wird. R_1 und R_2 sind feste Vergleichswiderstände und R_3 ein einstellbarer, zum Brückenabgleich notwendiger Widerstand. Durch eine einsetzende Strömung wird der Sonde Wärme entzogen; dies bewirkt eine veränderte Temperatur an R_S . Die daraus resultierende Änderung des ohmschen Widerstands R_S bewirkt eine Brückenverstimmung und somit eine Spannungsdifferenz am Eingang des Verstärkers. Dem Vorzeichen entsprechend verringert oder erhöht sich am Ausgang des Verstärkers die Brückenspeisespannung U , d.h. der Speisestrom I_1 , der für die Erwärmung der Sonde verantwortlich ist wird nachgeregelt, bis die Brücke wieder auf Null abgeglichen ist. Auf diese Weise bleibt die Sondentemperatur, d.h. der Sondenwiderstand auf einem konstanten Wert. Somit kompensiert der Regelkreis die

durch die Strömung verursachte Abkühlung der Leiterbahn. Die Brückenspeisespannung ist proportional zum Speisestrom und ein Maß für die Strömungsgeschwindigkeit.

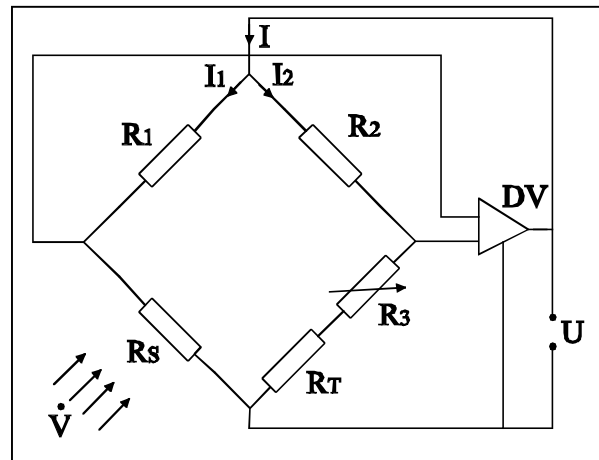


Abbildung 5-4: Schematische Darstellung der Konstant-Temperatur-Anemometerschaltung.

Um Änderungen der Mediumtemperatur während des Betriebs zu kompensieren, wird eine unsymmetrische Brücke verwendet (vergleiche Gleichung 4-5 bis Gleichung 4-7). Dadurch wird der Strom I_1 im linken Brückenweig sehr viel größer als der Strom I_2 . Der Sondenstrom I_1 dient dabei zur Erwärmung des Widerstands R_S . Der durch die zur Temperaturmessung verwendete Leiterbahn R_T fließende Strom I_2 erwärmt diese idealerweise nicht, so dass der Widerstand die Mediumtemperatur annimmt. Da die Fluidtemperatur auf beide Brückenweige einwirkt, werden durch diese Maßnahme messwertverfälschende Temperaturschwankungen im Fluid nahezu kompensiert.

5.1.3.2 Verwendung einer Wheatstone'schen Brückenschaltung zur Bestimmung des Ansprechverhaltens

Für die Untersuchung von stationären Strömungen muss der Sensor Schwankungen in der Strömungsgeschwindigkeit schnell genug folgen können. Zur Bestimmung der Ansprechzeit wurden, unter Verwendung des in Abbildung 5-2 gezeigten Messaufbaus, dynamische Untersuchungen durchgeführt. Als Messschaltung wurde eine Wheatstone'sche Brückenschaltung verwendet. Diese besteht aus dem Sondenwiderstand und drei fest eingestellten Vergleichswiderständen. Die Brücke wurde von einer Konstant-Stromquelle gespeist. Die aufgrund der Strömung einsetzende Brückenverstimmung wurde verstärkt und als Maß für die Ansprechzeiten verwendet. In Abbildung 5-5 sind das aufgenommene Ansteuersignal des Mikroventils (2f) und die verstärkte Brückenspannung dargestellt. Das Ventil wurde mit 40 Hz getaktet. Ein niedriges Steuersignal bedeutet ein geschlossenes Ventil, ein hohes Signal ein geöffnetes Ventil. Nachdem das Ventil geöffnet ist, strömt das Fluid über den Sensor und das Brückensignal ändert sich. Die Ansprechzeit (t_{90} -Zeit) wird definiert als die Zeit, bis das Brückensignal 90% seines Maximalwertes erreicht hat. Aus den gewonnenen Messergebnissen konnte eine Ansprechzeit des Sensors von unter 2,5ms nachgewiesen werden.

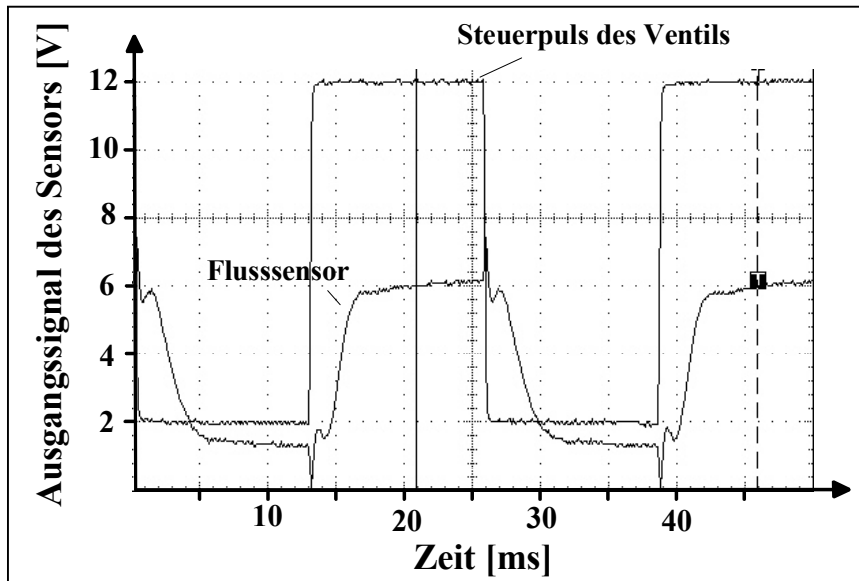


Abbildung 5-5: Charakteristische Kennlinie der Ansprechzeit des Sensors.

5.1.3.3 Puls-Verfahren im Konstant-Temperatur Modus

Aufgrund dieser sehr kurzen Ansprechzeiten konnte die Temperaturmessung und die Messung der Strömungsgeschwindigkeit mit einer Leiterbahn realisiert werden. Die dazu notwendige Elektronik wurde vom Institut für Prozessdatenverarbeitung und Elektronik (IPE) des Forschungszentrum Karlsruhe entwickelt.

Die Messschaltung arbeitet im Konstant-Temperatur Modus, d. h. es kann eine definierte Temperaturdifferenz zwischen Leiterbahn und Medium eingestellt werden. Die Schaltung beruht auf einem Pulsbetrieb, bei dem der Heizleiter durch einen Energiepuls auf die elektronisch eingestellte Temperatur gebracht und für eine festgelegte Zeit auf diesem Niveau gehalten wird. Danach wird der Puls abgeschaltet. Bevor der nächste Energiepuls eingespeist wird, hat sich der Leiter bereits abgekühlt und die Mediumtemperatur angenommen. Die Leiterbahn kann aus diesem Grund als Widerstandsthermometer, zur Bestimmung der Mediumtemperatur, verwendet werden. Abbildung 5-6 zeigt die Funktionsweise des Puls-Verfahrens. Aufgetragen über der Zeitachse sind untereinander der Takt, der zwischen Geschwindigkeits- und Temperaturmessung umschaltet, der Strom I_S , der in den Leiter geführt wird und das Spannungssignal U_T , das ein Maß für die Mediumtemperatur ist. Der Strom I_S ist für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten, wobei $C_1 > C_2$ ist, dargestellt.

Die Strömungsgeschwindigkeit wird während der in Abbildung 5-6 mit t_F gekennzeichneten Zeit bestimmt. Die Leiterbahn wird dabei durch Anlegen einer konstanten Spannung erwärmt. Daraufhin erhöht sich der Ohmsche Widerstand der Leiterbahn, bis er die vorher eingestellte Widerstandsdifferenz (Temperaturdifferenz) erreicht hat. Im gleichen Maß, wie sich der Widerstand erhöht, wird der Leiterbahnstrom I_S abgesenkt, wie es in Abbildung 5-6 für verschiedene Strömungsgeschwindigkeiten dargestellt ist. Dabei muss, um die gewählte Temperaturdifferenz zu erreichen, um so mehr Strom nachgeführt werden, je mehr das strömende Medium die Leiterbahn abkühlt, d.h. je höher die Strömungsgeschwindigkeit ist. Während der Zeit t_F stellt sich der stationäre Zustand ein, d.h. alle den Messwert beeinflussenden Größen sind

zeitunabhängig. Dieser die aktuelle Strömungsgeschwindigkeit repräsentierende Wert kann gespeichert werden.

Zur Temperaturbestimmung wird die Leiterbahn während der in Abbildung 5-6 mit t_T gekennzeichneten Zeit mit einem sehr kleinen Strom gespeist (vergleichbar mit dem Strom I_2 der Brückenschaltung in Abbildung 5-4). Dadurch kühlt sich der Leiter bis auf die Mediumtemperatur ab; sein Widerstand- bzw. über ihm abfallende Spannungswert U_T wird zum Ende der Zeit t_T aufgenommen. Die Strömungsmessung kann, aufgrund der gemessenen Ansprechzeiten, nach 2,5 ms und die Temperaturmessung nach weiteren 2,5 ms erfolgen.

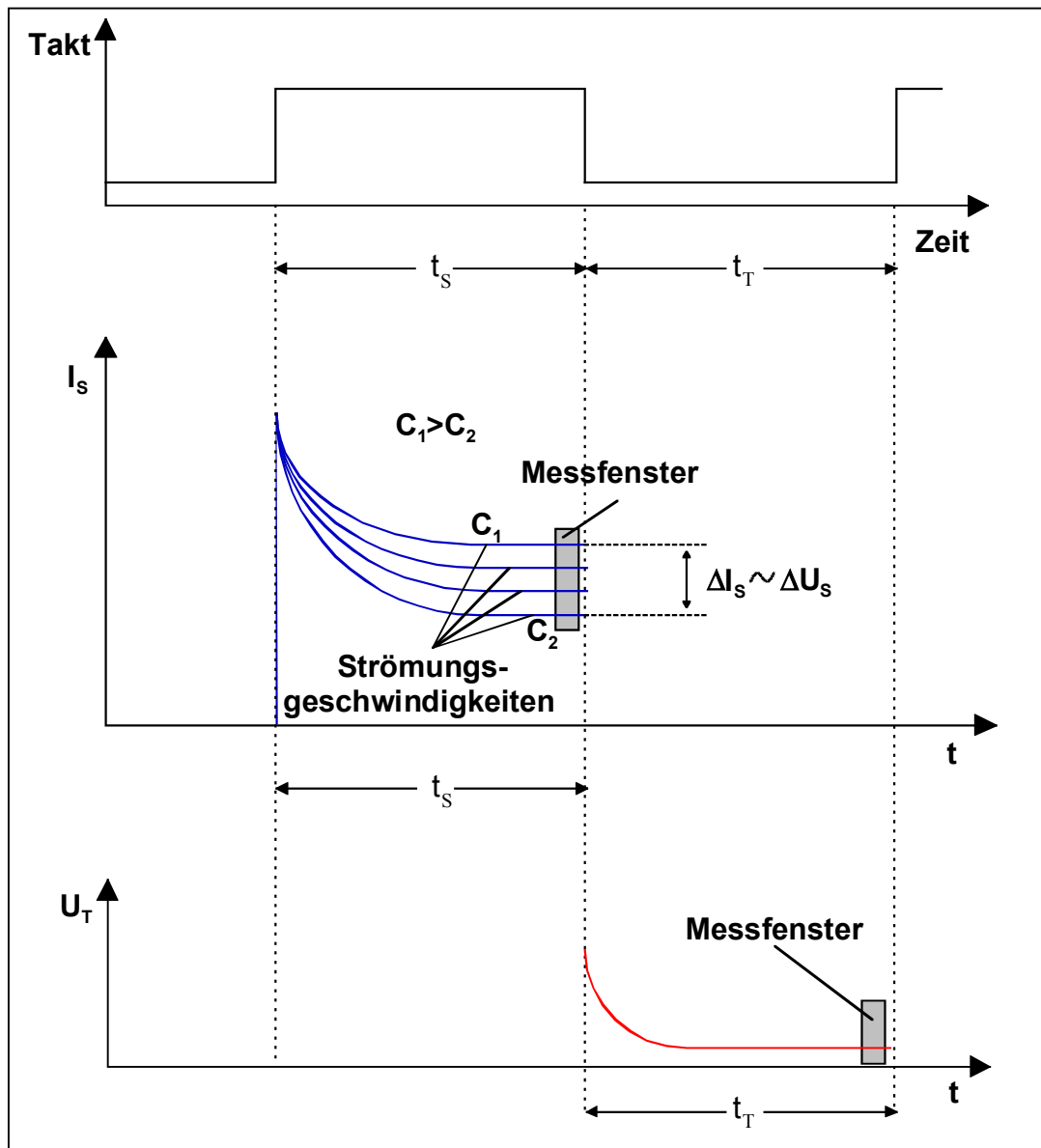


Abbildung 5-6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Puls-Verfahrens.

Ändert sich die Mediumtemperatur im Sensorbetrieb, wird dies während der Temperaturmessung erkannt. Eine mögliche Temperaturdifferenz dient als Offsetkompensation für die anschließende Geschwindigkeitsmessung. Dies wird schaltungsintern über die Regelung des Sondenstroms berücksichtigt, so dass das Messsignal unabhängig von der Mediumtemperatur

ist. Die vorher eingestellte Temperaturdifferenz zwischen Leiterbahn und Medium wird während dieses Vorgangs nicht verändert.

Durch den Betrieb des Sensor im Puls-Verfahren ergab sich der in Abbildung 5-6 mitte mit ΔI_S gekennzeichnete Bereich. Dieser, aufgrund von verschiedenen Strömungsgeschwindigkeiten entstandene Strombereich wird elektronisch gemessen und in einen dazu proportionalen Spannungsbereich ΔU_S umgewandelt. ΔU_S wird für die in Kapitel 5.2 folgende Charakterisierung bzw. Ermittlung der statischen Sensorkennlinien genutzt.

Die Vorteile des hier vorgestellten Puls-Verfahrens sind die direkte Messung bzw. Anzeige der Mediumtemperatur und die nicht notwendige thermische Entkopplung von zwei verschiedenen Leiterbahnen. Der größte Vorteil liegt jedoch in der Verwendung nur noch einer Leiterbahn. Aus diesem Grund wird der benötigte Platz im Strömungskanal geringer, so dass der Sensorträgerkörper und dadurch der gesamte Sensor kleiner gebaut werden kann; dies führt zu einer Kostenreduzierung.

Zur Zeit wird die Sensorelektronik unter Laborbedingungen betrieben. Im nächsten Entwicklungsschritt soll die Elektronik, wie in heutigen Messsystemen üblich, über einen Mikrokontroller gesteuert werden. Dieser kann bei eventuellen Eingaben, z. B. Art des Messfluid, max. Temperaturerhöhung, die entsprechenden Kalibrierkurven aktivieren. Ein weiterer wichtiger Baustein ist die für verschiedene Anwendungen benötigte Schnittstelle zwischen Mikrokontroller und einem PC. Die Energieversorgung durch ein Netzteil oder eine Batterie und eine entsprechende Messwertanzeige sind selbstverständlich, so dass ein komplettes Durchflusssystem wie es in Abbildung 5-7 schematisch dargestellt ist, entsteht.

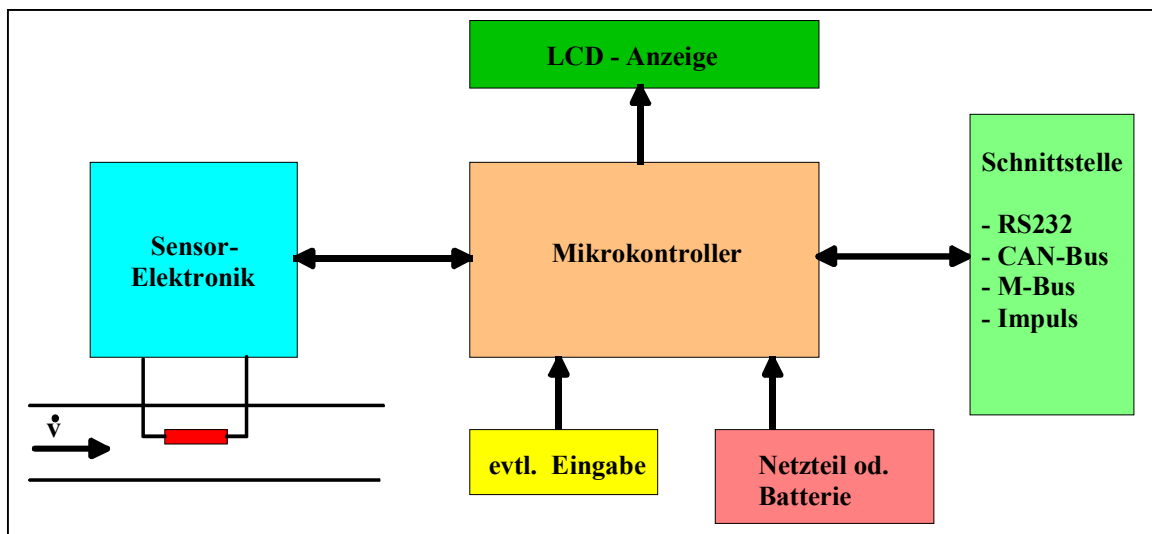


Abbildung 5-7: Blockschaftbild eines kompletten Durchflusssystems.

5.2 Sensorkennlinien

Für die Charakterisierung der Sensoren wurden statische Messungen mit Wasser und Stickstoff zur Bestimmung der Sensorkennlinie und -auflösung durchgeführt. In Abbildung 5-8 ist die Kennlinie für Messungen mit Stickstoff gezeigt. Hierbei ist das Sensorausgangssignal (in Abbildung 5-6 mit ΔU_S gekennzeichnet und für die Darstellung der folgenden Kennlinien für einen Durchfluss von 0sccm auf 0V festgelegt) als Funktion des Volumenstroms dargestellt. Der Kanalquerschnitt dieses Sensors beträgt $390 \times 240 \mu\text{m}^2$. Die Pulsschaltung wurde so eingestellt, dass eine konstante Übertemperatur von 45°C zwischen Leiterbahn und Medium vorhanden war. Der verwendete Stickstoff hatte sich beim Eintritt in den Sensor bis auf Raumtemperatur erwärmt. Bei dieser Mediumtemperatur besaß die Sensor-Leiterbahn einen elektrischen Widerstand von 800Ω . Die hier eingestellten Parameter gelten für alle folgenden Versuche im Stickstoffbetrieb.

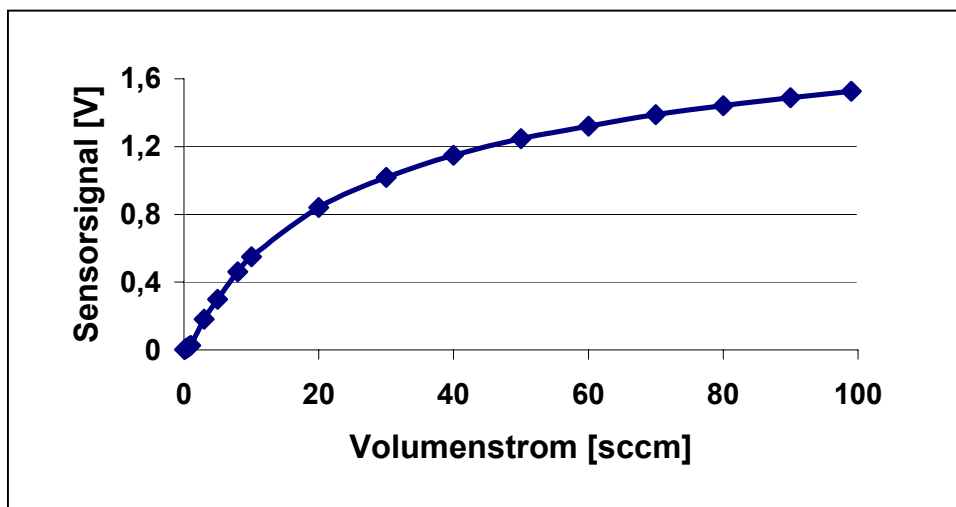


Abbildung 5-8: Sensorkennlinie für Stickstoff bei einem Kanalquerschnitt von $390 \times 240 \mu\text{m}^2$.

Im Vergleich zur obigen Abbildung wird in Abbildung 5-9 eine Sensorkennlinie für Wasser mit identischem Querschnitt gezeigt.

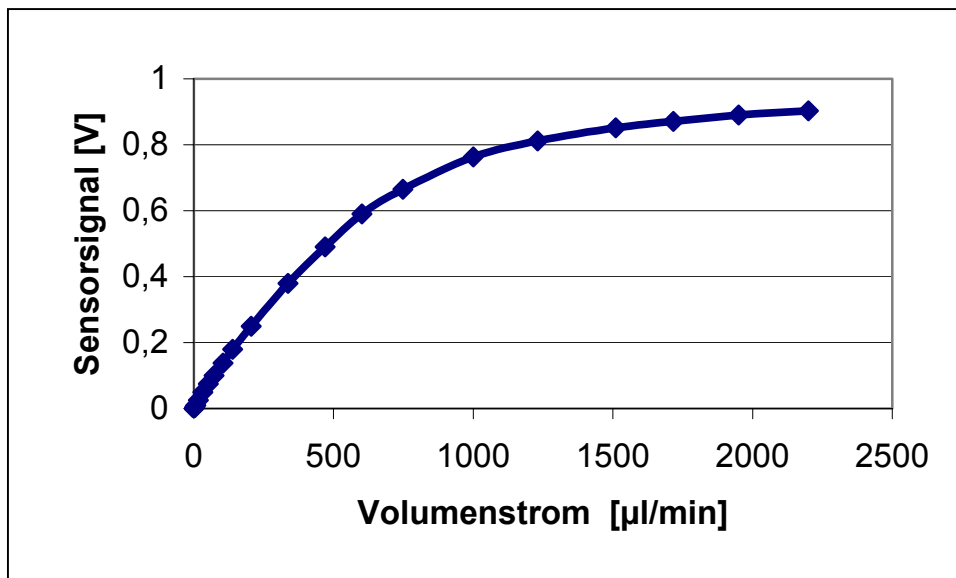


Abbildung 5-9: Sensorkennlinie für Wasser bei einem Kanalquerschnitt von $390 \times 240 \mu\text{m}^2$.

Die in Abbildung 5-8 und Abbildung 5-9 gezeigten Kennlinienverläufe spiegeln unter Berücksichtigung von Gleichung 2-7, die in Gleichung 3-29 dargestellte King'sche Beziehung wieder. Die Charakteristik zeigt weiter, dass für kleiner werdende Volumenströme die Empfindlichkeit zunimmt. In Abbildung 5-10 ist die schon in Abbildung 5-8 gezeigte Kennlinie im Bereich von 0 bis 1 sccm dargestellt. Daraus ist ein minimaler Volumenstrom von 0,1 sccm abzulesen. Bei einer (sinnvollen) Wahl der Dynamik von 100 besitzt dieser Sensor, bei einer Übertemperatur von 45°C, somit einen Messbereich von 0,1-10 sccm. Die dazu gehörigen mittleren Strömungsgeschwindigkeiten liegen zwischen 0,017 m/s und 1,7 m/s. Bei gleichzeitigem Erhalt der Strömungsgeschwindigkeiten, können nun über die Variation des Kanalquerschnitts, die verschiedenen Volumenstrommessbereiche eingestellt werden (vergleiche Gleichung 2-7). Das Sensorelement muss demnach Strömungsgeschwindigkeiten von max. 1,7 m/s aushalten. Eine Zerstörung der einseitig aufgehängten Membran wurde bei den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt. Wie bereits erwähnt, werden mit dem zur Zeit verwendeten Formeinsatz Durchflusssensoren mit einem Kanalquerschnitt von minimal 45x100 μm² bis maximal 500x240 μm² hergestellt. Aus diesem Grund kann der Messbereich sowohl erhöht als auch weiter vermindert werden. Erhöhte Volumenstrombereiche können unter Verwendung vergrößerter Kanalquerschnitte beliebig detektiert werden. Ein Volumenstrom von maximal 1000 sccm wurde mit den in dieser Arbeit verwendeten Kanälen detektiert. Eine Verkleinerung der vorhandenen Kanäle ist jedoch aufgrund einer möglichen Verstopfungsgefahr durch Partikel im Fluid nicht sinnvoll.

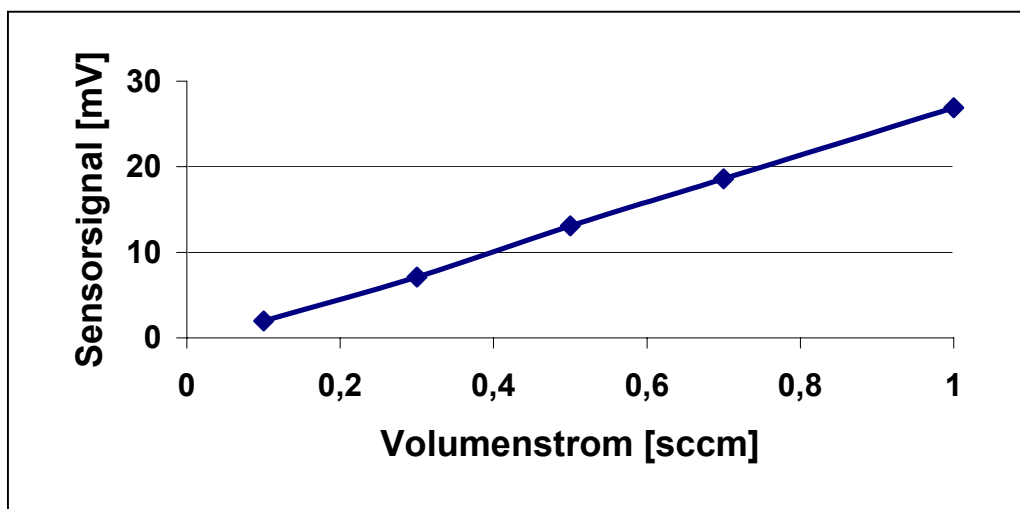


Abbildung 5-10: Sensorauflösung für Stickstoff bei einem Kanalquerschnitt von 390x240 μm² und einer Übertemperatur von 45°C im minimalen Strömungsbereich.

Die Empfindlichkeit der Sensoren kann durch mehrere Parameter beeinflusst werden. Sie kann z. B. über die Erhöhung der Übertemperatur, wie es in Abbildung 5-11 gezeigt ist, verbessert werden. Hierbei stellt sich bei einer größeren Temperaturdifferenz zwischen Fluid und Sensorelement eine größere Widerstandsdifferenz der Leiterbahn und somit ein höheres Ausgangssignal ein. Die Vergrößerung des Leiterbahnwiderstandes ist eine weitere Möglichkeit, die Empfindlichkeit zu erhöhen, da auf diese Weise das Ausgangssignal des Sensors erhöht wird. Jedoch benötigt eine Leiterbahn mit einem höheren elektrischen Widerstand eine höhere elektrische Energie, damit sie eine bestimmte Temperaturdifferenz erreichen kann. In der Praxis erwies es sich deshalb als vorteilhaft, Leiterbahnen mit einem Ohmschen Widerstand zwischen 500-1000 Ω für die Strömungsmessung zu verwenden.

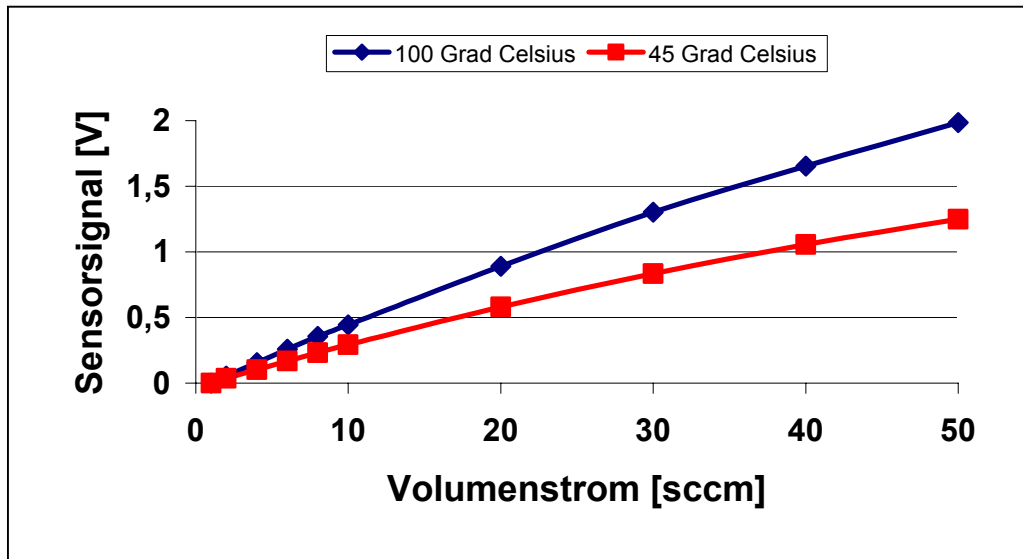


Abbildung 5-11: Sensorkennlinien für Stickstoff bei verschiedenen Übertemperaturen und einem Kanalquerschnitt von $390 \times 240 \mu\text{m}^2$.

In den Bereichen der Biomedizin bzw. der Mikrodosierteknik ist es notwendig, kleinste Mengen von Flüssigkeiten zu detektieren. Eine Sensorkennlinie für Volumenströme im Mikroliterbereich ist in Abbildung 5-12 gezeigt. Dargestellt ist das Sensorausgangssignal als Funktion des Volumenstroms für den Betrieb mit Wasser. Die Sensorleiterbahn besitzt einen elektrischen Widerstand von 700Ω , der Kanalquerschnitt beträgt $290 \times 240 \mu\text{m}^2$. Die Wassertemperatur im Sensor wurde, mit Hilfe der im Pulsbetrieb arbeitenden Elektronik, mit 20°C gemessen. Da für verschiedene medizintechnische Anwendungen nur kleine Übertemperaturen erlaubt sind, wurde eine Temperaturerhöhung der Leiterbahn gegenüber dem Medium von nur 6°C eingestellt.

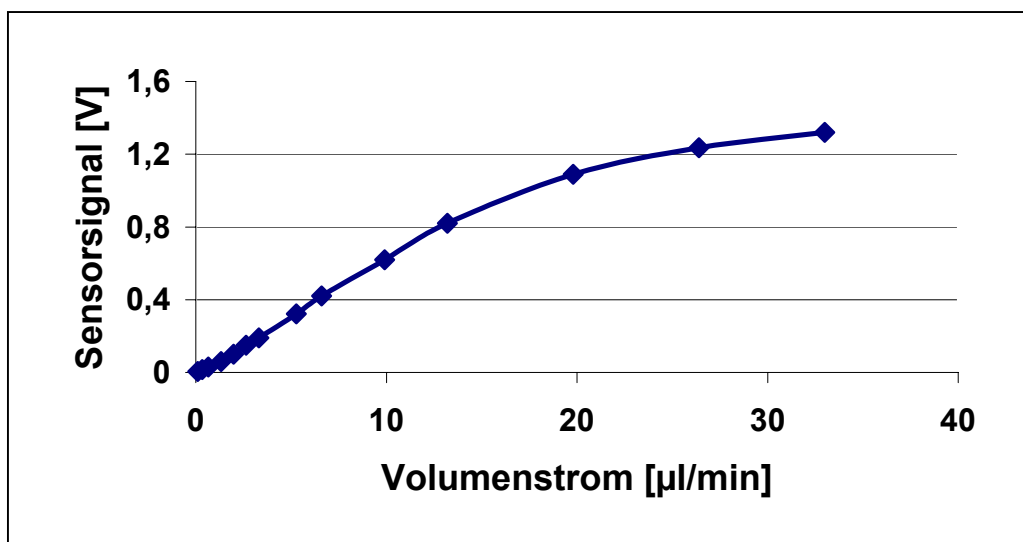


Abbildung 5-12: Sensorkennlinie für Wasser bei einem Kanalquerschnitt von $290 \times 240 \mu\text{m}^2$ und einer Übertemperatur von 6°C .

In Abbildung 5-13 ist die in Abbildung 5-12 bereits vorgestellte Sensorkennlinie im Bereich von 0 bis $1,4 \mu\text{l}/\text{min}$ dargestellt. Mit den eingestellten Sensorparametern ergibt sich für ein

Ausgangssignal von 7mV ein minimaler Volumenstrom von $0,1\mu\text{l}/\text{min}$. Durch die Wahl der Sensordynamik von 100 stellt sich ein Durchflussmessbereich von $0,1\text{-}10\mu\text{l}/\text{min}$ ein. Die in diesem Bereich korrespondierenden mittleren Strömungsgeschwindigkeiten sind von $2,4\cdot 10^{-5}\text{ m/s}$ bis $2,4\cdot 10^{-3}\text{ m/s}$. Durch geeignete Anpassung des Kanalquerschnitts können bei einer konstanten Annahme der Strömungsgeschwindigkeiten, wie im vorherigen Beispiel, sowohl größere als auch noch kleinere Volumenstrombereiche eingestellt werden. Mit den in dieser Arbeit verwendeten Kanälen wurde ein maximaler Volumenstrom von $2200\mu\text{l}/\text{min}$ aufgenommen.

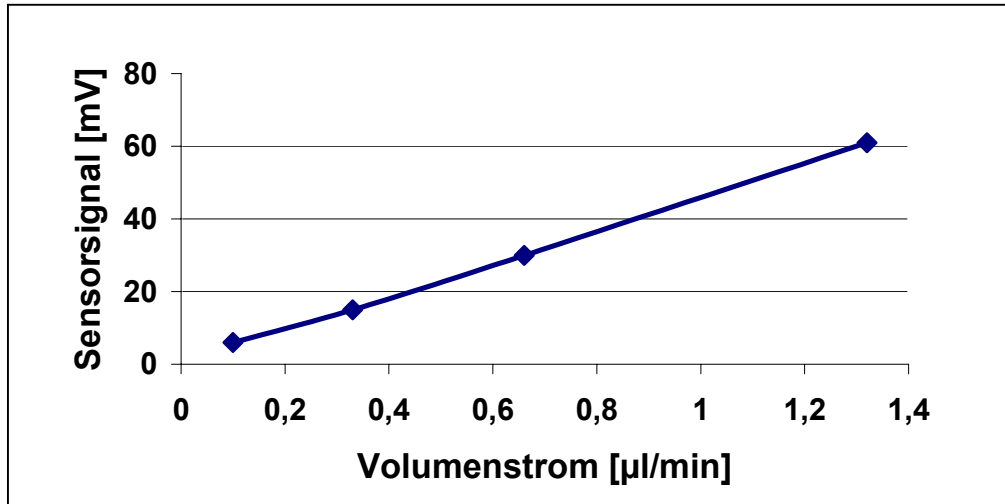


Abbildung 5-13: Sensorauflösung für Wasser bei einem Kanalquerschnitt von $290\times 240\mu\text{m}^2$ und einer Übertemperatur von 6°C .

In weiteren Versuchen wurde die Querempfindlichkeit des Sensors auf Änderungen der Temperatur und des Druckes untersucht. Für die Temperaturtests wurden Teile des Messaufbaus aus Abbildung 5-1 in einen Klimaschrank betrieben. Dabei wurden der Sensor und das zu messende Medium auf verschiedene Temperaturen aufgeheizt und statische Kennlinien aufgenommen. Die gemessenen Kurven bei 20 , 40 und 60°C sind in Abbildung 5-14 dargestellt und werden durch eine Kennlinie, die außerhalb des Klimaschranks bei Raumtemperatur (25°C) aufgenommen wurde, ergänzt. Aus Vergleichsgründen sind die eingestellten Parameter wieder identisch mit denen aus Abbildung 5-8.

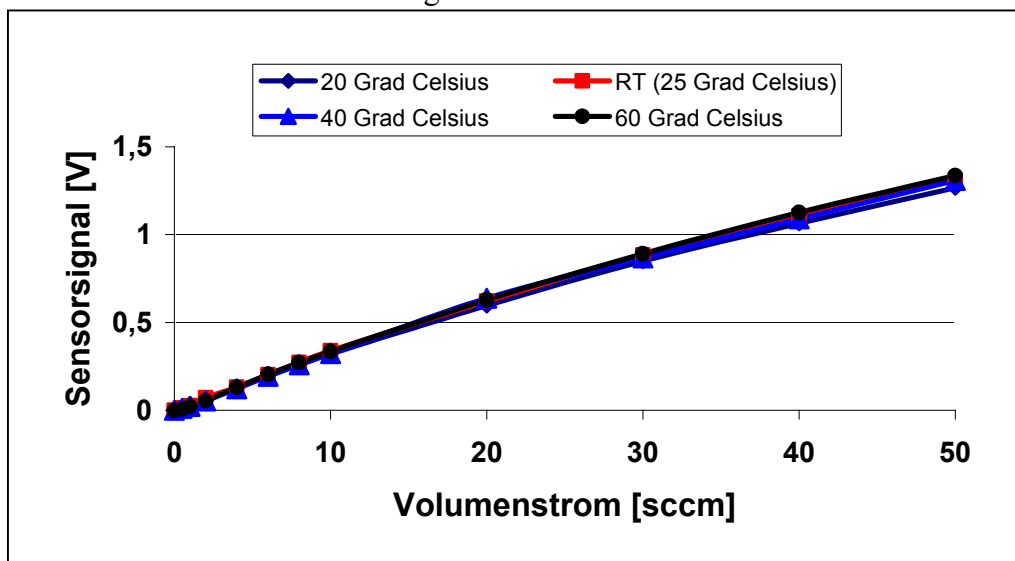


Abbildung 5-14: Sensorkennlinien bei verschiedenen Mediumtemperaturen (Übertemperatur = 45°C / Kanalquerschnitt = $390\times 240\mu\text{m}^2$).

Die in Abbildung 5-14 dargestellten Kurven besitzen eine maximale Differenz von weniger als drei Prozent. Somit konnte die angestrebte Temperaturkompensation, die durch das Sensordesign und die Messelektronik nach dem Puls-Verfahren angestrebt wurde, nachgewiesen werden.

In einer nächsten Testreihe wurde die Druckabhängigkeit des Sensors im Stickstoff-Betrieb untersucht. Dafür wurde der in Abbildung 5-1 mit p_i gekennzeichnete Druck in zwei 100mbar-Schritten von 300 auf 500 mbar erhöht. Abbildung 5-15 zeigt das Ergebnis. Zu sehen sind die Sensorausgangsspannung als Funktion des Volumenstroms bei verschiedenen Drücken p_i . Es ist zu erkennen, dass sich mit ansteigendem Druck der Absolutwert des Ausgangssignals vermindert. Dieses Ergebnis ist mit Gleichung 3-32 bis Gleichung 3-40, d.h. der Änderung im Wärmeübergang zwischen Sonde und Fluid durch die Verringerung der Strömungsgeschwindigkeit aufgrund des ansteigenden Drucks zu erklären.

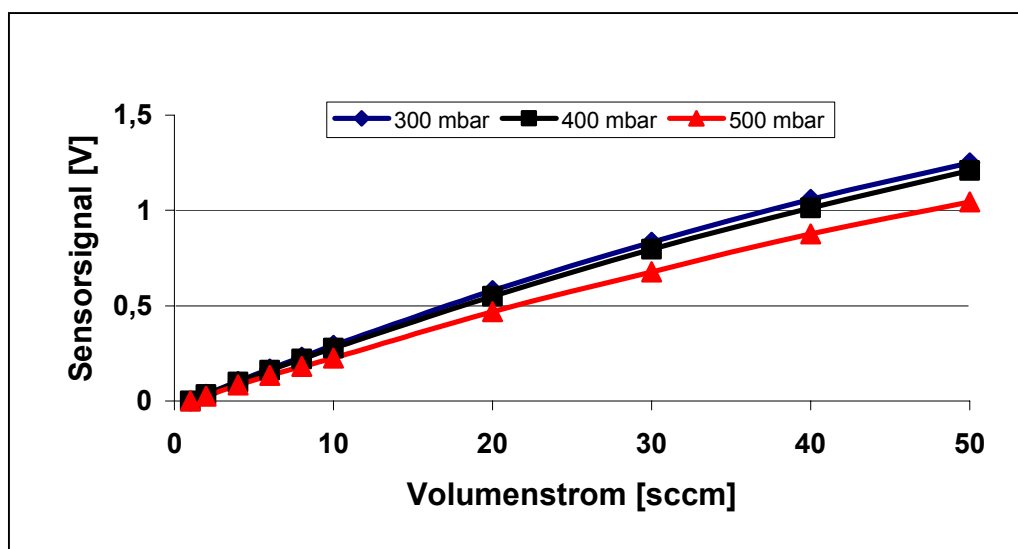


Abbildung 5-15: Sensorkennlinien bei verschiedenen Eingangsdrücken p_i bei einer Übertemperatur von 45°C und einem Kanalquerschnitt von $390 \times 240 \mu\text{m}^2$.

Die bei der Verwendung von kompressiblen Medien auftretende Druckabhängigkeit des Messsignals ist ein nicht unbedingt wünschenswerter Effekt. Dieses Problem könnte ein modifizierter, nach dem kalorimetrischen Prinzip arbeitender Sensoraufbau lösen, bei dem mehrere Heiz- und Temperaturelemente auf dem Trägerkörper aufgebracht sind. Der Sensor erwärmt dabei wieder das Medium auf eine konstanten Temperatur und der sich einstellende Wärmestrom ist ein von Druckänderungen unabhängiges Maß für den Massenstrom (vergleiche Gleichung 2-6). Mit den in dieser Arbeit gewonnenen Kenntnissen ist der Aufbau eines thermischen Massenstrommessers mit mehreren Leiterbahnen auf dünnen Membranen ohne weiteres möglich. In Anhang 8.3 sind die Funktionsweise und verschiedene Aufbauten eines nach dem kalorimetrischen Prinzip arbeitenden Sensors dargestellt. Die Wirksamkeit dieser Sensoren wurde bereits über einige Funktionsmuster, mit denen Wärmebilder aufgenommen wurden, (siehe Anhang 8.3) nachgewiesen.

5.3 Energiebedarf des Sensors

In Kapitel 5.2 wurden die charakteristischen Kennlinien des Sensors vorgestellt. Dafür wurden unter anderem Tests mit Wasser als zu detektierendem Medium durchgeführt. Der zu diesem Zweck verwendete Sensor besaß bei einer Temperatur von 20°C einen elektrischen Widerstand von 700Ω. Die Leiterbahn wurde auf eine Übertemperatur von $\Delta T=6^\circ\text{C}$ gegenüber dem Medium erwärmt. Die dazu benötigte Heizspannung wurde bei aussetzender Strömung mit 5V gemessen. Damit ergibt sich die Leistungsaufnahme des Sensorelements zu 35mW. Durch eine energiesparende Wahl der Heiz- und Abkühlzeiten (z.B. $t_S/t_T=1:3$, vergleiche Abbildung 5-6), kann ein Sensorbetrieb, an zwei in Reihe geschalteter Lithiumbatterien (Batteriewerte: 3V/ 1Ah), unter Berücksichtigung der oben aufgezeigten Werte und einer im „power-down“-Energiesparmodus arbeitenden Elektronik mit einem Stromverbrauch von 0,5mA im Mittel ca. 530 Stunden aufrecht erhalten werden.

5.4 Wärmebildaufnahmen und Simulation

Da die Temperaturverteilung unter Betriebsbedingungen über dem Sensorelement und im Strömungskanal nicht direkt gemessen werden kann, wurde diese anhand eines modifizierten, experimentell zugänglichen, Aufbaus mit Hilfe von Wärmebildaufnahmen ermittelt. Das Ziel dieser Versuche war es die gemessenen Temperaturverteilungen mit berechneten Werten zu vergleichen. Zusätzlich sollten durch diesen Vergleich dominierende Einflussgrößen aufgezeigt und ihre Werte ermittelt werden, so dass dadurch eine Simulation des Sensors unter Betriebsbedingungen ermöglicht werden sollte. Unter Betriebsbedingungen befindet sich das Sensorelement in der Mitte des Strömungskanals und wird komplett vom Medium umgeben (vergleiche Abbildung 4-2). Der für die Messung verwendete Aufbau wird nachfolgend beschrieben.

Da wegen einer zu hohen Wärmeabfuhr an der Kontaktstelle und der geringen Wärmekapazität der Strukturen an diesen eine Absoluttemperaturmessung über Thermoelemente nicht möglich ist, wurden Wärmebilder aufgenommen. Die Kenntnis der Temperaturverteilung auf der Membran während des Sensorbetriebs ist notwendig, um das Design und somit die Eigenschaften des Sensors verbessern zu können. Dafür wurde das Verfahren der Thermographie angewandt, bei dem die Wärmestrahlung über der Membran gemessen wird, ohne sie jedoch zu beeinflussen. Die abgestrahlte Wärme ist von der gesuchten Temperatur, dem bekannten Strahlungskoeffizienten und vom Wärmeabstrahlungskoeffizienten ϵ abhängig. Der Wärmeabstrahlungskoeffizienten gibt an, wie viel ein Körper im Vergleich zu einem idealen schwarzen Strahler an Wärme emittiert [Dubb95]. Da die Bestimmung des Wärmeabstrahlungskoeffizienten einer Membran mittels unterschiedlicher Verfärbungen an der Oberfläche nicht sinnvoll ist, wurde sie mit Graphitlack beschichtet. Dieser Lack besitzt annähernd den Wärmeabstrahlungskoeffizienten eines idealen schwarzen Strahlers ($\epsilon=1$). Die Wärmebildaufnahmen wurden im Institut für Materialforschung 1 des Forschungszentrum Karlsruhe mit einer Kamera, die eine optischen Auflösung von 70µm hat, aufgenommen. Abbildung 5-16 links zeigt die mit Graphitlack beschichtete Oberfläche des Sensors und Abbildung 5-16-rechts dessen Unterseite.

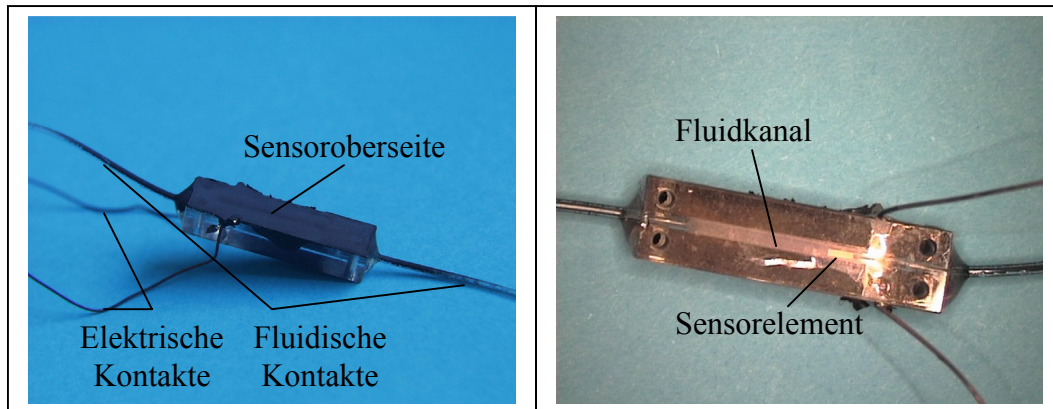


Abbildung 5-16: Sensor für Wärmebildaufnahmen; links: Sensoroberseite mit Graphitlack beschichtet. rechts: Sensor mit dem Fluidkanal und dem Sensorelement in der Unteransicht.

Zur exakten Temperaturbestimmung wurde die Abdeckung des Kanals, nicht wie üblich mit einem PSU-Gehäuse, sondern mit einer $2\mu\text{m}$ dünnen Membran vorgenommen. Für die quantitativen Betrachtungen der Temperaturverteilung im stationären Zustand auf der Membran wurden Aufnahmen bei verschiedenen Volumenströmen gemacht. Dafür wurde die Leiterbahn mit Hilfe eines konstanten Stroms erwärmt. In Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 sind Wärmebilder bei verschiedenen Volumenströmen von Wasser ($0\mu\text{l}/\text{min}$ und $5\mu\text{l}/\text{min}$) mit einem Heizstrom von 2mA dargestellt. Zur Überprüfung der Wärmebildaufnahmen wurde die Temperaturverteilung auf der Sensoroberfläche mit Hilfe einer FEM-Rechnung simuliert. Die Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 zeigen die berechneten Temperaturverteilungen mit den gleichen Parametern, die für die Wärmebildaufnahmen verwendeten wurden.

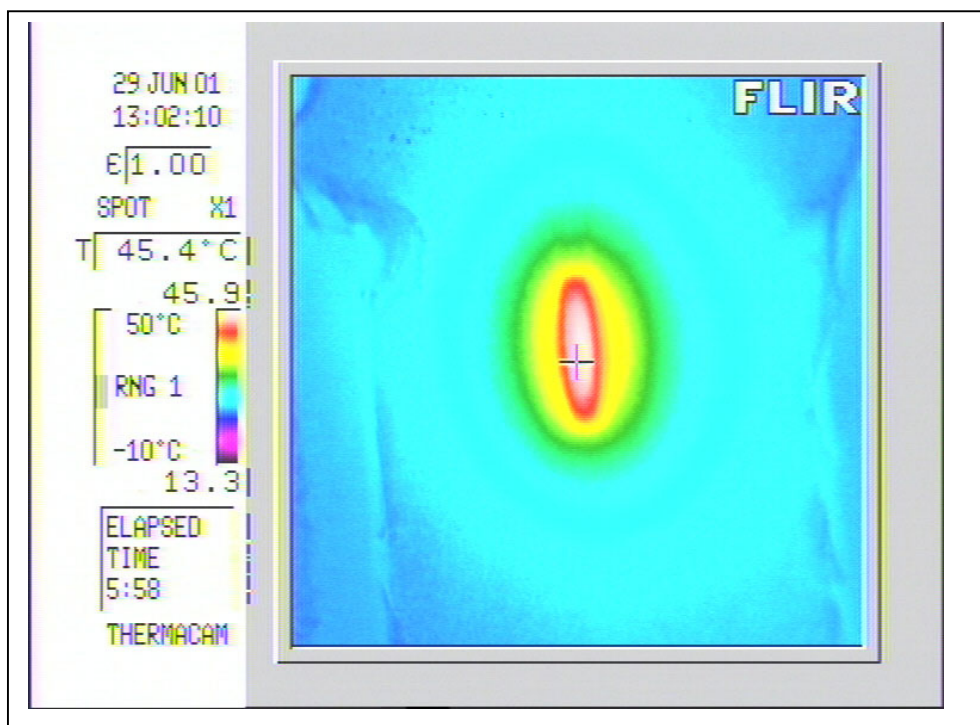


Abbildung 5-17: Wärmebildaufnahme von der Sensoroberseite mit einem Heizstrom von 2mA und einem Volumenstrom von $0\mu\text{l}/\text{min}$.

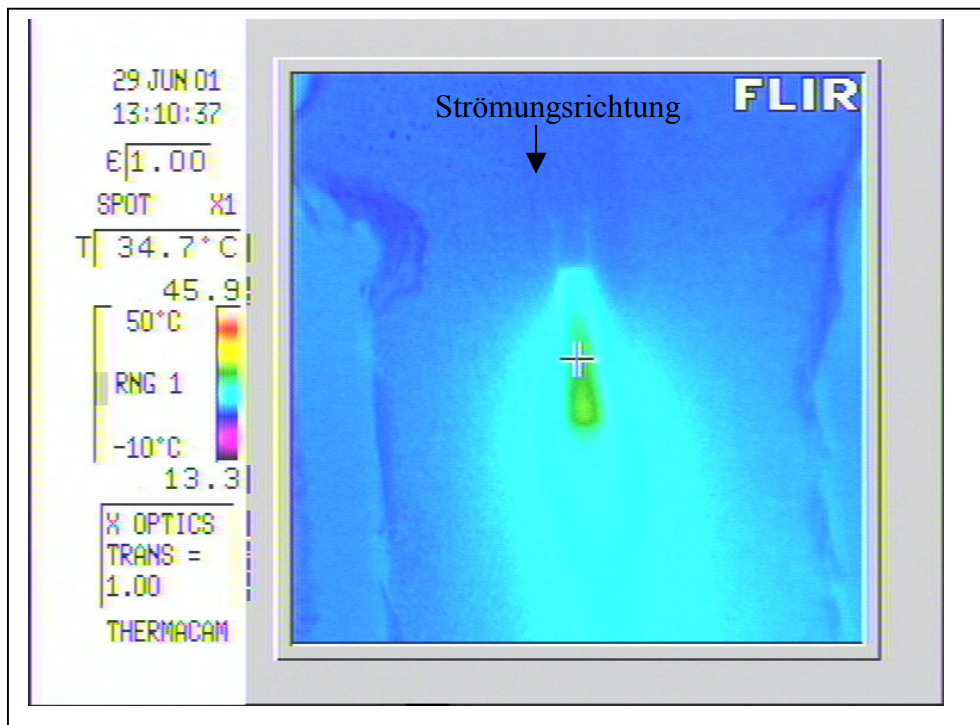


Abbildung 5-18: Wärmebildaufnahme von der Sensoroberseite mit einem Heizstrom von 2mA und einem Volumenstrom von 5 μ l/min.

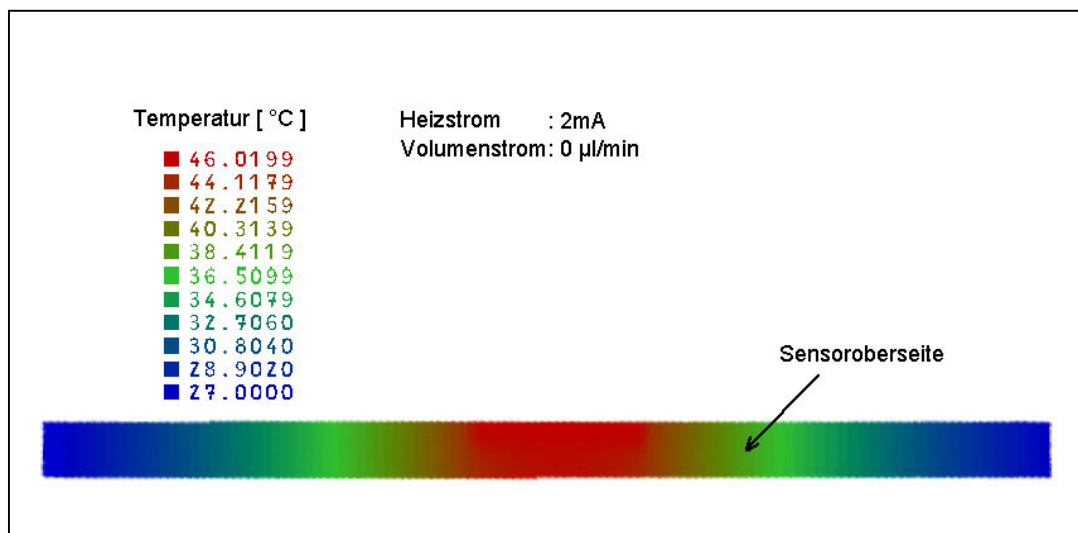


Abbildung 5-19: Berechnete Temperaturverteilung auf der Sensoroberseite mit einem Heizstrom von 2mA und einem Volumenstrom von 0 μ l/min.

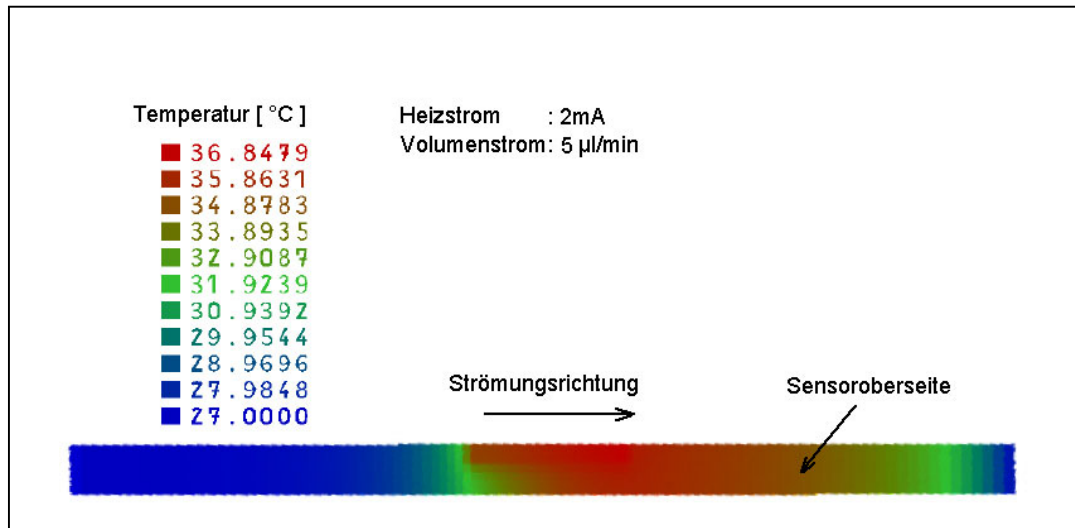


Abbildung 5-20: Berechnete Temperaturverteilung auf der Sensoroberseite mit einem Heizstrom von 2mA und einem Volumenstrom von 5µl/min.

Durch die Simulation wurden die Resultate der Wärmebildaufnahmen bestätigt. Dabei stimmen die Temperaturverteilung und die Absoluttemperaturen auf der Sensoroberseite nahezu überein. Anzumerken ist, dass die Farbeinteilung der graphisch dargestellten Temperaturwerte für die Wärmebilder und die Simulationsergebnisse unterschiedlich ist.

Die Simulation wurde in drei Rechenabschnitten durchgeführt. Es wurde hintereinander die elektrische Stromdichte, die elektrische Heizleistung und die Temperaturverteilung berechnet. Die Durchführung der Rechnung ist im Anhang 8.4 beschrieben.

Die Abbildung 5-21 zeigt schematisch das verwendete Modell für die FEM Simulation. Dabei sind die verschiedenen Strukturen nicht maßstäblich gezeichnet, damit das kleine Funktionselement gegenüber dem großen Kanal deutlich wird. Das mäanderförmige Heizelement wird für die Simulation durch eine dünne Schicht mit homogener elektrischer Leitfähigkeit ersetzt. Die Stromdichte wird so gewählt, dass die im Modell berechnete elektrische Leistung gleich der Leistung im realen Heizelement ist. Da der Sensor in der xy-Ebene eine Symmetrieebene besitzt, muss nur die Hälfte des Sensors berechnet werden. In der Symmetrieebene wird die zu ihr senkrechte stehende elektrische Stromdichte und Wärmestromdichte durch eine Neumann-Randbedingung auf den Wert Null gesetzt. Für die thermische Berechnung wird die während den Wärmebildaufnahmen gemessene Raumtemperatur von 27°C am Kanal Anfang und am -ende durch eine Potential-Randbedingung vorgegeben. An den übrigen Randflächen wird eine Bedingung, die den konvektiven Wärmetransport für die Temperatur T an die umgebende Luft mit der Temperatur T_u (gemischte Randbedingung $q = h \cdot (T - T_u)$) beschreibt, gesetzt. Der Wärmeübergangskoeffizient h wurde durch Fitten der Rechnung an die Ergebnisse der Wärmebilder vom Sensorelement, das mit einem Heizstrom von 2.5 mA erwärmt wurde, bestimmt. Der Wärmeübergangskoeffizient h wurde für sämtliche Berechnungen verwendet.

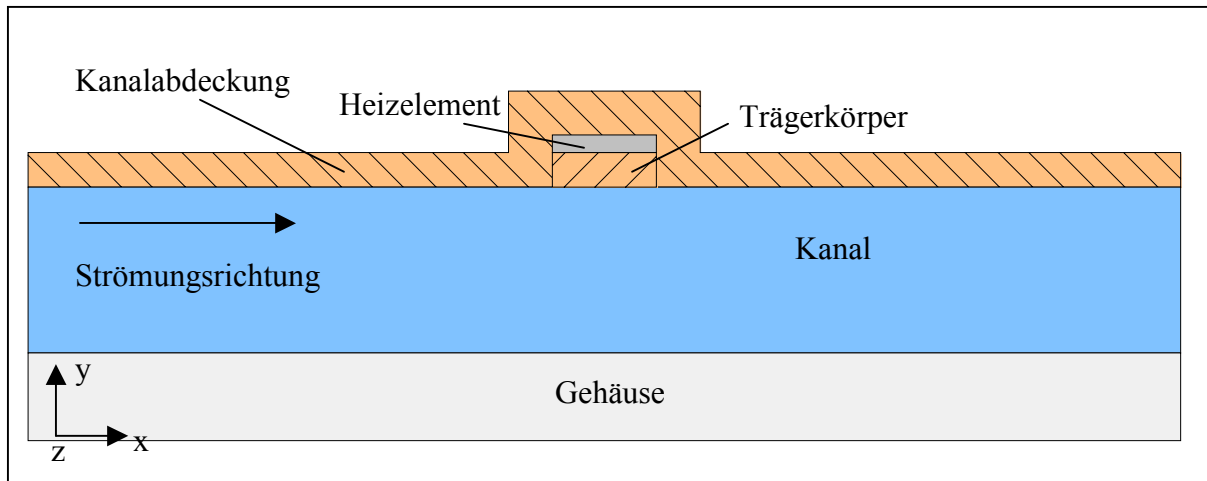


Abbildung 5-21: Schematische Darstellung des für die FEM-Rechnung verwendeten Modells.

Eine dreidimensionale Darstellung der Simulationsergebnisse ist in Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 gezeigt. Durch diese Ansicht ist die lokale Erwärmung des Mediums in Abhängigkeit von der Kanalhöhe (hier in der Symmetrieebene) dargestellt.

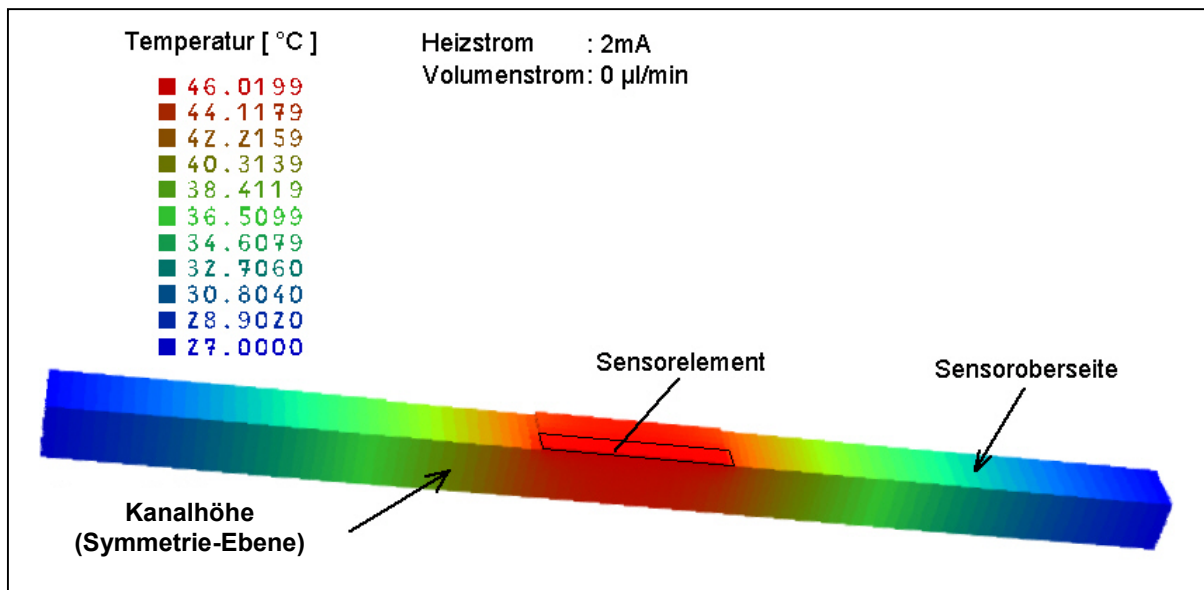


Abbildung 5-22: Dreidimensionale Darstellung des Simulationsergebnisses bei einem elektrischen Strom von 2mA und einem Volumenstrom von 0µl/min.

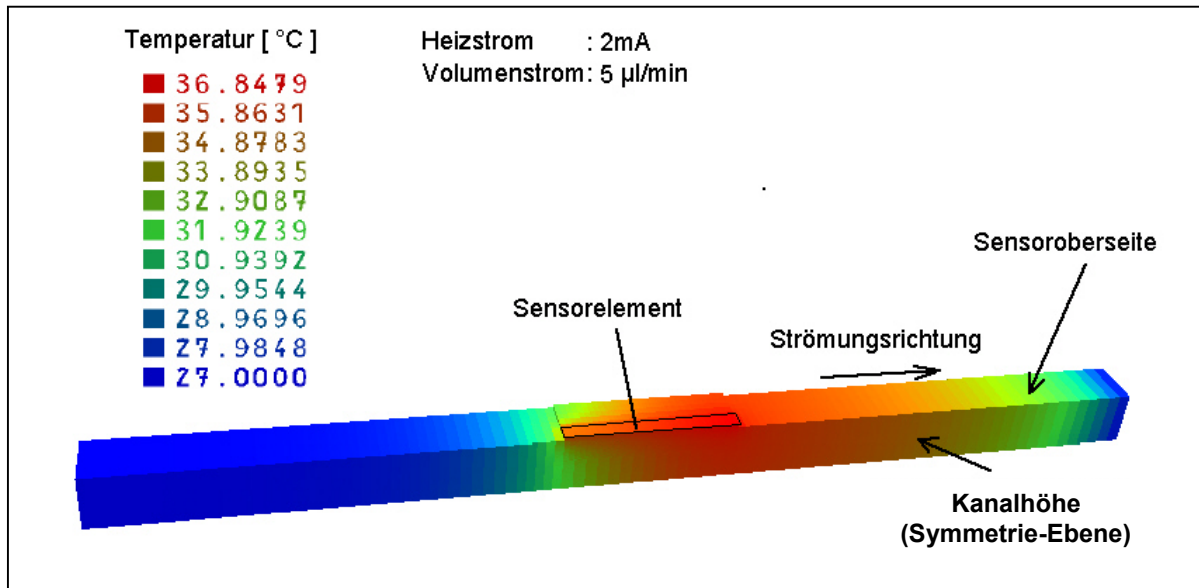


Abbildung 5-23 : Dreidimensionale Darstellung des Simulationsergebnisses bei einem elektrischen Strom von 2mA und einem Volumenstrom von 5µl/min.

Die verschiedenen Simulationsergebnisse zeigen, dass die Temperaturverteilung auf dem Funktionselement bei einem Volumenstrom von Null hauptsächlich durch den Wärmeübergangskoeffizient h bestimmt wird. Mit zunehmendem Volumenstrom bestimmt dagegen die Wärmeleitfähigkeit des Trägerkörpers das Ergebnis. Die gewonnenen Ergebnisse können für die Simulation des Sensors unter Betriebsbedingungen verwendet werden. Dies ist Voraussetzung, um Veränderungen der Sensorgeometrie, der Sensormaterialien und der fluidischen Parameter voraussagen zu können; auf diese Weise werden die Grundlagen für eine weitere Sensoroptimierung geschaffen.

5.5 Ergebnisbetrachtung und –überprüfung mit Anwendungsbeispielen

In Tabelle 5-1 sind die Kenndaten des in dieser Arbeit entwickelten thermischen Durchflusssensors zusammengefasst. In Tabelle 5-2 ist gezeigt, in wie weit der Sensor die an ihn gestellten Anforderungen erfüllt.

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| äußere Abmessungen: - ohne elektrischen und fluidischen Anschluss | 5,5 x 4,5 x 1,2 mm ³ |
| Kanalgeometrien der in dieser Arbeit hergestellten Durchflusssensoren: - Minimal - Maximal Andere Querschnitte sind möglich, jedoch sollten wegen möglicher Partikelbeladung 45 x 100 µm ² nicht unterschritten werden. | 45 x 100 µm ² 500 x 240 µm ² |
| Materialien: - Gehäuse Die Gehäuse aus Polymeren sind anpassbar an verschiedene Anwendungen (z.B. PEEK, PC, usw.) - Membranen - Leiterbahnen (nicht medienberührend) | PSU Polyimid Platin, Gold |
| Messbereiche: - Flüssigkeiten - Gase | 0,1 µl/min - 2200 µl/min 0,1 sccm - 1000 sccm |
| Ansprechzeit des Sensors: - ohne Temperaturkompensation - mit Temperaturkompensation | 2,5 ms 5 ms |
| Fertigungsausbeute pro Nutzen: - mit Labormitteln | 80% |
| Herstellungskosten pro Sensor: - ohne elektrische und fluidische Kontakte | Unter 4 € pro Stück |
| Messelektronik: - Permanentmessung - Puls-Verfahren | Wheatstone`sche Brückenschaltung Geschwindigkeits- und Temperaturmessung mit nur einer Leiterbahn |

Tabelle 5-1: Kenndaten des entwickelten, nach dem thermisch-anemometrischen Prinzip funktionierenden Durchflusssensors.

| Anforderungen | Forderung (F) Optional (O) | erfüllt „✓“ nicht erfüllt „—“ |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Sensoreigenschaften: | | |
| Gase <u>oder</u> Flüssigkeiten detektierbar | F | ✓ |
| Gase <u>und</u> Flüssigkeiten detektierbar | O | ✓ |
| Volumenstrommessbereich 0,1 – 50 µl/min | F | ✓ |
| Sensorbetrieb: | | |
| Temperaturerhöhung des Fluids zwischen Ein- und Austritt des Sensors ≤ 10 ⁰ C | F | ✓ |
| Herstellungsverfahren: | | |
| AMANDA-Verfahren | F | ✓ |
| Weitere Anforderungen: | | |
| Geringer Flächenbedarf/ kompaktes Design | F | ✓ |
| Einfacher Aufbau | O | ✓ |
| Kostengünstig/Einwegartikel | O | ✓ |

Tabelle 5-2: Vergleich Anforderungen und Erfüllungsgrad des Durchflusssensors.

Wie in Tabelle 5-2 dargestellt ist, erfüllt der in dieser Arbeit entwickelte Durchflusssensor die an ihn gestellten Anforderungen. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, den Sensor mit anderen fluidischen Komponenten bzw. AMANDA-Produkten zu kombinieren, z.B. mit der Mikromembranpumpe, dem Drucksensor oder dem Mikroventil. Letztere Kombination ermöglicht die Realisierung eines AMANDA-Durchflussreglers.

Konkrete Einsatzmöglichkeiten des entwickelten Durchflusssensors sind überall dort, wo Volumenströme präzise bestimmt, dosiert und reguliert werden müssen. In der Medizintechnik gibt es großen Bedarf an Flusssensoren für kleine Durchflüsse. Anwendungsmöglichkeiten ergeben sich für Mikro-Medikamentendosiersysteme, z.B. für die ständige nicht-invasive Überwachung und entsprechende Dosierung von Insulin bei Diabetespatienten. Mikrodosiersysteme finden aber nicht nur in der Medizin, sondern auch in der Pharmazie, Genetik, Bio- und Lebensmitteltechnologie Verwendung. Hier können sie in Mikroreaktoren und Mikroanalysegeräten (z.B. Lab-on-chip) zum Einsatz kommen. Für alle diese Anwendungen kann der entwickelte AMANDA-Sensor verwendet werden. Die für derartige Einsätze vorgeschriebene bzw. tolerierte geringe Temperaturerhöhung des Fluids, bei gleichzeitigem Erhalt der Messempfindlichkeit, wurde in dieser Arbeit bereits nachgewiesen. Darüber hinaus entstehen durch die Anpassung der Kanalgeometrie Durchflusssensoren für große Volumenströme. Diese können z.B. im Automobilbereich für die Bestimmung des in Verbrennungsmotoren optimalen Treibstoff-Luft Gemisches oder in herkömmlichen Gas- bzw. Flüssigkeitsleitungen eingesetzt werden. Sogar für Freistrommessungen in der Atmosphäre, d.h. für Luftgeschwindigkeitsmessungen kann das Sensorelement verwendet werden. Die Detektierung chemisch aggressiver Medien ist unter Verwendung geeigneter Sensormaterialien denkbar. Dies ist durch

die Verwendung von Polymeren in Verbindung mit dem flexiblen AMANDA-Verfahren möglich. Daneben kann der Sensor auch zur Erkennung von Gas- oder Flüssigkeitsströmungen in der vereinfachten Variante als Strömungswächter in Überwachungssystemen genutzt werden. Durch seine geringen Herstellungskosten kann der Durchflusssensor darüber hinaus in kurzlebigen Systemen als Einweg-Artikel eingesetzt werden.

5.6 Vergleich mit existierenden Durchflusssensoren

In diesem Kapitel werden die in Tabelle 5-1 dargestellten Kenndaten des entwickelten Sensors mit den Werten anderer mikromechanisch hergestellter Durchflusssensoren verglichen. Tabelle 5-3 zeigt Kenndaten verschiedener, auf dem Markt erhältlicher Sensoren sowie die Ergebnisse von Forschungsprojekten. Es ist jedoch schwierig, die verschiedenen Angaben miteinander zu vergleichen, da die Rahmenbedingungen dieser Ergebnisse teilweise nicht bekannt sind.

| Firma/Institut Sensor | FZK-IMT AMANDA- Sensor | HSG-IMIT Flow-Sensor | Bosch MFM6 | Leister Mflow20 | Sensirion ASF1400 | MKS M200 | Bronkhorst Liqui Flow L1 |
|------------------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| Medien | Flüssigkeiten und Gase | Flüssigkeiten und Gase | Gase | Gase | (Flüssigkeiten) Gase | Gase | Flüssigkeiten |
| Volumenstrom (minimal) | | | | | | | |
| Gas | 0,1sccm | 0,1sccm | 6 l/min | 0,01sccm | 0,01sccm | 0,01sccm | |
| Flüssigkeiten | 0,1µl/min | 0,16µl/min | | | nl-Bereich* | | 1,6µl/min |
| Ansprechzeit | 2,5ms | 1-3ms | 7ms | >1ms | 150ms | 500ms | 1-2s |
| Übertemperatur | | ** | | ** | ** | | |
| Gas | 45°C | | 150- 180°C | | | 90-110°C | |
| Flüssigkeiten | 6°C | | | | | | > 1°C |
| Dynamik | 1:100 | 1:100 | 1:100 | 1:100 | 1:40000*** | 1:100 | 1:50 |
| Herstellungs- verfahren | AMANDA Polymertechnik | Silizium- technik | Silizium- technik | Silizium- technik | Silizium- technik | Makroskop. Herstellung | Makroskop. Herstellung |
| Kosten pro Stück | < 4 €**** ohne Elektro- nik | ** | 15-20 € ***** mit Elektronik | 900 € mit Elekt- ronik | 3 Stück 1000 € mit Elektronik | 1000 € ohne Elekt- ronik | 950 € ohne Elekt- ronik |
| Stand Referenz | 10.2001 | 10.2001 [IMIT01], [Scho01] | 6.2001 [Wiss01] | 4.2001 [Firm01] | 4.2001 [Date01] | 4.2001 [Gasf01] | 4.2001 [Liqu01] |

Tabelle 5-3: Vergleich mit existierenden thermischen Durchflusssensoren.

* Aussage eines Mitarbeiters der Fa. Sensirion während eines persönlichen Gesprächs auf der Hannover-Messe 2001.

** Keine Angabe des Herstellers.

*** Bypasslösung (Messung in mehreren Kanälen mit unterschiedlichen Querschnittsgeometrien).

**** Herstellungskosten ohne fluidische u. elektrische Kontaktierung bei 150 Stück pro Doppelnutzen.

***** Preis für die Herstellung von 8 Mio. Stück pro Jahr.

Alle in diesem Vergleich einbezogenen Sensoren arbeiten nach dem thermischen Prinzip. Die mikromechanischen Sensoren wurden ausschließlich mit der Silizium-Technik hergestellt. Zusätzlich sind zwei konventionell hergestellte, makroskopische Durchflusssensoren aufgeführt. Werden die Messbereiche verglichen, weist der AMANDA-Durchflusssensor bzgl. des minimal möglichen Volumenstroms für Gase nur geringfügig schlechtere Werte gegenüber den kommerziell erhältlichen Sensoren auf. Jedoch ist bei diesen Sensoren nicht bekannt, mit welchen, die Empfindlichkeit bestimmenden, Übertemperaturen und Kanalgeometrien gearbeitet wird. Da für die in dieser Arbeit durchgeführten Gas-Messungen ein Kanalquerschnitt von $390 \times 240 \mu\text{m}^2$ gewählt wurde, kann eine Absenkung des Messbereichs über eine Kanalquerschnittsverkleinerung erreicht werden. Für die Kontrolle von sehr kleinen Flüssigkeitsströmen unter $1 \mu\text{l}/\text{min}$ (für Flüssigkeiten bis $1 \mu\text{l}/\text{min}$ z. B. Liqui-Flow Baureihe L1 der Fa. Bronkhorst) gibt es nur wenig geeignete Durchflusssensoren. Verschiedene Forschungsprojekte befassen sich daher mit der für die Medizin- und Biotechnik sehr interessanten Entwicklung von Flüssigkeits-Durchflusssensoren für den Nanoliterbereich. Hier zeigt der Vergleich des Messbereichs bzgl. des minimalen Durchflusses, dass der AMANDA-Sensors gegenüber einem, in einem anderen Forschungsprojekt entwickelten thermischen Sensor, mit leicht besseren Werten abschneidet. Jedoch kann auch hier keine Aussage über die verwendete Übertemperatur des Vergleichssensors gemacht werden. Dagegen wurde beim AMANDA-Sensor eine Temperaturerhöhung zwischen Fluid und Sensorelement von 6 Grad Celsius berücksichtigt. Auf eine Anfrage bei der Fa. Sensirion (Schweiz) wurden Laborergebnisse mit Flüssigkeiten im Bereich von Nanoliter pro Minute genannt. Bezogen auf den unteren Messbereich für Flüssigkeiten, hält der AMANDA-Durchflusssensor daher dem Vergleich mit anderen Sensoren stand bzw. übertrifft sie. Ein großer Vorteil von thermischen Silizium-Sensoren waren schon immer die sehr kurzen Ansprechzeiten. Durch die Verwendung einer sehr dünnen Polyimidmembran mit geringer Wärmekapazität wurde eine Ansprechzeit des in dieser Arbeit auf Polymerbasis entwickelten Sensors von weniger als 2,5 ms erreicht; dieser Wert liegt im Bereich von Silizium-Sensoren. Der große Vorteil des im Nutzen hergestellten AMANDA-Durchflusssensors sind seine geringen Herstellungskosten. Diese preisgünstige Herstellung wird durch den Einsatz von Polymeren, die auf den jeweiligen Anwendungsfall angepasst werden können, sowie die entsprechenden Prägeverfahren ermöglicht.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde ein mikromechanischer Durchflusssensor für Flüssigkeiten und Gase auf Polymerbasis entwickelt, hergestellt und charakterisiert.

Zu diesem Zweck wurden verschiedene Durchflussmessverfahren untersucht. Ziel dieser Untersuchung war es, zu prüfen, ob mit dem AMANDA-Verfahren die in Tabelle 1-1 formulierten Zielsetzungen erreichbar sind. Aus dieser Prüfung ergaben sich einige interessante Realisierungsmöglichkeiten, von denen das Prinzip der unmittelbaren Volumenzählung, die Durchflussmessung aus der Kraft auf einen angeströmten Körper und das thermisch anemometrische Prinzip in dieser Arbeit besonders hervorgehoben wurden. Nach einigen Vorversuchen sowie dem Aufbau von Funktionsmustern wurde das thermisch anemometrische Funktionsprinzip für die Herstellung eines Sensors mit dem AMANDA-Verfahren ausgewählt. Bei diesem Messprinzip wird die durchflussabhängige Leistungsabgabe eines elektrisch erwärmten Körpers an das ihn umströmende Fluid als Messsignal verwendet. Es wurde anhand der Tests erkannt, dass die vom Volumenstrommessbereich zu erfüllende Zielvorgabe, Durchflüsse bei einer gleichzeitigen maximalen Temperaturerhöhung des Fluids von weniger als 10 Grad Celsius bis zu 0,1 µl/min zu messen, erreicht werden kann.

Bei der Entwicklung des Sensordesigns konnte nicht auf die aus der Literatur bekannten gestalterischen Lösungen zurückgegriffen werden; es musste vielmehr ein, für einen Polymeraufbau notwendiges, temperatur- bzw. dehnungsunabhängiges Design entwickelt werden. Darüber hinaus wurden während der Konzeptphase die Gestaltungsregeln „Einfach“ und „Eindeutig“ beachtet, um ein einfach gehaltenes kompaktes Sensordesign mit eindeutiger Funktionserfüllung entstehen zu lassen. Nach diesen Vorgaben wurde ein einseitig am Gehäuse befestigter und über einem Fluidkanal liegender Trägerkörper in Form einer Zunge konzipiert. Auf dem über dem Kanal frei beweglichen Teil des Trägerkörpers wurden mäanderförmige Leiterbahnen (Hitzdrähte) appliziert. Die Leiterbahnen besitzen aufgrund der gestalterischen Maßnahmen, bei möglichen Temperaturänderungen im Sensorbetrieb, keinen den Messwert verfälschenden Dehnungsmessstreifeneffekt. Als Leiterbahnschutz wurde eine der Trägerkörpergeometrie und Trägerkörperdicke identische Schicht vorgesehen. Die gleichen Dicken waren notwendig, um die Leiterbahnen in die neutrale Faser der Biegelinie des Sensorelements zu legen; dadurch ergab sich bei einem im Sensorbetrieb flatternden bzw. oszillierenden Trägerkörper wiederum kein unerwünschter Dehnungsmessstreifeneffekt. Aufgrund dieser Designlösungen konnte ein, für den Aufbau mit Polymeren erforderliches, temperaturunabhängiges Sensorkonzept realisiert werden.

Die Herstellung des Durchflusssensors erfolgte mit dem kostengünstigen AMANDA-Verfahren, das die Prozessschritte Abformung, Oberflächenmikromechanik und Membranübertragung verwendet. Der Heißprägeprozess wurde für die Herstellung der Gehäuseober- und Gehäuseunterteile angewendet. Dabei wurden jeweils 50 Gehäuseteile aus Polysulfon (PSU) mit integrierten Fluidkanälen in einem Doppelnutzen gefertigt. Die Herstellung der Sensorelemente erfolgte ebenfalls im 50er-Nutzen auf einem 4"-Siliziumsubstrat. Der Trägerkörper und die Schutzschicht bestehen dabei aus jeweils 1,2 µm dünnem Polyimid. Die Breite des Trägerkörpers wurde auf die jeweilige Kanalbreite angepasst, die zwischen 45-500 µm liegt. Die zwischen den Polyimidmembranen liegenden Leiterbahnen wurden mit einem, für das AMANDA-Verfahren neuen Prozess, der unabhängig von den verwendeten Leiterbahnmaterialien ist, hergestellt. Dieser lithographische Lift-off Prozess ermöglichte die Strukturie-

rung von $2\mu\text{m}$ dünnen und 100 nm hohen Leiterbahnen aus Platin. Die hergestellten Sensorelemente wurden über den Prozessschritt der Membranübertragung mittels Kammerkleben mit den Gehäusen verbunden. Dabei war es mit der vorhandenen Apparatur möglich, $40\mu\text{m}$ breite Sensorelemente in einem $45\mu\text{m}$ breiten Fluidkanal zu positionieren. Die Fertigungsausbeute der unter Laborbedingungen im Nutzen hergestellten Durchflusssensoren betrug 80% . Nach der abschließenden Nutzenvereinzelung besaß der Sensor die äußeren Abmaße von $5,5 \times 4,5 \times 1,2\text{ mm}^2$. Bei einer geeigneten Anordnung der Sensorelemente auf einem Nutzen, wurde ein Herstellungspreis von weniger als 4 € (ohne fluidische und elektrische Kontaktierung) errechnet, so dass dieser Sensor als Einweg-Artikel eingesetzt werden kann.

Zur Charakterisierung des Sensors wurden fluidische Tests mit Wasser und Stickstoff durchgeführt; zu diesem Zweck erfolgte der Aufbau verschiedener Messanordnungen. Experimentell wurden Sensorkennlinien, Sensorauflösungen bzw. die minimalsten messbaren Volumenströme, die Ansprechzeiten sowie Druck- und Temperaturabhängigkeiten des Sensors bestimmt. Dabei wurde bei den Tests mit Wasser ein minimaler Volumenstrom von $0,1\mu\text{l}/\text{min}$ bei einer Temperaturerhöhung des Fluids von nur 6 Grad Celsius , detektiert. Die Abmessungen des Kanalquerschnitts waren dabei $290 \times 240\mu\text{m}^2$. Die Messbereichsauflösung für einen Sensor im Gasbetrieb mit einem Kanalquerschnitt von $390 \times 240\mu\text{m}^2$ lag bei $0,1\text{sccm}$. Die Temperaturerhöhung des Fluids wurde auf 45 Grad Celsius eingestellt. Die Ansprechzeiten des Sensors wurden mit $2,5\text{ ms}$ bestimmt. Diese kurzen Zeiten wurden durch die Verwendung der $1,2\mu\text{m}$ dünnen Membranen und der damit verbundenen geringen Wärmekapazität erreicht. Aufgrund der schnellen Sensorelemente wurde es möglich, eine im Rahmen dieser Arbeit neu entwickelte Sensorelektronik, im Pulsmodus arbeitend, zu verwenden. Mit Hilfe dieses Verfahrens kann der Sensor die Strömungsgeschwindigkeit sowie die das Messsignal beeinflussende Fluidtemperatur mit nur einer Leiterbahn messen. Die daraus resultierende Verkleinerung des Sensorelements führt zu einer Reduzierung der Sensorkosten. Die durch die messtechnische Bestimmung der Absoluttemperatur erlangte Temperaturunabhängigkeit des Sensorsignals wurde durch Messungen bei verschiedenen Fluidtemperaturen nachgewiesen.

Zur Ermittlung der Temperaturverteilung im Sensorelement wurden Infrarot-Wärmebilder aufgenommen. Die Temperaturverteilung wurde darüber hinaus über eine FEM-Rechnung simuliert. Der Ergebnisvergleich ergab, dass die experimentell ermittelten Werte mit den rechnerisch ermittelten Werten übereinstimmen. Somit können Designoptimierungen rechnergestützt vorgenommen werden. Darüber hinaus kann das Sensorverhalten in verschiedenen Fluiden zukünftig über eine Berechnung nach der Finite Elemente Methode bestimmt werden.

Nachdem nachgewiesen wurde, dass die an den Sensor gestellten Anforderungen erfüllt worden sind, wurde ein Vergleich mit anderen mikromechanisch hergestellten Durchflusssensoren durchgeführt. Bei diesem Vergleich zeigte sich, dass die Ansprechzeiten des in Polymertechnik aufgebauten Durchflusssensors im gleichen Bereich wie die Zeiten der sehr schnell geltenden, ausschließlich in Silizium-Technik hergestellten Sensoren liegen. Darüber hinaus gibt es nur wenige Durchflusssensoren, die kleinste Flüssigkeitsströme im Nanoliterbereich detektieren können, wobei der in dieser Arbeit entwickelte Sensor vergleichsweise gut abschneidet. Ein großer Vorteil des entwickelten Durchflusssensors ist eine, auf den jeweiligen Anwendungsfall, mögliche Anpassung der Polymere aufgrund des flexiblen AMANDA-Verfahrens.

Aufgrund der kleinen messbaren Volumenströme und wegen der nur geringen Temperaturerhöhung des zu messenden Fluids kann dieser Sensor in bestimmten Fällen für die Medikamentendosierung eingesetzt werden. Außerdem sind Anwendungen im Bereich der Umwelt- und Biotechnologie denkbar; Luftgeschwindigkeitsmessungen können ebenfalls mit diesem

Sensorelement vorgenommen werden. Durch seine geringen Herstellungskosten kann er unter anderem in kurzlebigen Systemen auch für größere Volumenstrombereiche eingesetzt werden. Zusätzlich ist der Einsatz als Strömungswächter z. B. für Gas- oder Flüssigkeitsdetektionen in Überwachungssystemen möglich. Darüber hinaus kann der Sensor in einer weiteren Entwicklungsstufe mit anderen mikromechanisch hergestellten Bauteilen kombiniert werden, z. B. für den Aufbau eines Durchflussreglers durch die Kombination von Sensor und Ventil.

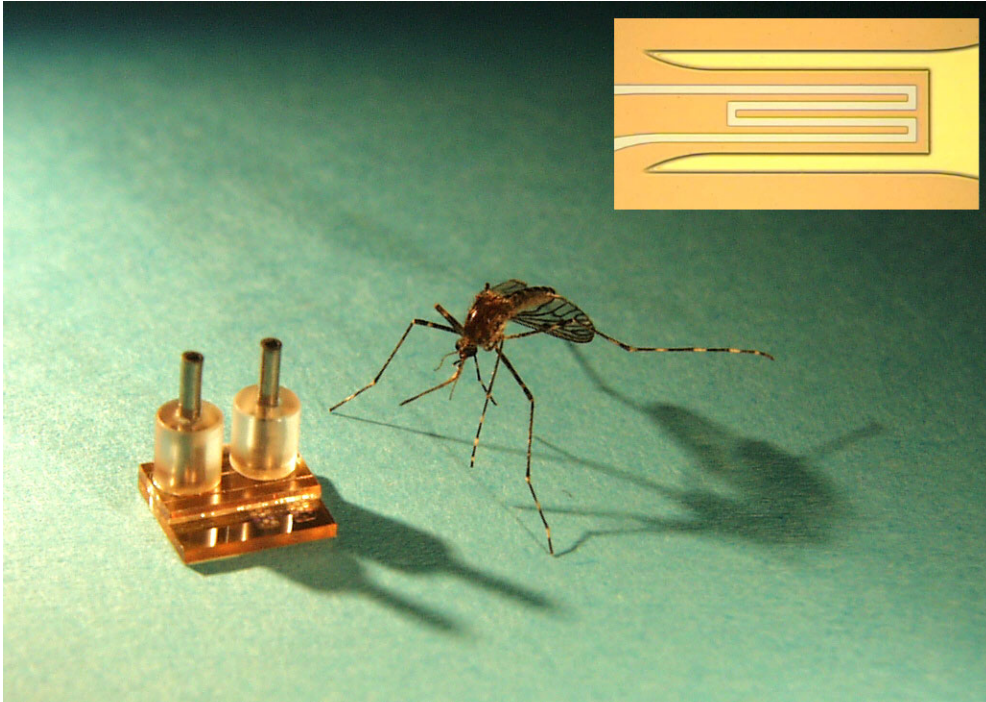


Abbildung 6-1: Neu entwickelter Durchflusssensor aus Kunststoff im Größenvergleich mit einer Rheinschnake. Kleines Bild: Sensorelement mit integrierter Platinleiterbahn.

Der in dieser Arbeit entwickelte und auf Kunststoffbasis hergestellte Durchflusssensor bietet Potential für weitere Verbesserungen. Neben der weiteren Absenkung des bisher messbaren minimalen Volumenstroms ($0,1\mu\text{l}/\text{min}$) bis in Bereiche von Pikoliter pro Minute deutet die mit einer weiteren Messreihe nachgewiesene Druckabhängigkeit des Sensorsignals Optimierungsmöglichkeiten an. Mit den im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen könnte problemlos der Aufbau eines thermischen Massenstromsensors nach dem kalorimetrischen Prinzip, dessen Messsignal unabhängig von Druckänderungen sowie Viskositätseinflüssen ist, mit dem AMANDA-Verfahren realisiert werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass anhand der im Nutzen hergestellten Durchflusssensoren die Tragfähigkeit des Konzepts erfolgreich nachgewiesen wurde. Eine erhöhte Prozesssicherheit sowie eine daraus resultierende gesteigerte Funktionsicherheit des Sensors ergab sich aus der Weiterentwicklung bzw. Verbesserung der Prozessbedingungen. Die für den Durchflusssensor aufgestellten Anforderungen wurden mit dem erarbeiteten Konzept insgesamt erfüllt.

7 Literaturverzeichnis

- [Beam59] [Beams J.W., Mechanical Properties of Thin Films of Gold and Silver, Proc. Structure and Properties of Thin Films, John Wiley & Sons Inc., New York, editors: C.A. Neugebauer, J.B. Newkirk, D.A. Vermilyea, 1959, 183-192]
- [Berb98] [Berberig, Nottmeyer, Mizuno, Kanai, Kobayashi, The Prandtl micro flow sensor: a novel silicon diaphragm capacitive sensor for flow-velocity measurements, Sensors and Actuators A66, 1998, S.93 – 98]
- [Birk67] [Birkenfeld W., Die praktische Anwendung von Membranrosetten, MTB 3 (1967) H.2, S.21-22]
- [Bonf87] [Bonfig K.W. Technische Durchflussmessung 2. Auflage 1987, Vulkan-Verlag]
- [Bonf90] [Bonfig K.W., Durchflussmessung von Flüssigkeiten und Gasen, Expert-Verlag, Ehingen 1990]
- [Bosc94] [Technisches Datenblatt Bosch Mikroelektronik Abt. K8/VKF, Massenfluss-sensor für Flüssigkeiten in Silizium-Mikromechanik, Robert Bosch GmbH Reutlingen, 1994]
- [Büst96] [B. Büstgens, W. Bacher, W. Bier, R. Ehnes, D. Maas, R. Ruprecht, W.K. Schomburg, L. Keydel, "Micromembrane Pump Manufactured by Molding" Proceedings 4th International Conference on New Actuators, Actuator'94, Bremen, June 15 - 17, (1994) 86 – 90]
- [Date01] [Datenblatt ASF 1400, Fa. Sensirion, Hannover-Messe 2001]
- [Ditt98] [D. Dittmann, Mikroventile mit Formgedächtnis-Dünnschichten, Diplomarbeit, Lehrstuhl und Institut für Mikrostrukturtechnik Universität Karlsruhe und Forschungszentrum Karlsruhe, 1998]
- [Dubb95] [W. Beitz, K.H. Küttner, Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, 18. Auflage, Springer-Verlag, 1995]
- [Elga95] [Elgamel H.E., Closed-form expressions for the relationship between stress, diaphragm, deflection, and resistance change with pressure in silicon piezoresistive pressure sensors. Sensors and Actuators A50, Elsevier Science, 1995, 17-22]
- [Enok96] [Enoksson, Stemme G., Stemme E., A Coriolis Mass Flow Sensor Structure in Silicon, Royal Institute of Technology, Stockholm, IEEE 96, 1996, S. 156 – 161]
- [Fara32] [Faraday M., Experimental researches in electricity, Phil. Trans. 15 (1932) S.174]
- [Fied92] [Fiedler O., Strömungs- und Durchflussmesstechnik, Oldenbourg Verlag 1992]
- [Fing83] [Fingerson L.M., and Freymuth P., 1983 Thermal anemometers, in Fluid Mechanics Measurements, Goldstein R.J., Hemisphere Publ. Co., 99-154]
- [Firm01] [Firmenprospekt Mflow20, 19.04.2001, Fa. Leister, Hannover-Messe 2001]
- [Firm99] [Firmenschrift LeisterProcess Technologies, Mflow 20, CH-6060 Sarnen, 1999]
- [Gasf01] [Gasflüsse: Messen-Regeln-Mischen, Produktübersicht Fa. MKS-Instr., 2001]
- [Goll96] [C. Goll, W. Bacher, B. Büstgens, D. Maas, W. Menz, W.K. Schombur, Microvalves with Bistable Buckled Polymer Diaphragms, J. Micromech. Microeng. 6 (1996) 77 - 79]
- [Grav93] [Gravesen Peter, Bransbjerg Jens, Sondergard Jensen Ole, Microfluidics-a review, Danfoss A/S, DK-6430 Nordborg, Denmark, 1993]

- [Guve85] [Guvenc M.G., V-Groove Capillary for Low Flow Control and Measurement. Fung C.D., Cheung P.W., Ko W.H., Fleming D.G., Micromachining and Micropackaging of Transducers, Amsterdam 1985, Elsevier]
- [Henn85] [Henning G., Zur Kompensation einer Temperaturänderung des Strömungsmediums bei Hitzdrahtmessungen, Turbulenzmesstechnik Binz, Report Inst. F. Mech. AdW R-MECH-05/85, S.59-66, 11.1984]
- [Hoff76] [Hoffmann K., Zum Linearitätsfehler bei Dehnungsmessungen mit Dehnungsmessstreifen im Hochdehnungsbereich, Messtechnische Briefe 12, 1976, H.3, S.53-57, Hrsg. Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt]
- [Hoff84] [Hoffmeister M., Charakteristische Zeiten der Thermoanemometer, Turbulenzmesstechnik Binz, 11.1984, Rep. Inst. f. Mech. AdW, R-Mech-05/85 S.7 – 28]
- [Hoff87] [Hoffmann Karl, Eine Einführung in die Technik des Messens mit Dehnungsmessstreifen, Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Darmstadt 1987]
- [IMIT01] [Anwendungsbericht SE 030, Thermische Strömungssensoren, HSG-IMIT 2001]
- [Jano92] [Janoscha H., Aktoren Grundlagen und Anwendungen, Springer-Verlag 1992]
- [Karm12] [Karman v. Th., Über den Mechanismus des Flüssigkeits- und Luftwiderstandes, Phys. Z. Bd. 13 (1912) S.49-59]
- [Keil95] [Keil S., Beanspruchungsermittlung mit Dehnungsmessstreifen, Cuneus-Verlag, 1995]
- [King14] [King L.V., On the connection of heat from small cylinders in a stream fluid: Determination of the convection constants of small platinum wires with application to hot wire anemometry, Proc. Roy. Soc., London, 90 (1914) S.563-570]
- [Kobo93] [Kobold K., Neuer Durchflussmengemesser und –wächter nach dem Prinzip des federbelasteten Schwebekörpers, Messen Prüfen Automatisieren 23, 1987, S.188-190]
- [Kohl00] [M. Kohl, T. Rogge, W.K. Schomburg, “Mikroventile für fluidische Baukastensysteme”, Wissenschaftliche Berichte FZKA 6423 (2000) 225 – 226]
- [Kreu84] [Kreuzer M., Praktische Bedeutung der effektiven Dehnung für die Schaltungstechnik von Dehnungsmessgeräten, VDI-Berichte Nr. 514, 1984, S.121-127]
- [Krev98] [B. Krevet, W. Kaboth, Proc. MSM 98, Santa Clara, 320-324, 1998.]
- [Lamm93] [Lammerink, Tas, Elwenspoek, Fluitman, Micro-liquid flow sensor, Sensors and Actuators A 1993, S. 45-50]
- [Leuc96] [Leuckel W., Wärme- und Stoffübertragung, Skriptum zur Vorlesung WS 1995/96, Lehrstuhl für Feuerungstechnik Engler-Bunte-Institut, Universität Karlsruhe]
- [Ligr87] [Ligrani P.M., Bradshaw P., Spatial resolution and measurement of turbulence in the viscous sublayer using subminiature hot-wire probes, Exp. in Fluids 5, 1987, 407 – 417]
- [Liqu01] [Liqui-Flow, Produktübersicht Fa. Bronkhorst, 2001]
- [Maas96] [D. Maas, B. Büstgens, J. Fahrenberg, W. Keller, P. Ruther, W.K. Schomburg, D. Seidel ”Fabrication of Microcomponents using Adhesive Bonding Techniques”Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS ’96, vom 11. bis 15.2.96 in San Diego, USA (1996) 331 – 336]

- [Mart98] [J. Martin, W. Bacher, O.F. Hagen, W.K. Schomburg "Strain Gauge Pressure and Volume-Flow Transducers Made by Thermoplastic Molding and Membrane Transfer" Proceedings des International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, MEMS '98, 25.-29.1.98 in Heidelberg, Germany (1998) 361 – 366]
- [Menz97] [Menz W., Mohr J., Mikrosystemtechnik für Ingenieure, Zweite erweiterte Auflage, VCH Verlagsgesellschaft 1997]
- [Mesc96] [Mesch F., Messtechnisches-Praktikum, Institut für Mess- und Regelungstechnik, Universität Karlsruhe, 1996]
- [More88] [Moreau W.M., Semiconductor Lithography-Principles Practices and Materials, Plenum Press New York, 1988]
- [Mull95] [Mullins, van Putten, Bayford, Butcher, Potential for a smart sensor based on an integrated silicon anemometer, Sensors and Actuators A 46-47, 1995, S.342-348]
- [Nguy96] [Nguyen N.-T., Dötzel W., Mikromechanische Strömungssensoren im Überblick, F+M 1996, S. 644-648, Carl Hanser Verlag München]
- [NN82] [NN: Design considerations for diaphragm pressure transducers; TN-510 Measurements Group Inc., 1982]
- [Oost97] [Oosterbroek, Lammerink, Berenschot, van den Berg, Elwenspoek, Designing, realization and characterization of a novel capacitive sensor/flow sensor, Transducers 97, S.151 – 154, June 16-19, 1997, Chicago,USA]
- [Ozak99] [Ozaki Y., Ohyama T.Y., Shimoyama I., An air flow sensor modeled on wind receptor hairs of insects, University of Tokyo, 1999]
- [Peter85] [Petersen G.K., Brown J., High-Precision, High-Performance Mass-Flow Sensor with Integrated Laminar Flow Micro-Channels, Transducers 85, 1985, S.361-363]
- [Prod00] [Product Data Sheet, AZ5214E Image Reversal Photoresist,]
- [Putt74] [van Putten G.A.F.P., Middelhoek S., Integrated silicon anemometer, Electronic letters 10, 1974, S. 425-426]
- [Rich98] [Richter, Wackerle, Woias, Hillerich, A novel sensor with high time resolution based on differential pressure principle, MEMS '98, 25.-29.01.98, Heidelberg, Germany, 1998]
- [Rogg01] [Rogge, Rummler, Schomburg, Entwicklung eines piezogetriebenen Mikroventils – von der Idee bis zur Vorserienfertigung, Dissertation, FZKA-Bericht 6671, 2001]
- [Scha76] [Schaefer K., Thermische Durchflußmethoden, VDI-Berichte Nr. 254, 1976, S.157-162]
- [Scho01] [Scholz, Ashauer, Briegel, Sandmaier, Lang, Thermal Flow Sensors for very small Flow Rate, Transducers01, 4B2.08P, 10-14.06.01 Munich, Germany]
- [Scho95] [Schomburg W.K., Bacher W., Bier W., Büstgens B., Fahrenberg J., Goll C., Maas D., Menz W., Seidel D., Fabrication of Microfluidic Devices by Thermoplastic Molding and Diaphragm Transfer, Proc. International Mechanical Engineering Congress and Exposition, 12-17.11.1995, San Francisco, ASME Dynamic Systems and Control Division DSC 57-2, 1995, 951-956]
- [Scho97] [Schomburg W.K., Ahrens R., Bacher W., Goll C., Meinzer S., Quinte A., AMANDA- Low cost production of mikrofluidic devices, Transducers 1997 Special Volume of Sensors and Actuators, Elsevier, 1997]
- [Schr88] [Schrüfer E., Elektrische Messtechnik, Hanser-Verlag, I Schru 4, 1988]
- [Sens00] [Sensormagazin, Nr.1/2000, Kennziffer 030, Magazin Verlag, 2000]
- [Sher61] [Shercliff J.A., The theory of electromagnetic flowmeasurement, Cambridge: University Press 1961]

- [Somm95] [Sommer E., Mechanisches Verhalten von Mikrobauteilen und –systemen, Karlsruhe, Wintersemester 1995/96]
- [Stra98] [Stratmann A., Realisation elektrodenloser magnetisch-induktiver Durchflussmesser (MID) in Mikrosystemtechnik, Ruhr-Universität Bochum, ITG Fachtagung 9.-11.03.1998]
- [Stri74] [Strickert H., Hitzdraht- und Hitzfilmanemometrie, VEB Verlag Technik Berlin, 1974]
- [Timo59] [Timoshenko S., Woinowsky-Krieger S., Theory Of Plates And Shells, McGraw-Hill International Editions, Second Edition, 1959]
- [Trän98] [Tränkler H., Obermeier E., Sensortechnik, Handbuch für Praxis und Wissenschaft, Springer-Verlag, 1998]
- [Vector] [Vector Fields ltd., 24 Bankside, Kidlington, Oxford OX51JE, England]
- [Wall96] [U. Wallrabe, J. Mohr, Proc. MEMS'96, S.462, 1996]
- [Wen97] [Wen H.K., Quiang W., Touch Mode Capacitive Pressure Sensors for Industrial Applications, Proceedings of the 10th IEEE MEMS Annual International Workshop, 1997, 284-289]
- [Wiss01] [Wissenschaftliches Seminar, Thermische Durchflusssensoren der Baureihe MFM6, M. Strohrmann, Fa. Bosch, 26.06.01 Universität Karlsruhe]
- [Wulf00] [Wulff Kolja, Hybride Drucksensoren aus Kunststoff und Glas nach dem AMANDA-Verfahren, Dissertation Universität Karlsruhe, 2001]
- [Yang92] [Yang, Soeberg, Monolithic Flow Sensor for Measuring Millilitre per Minute Liquid Flow, Sensors and Actuators A 33, 1992, S.143-153]
- [Yeh64] [Yeh Y., Cummins H.Z., 1964 Localized flow measurements with a He-Ne laser spectrometer, Appl. Phys. Letters 4, 176]
- [Youn20] [Young R., On electrical disturbances due to tides and waves, Phil. Mag (Ser.6) 40 (1920) S.149]
- [Zhan01] [Zhang, Tadigadapa, Najafi, A micromachined Coriolis-Force-Based mass flowmeter for direct mass flow and fluid density measurement, Transducers01, 1460-1463, 10.-14.06.01 Munich, Germany]
- [Zier93] [Zierrep J., Grundzüge der Strömungslehre, 5. Auflage, Springer-Verlag, 1993]

Publikation

Die folgende Veröffentlichung ist im Rahmen dieser Arbeit entstanden:

D. Dittmann, R. Ahrens, Z. Rummler, K. Schlote-Holubek, W.K. Schomburg: Low Cost Flow Transducer fabricated with the AMANDA-Process, Transducers01, 4B2.10P, 10.-14.06.01 Munich, Germany, 2001.

8 Anhang

8.1 Anhang: Durchflussmessung aus der Kraft auf angeströmte Körper

8.1.1 Anhang: Berechnung der Reibungsstrecke einer Lochblende

Wird die Gleichung 8-1

$$\text{Gleichung 8-1} \quad \dot{V} = \frac{A^2}{8 \cdot \pi \cdot \eta \cdot L} \cdot \Delta p$$

nach L umgestellt und wird vorausgesetzt, dass ein Volumenstrom $\dot{V}=0,1\mu\text{l}/\text{min}$ einen Druckverlust $\Delta p=0,1\text{Pa}$ hervorruft, berechnet sich der Reibweg mit der dynamischen Viskosität $\eta=0,0017\text{ Pa}\cdot\text{s}$ und $r=50\mu\text{m}$ zu:

$$\text{Gleichung 8-2} \quad L = \frac{\Delta p \cdot \pi \cdot r^4}{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta} = 86,6 \mu\text{m}.$$

Mit $L=86,6\mu\text{m}$ ergibt sich für einen Volumenstrom von $10\mu\text{l}/\text{min}$ eine Druckdifferenz von:

$$\text{Gleichung 8-3} \quad \Delta p = \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot L}{\pi \cdot r^4} = 10 \text{ Pa}$$

8.1.2 Anhang: Berechnung der Radius-Dicken-Verhältnisse der Membranen und die dazugehörigen max. Auslenkungen (lineare Annahme)

| Membran-LochØ $d=2r$ [μm] | Membrandicke h_1 [μm] | Membrandicke h_2 [μm] | Dichte ρ H ₂ O [kg/m^3] | Dyn. Visk. η H ₂ O [Pa s] | E-Modul PI [GPa] | Querk.-Zahl ν von PI |
|-------------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------|---------------------|-----------------------------|
| 100 | 20 | 10 | 1000 | 0,0017 | 3 | 0,31 |

Tabelle 8-1: Materialkennwerte.

Berechnung des Druckverlustes bei gegebenen Volumenstrom:

$$\text{Gleichung 8-4} \quad \Delta p = \Delta p_{\text{Torricelli}} + \Delta p_{\text{Hagen - P.}}$$

$$\text{Gleichung 8-5} \quad \Delta p_1 = \Delta p_{\text{Tor},1} + \Delta p_{\text{Hag},1} = \frac{\rho}{2} \cdot \xi \cdot \frac{\dot{V}^2}{\pi^2 \cdot r^4} + \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot L_1}{\pi \cdot r^4}$$

$$\text{Gleichung 8-6} \quad \Delta p_2 = \Delta p_{\text{Tor},2} + \Delta p_{\text{Hag},2} = \frac{\rho}{2} \cdot \xi \cdot \frac{\dot{V}^2}{\pi^2 \cdot r^4} + \frac{8 \cdot \dot{V} \cdot \eta \cdot L_2}{\pi \cdot r^4}$$

mit r =Radius der Membranöffnung, ξ =dimensionslose Verhältniskonstante ρ =Dichte des Fluids, η =dynamische Viskosität des Fluids, L =Länge der Reibungsstrecke bzw. Dicke der Membran

Ergebnisse:

| \dot{V} [$\mu\text{l}/\text{min}$] | Δp_1 [Pa] | $\Delta p_{\text{Tor},1}$ [Pa] | $\Delta p_{\text{Hag},1}$ [Pa] | Δp_2 [Pa] | $\Delta p_{\text{Tor},2}$ [Pa] | $\Delta p_{\text{Hag},2}$ [Pa] |
|----------------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|-------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| 0,1 | 0,0136 | 0,0000225 | 0,0136 | 0,0068 | 0,0000225 | 0,0068 |
| 1 | 0,138 | 0,00225 | 0,136 | 0,07 | 0,00225 | 0,068 |
| 10 | 1,584 | 0,225 | 1,36 | 0,905 | 0,225 | 0,68 |
| 100 | 36,13 | 22,5 | 13,6 | 29,33 | 22,5 | 6,8 |

Tabelle 8-2: Druckverlustergebnisse.

Berechnung des Radius-Dickenverhältnisse der Membranen:

$$\text{Gleichung 8-7} \quad \frac{a}{h} = \sqrt[4]{\frac{16}{3} \cdot \frac{(1+\nu)}{(5+\nu)} \cdot \frac{1}{(1-\nu^2)} \cdot \frac{E}{p}}$$

mit a =Membranradius, h =Memdrandicke, ν =Querkontraktionszahl, p =anliegende Flächenlast, E =E-ModulErgebnisse:

Markiert sind die verwendeten Radien-Dickenverhältnisse sowie die Radien der Membranen.

| \dot{V} [$\mu\text{l}/\text{min}$] | Δp_1 [Pa] | a/h_1 | a_1 [μm] | Δp_2 [Pa] | a/h_2 | a_2 [μm] |
|----------------------------------------|-------------------|------------|-------------------------|-------------------|------------|-------------------------|
| 0,1 | 0,0136 | 751 | 15037 | 0,0068 | 893 | 8937 |
| 1 | 0,138 | 421 | 8425 | 0,07 | 499 | 4989 |
| 10 | 1,584 | 229 | 4578 | 0,905 | 263 | 2633 |
| 100 | 36,13 | 105 | 2095 | 29,33 | 110 | 1103 |

Tabelle 8-3: Ergebnisse der Radius-Dickenverhältnisse.

Berechnung der mechanischen Dehnungen bzw. Auslenkungen in der Mitte der Membranen:

$$\text{Gleichung 8-8} \quad \varepsilon_{r, \max} = \varepsilon_{t, \max} = 3 \cdot \frac{(3+\nu)}{8} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2$$

$$\text{Gleichung 8-9} \quad w_{\max} = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \left(\frac{5+\nu}{1+\nu}\right) \cdot \frac{a^4}{h^3} \cdot \frac{(1-\nu^2)}{E}$$

Ergebnisse mit $a_1/h_1=105$, $a_2/h_2=110$, $a_1=2095 \mu\text{m}$, $a_2=1103$

| \dot{V} [$\mu\text{l}/\text{min}$] | Δp_1 [Pa] | ε_1 [%] | w_1 [m] | Δp_2 [Pa] | ε_2 [%] | w_2 [m] |
|----------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------|-------------------|---------------------|-----------|
| 0,1 | 0,0136 | 6,2E-8 | 7,54E-9 | 0,0068 | 3,43E-8 | 2,32E-9 |
| 1 | 0,138 | 6,2E-7 | 7,65E-8 | 0,07 | 3,53E-7 | 2,39E-8 |
| 10 | 1,584 | 7,19E-6 | 8,77E-7 | 0,905 | 4,55E-6 | 3,09E-7 |
| 100 | 36,13 | 1,64E-4 | 2,00E-5 | 29,33 | 1,48E-4 | 1,00E-5 |

Tabelle 8-4

Ergebnisse der mechanischen Dehnungen bzw. der Auslenkungen für verschiedene Drücke bei linearer Annahme.

8.1.3 Anhang: Berechnung der Membrangeometrien (nichtlineare Annahme)

Mechanische Dehnung in der Mitte einer lose am Rand gelagerten Kreismembran:

$$\text{Gleichung 8-10} \quad \varepsilon_{r, \max} = \varepsilon_{t, \max} = 3 \cdot \frac{(3 + \nu)}{8} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2$$

Berechnung des Membranradius:

$$\text{Gleichung 8-11} \quad a = \sqrt{\frac{\varepsilon_{\max} \cdot E}{p \cdot 3 \cdot \frac{(3 + \nu)}{8}}} \cdot h$$

Ergebnisse:

| \dot{V} [$\mu\text{l}/\text{min}$] | Δp_1 [Pa] | a_1 [μm] | Δp_2 [Pa] | a_2 [μm] |
|----------------------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|
| 0,1 | 0,0136 | 266649 | 0,0068 | 188394 |
| 1 | 0,138 | 83700 | 0,07 | 58708 |
| 10 | 1,584 | 24716 | 0,905 | 16352 |
| 100 | 36,13 | 5176 | 29,33 | 2872 |

Tabelle 8-5: Berechnete Membranradien.

Berechnung der mechanischen Dehnungen und Auslenkungen einer Kreismembran bei verschiedenen Drücken:

$$\text{Gleichung 8-12} \quad \varepsilon_{r, \max} = \varepsilon_{t, \max} = 3 \cdot \frac{(3 + \nu)}{8} \cdot \frac{p}{E} \cdot \left(\frac{a}{h}\right)^2$$

$$\text{Gleichung 8-13} \quad w_{\max} = \frac{3}{16} \cdot p \cdot \left(\frac{5 + \nu}{1 + \nu}\right) \cdot \frac{a^4 (1 - \nu^2)}{h^3 E}$$

Ergebnisse: mit $a_1=5,17\text{mm}$ und $a_2=2,87\text{mm}$

| \dot{V} [$\mu\text{l}/\text{min}$] | Δp_1 [Pa] | ε_1 [%] | w_1 [m] | Δp_2 [Pa] | ε_2 [%] | w_2 [m] |
|----------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------|-------------------|---------------------|-----------|
| 0,1 | 0,0136 | 3,77E-7 | 2,80E-7 | 0,0068 | 2,32E-7 | 1,06E-7 |
| 1 | 0,138 | 3,82E-6 | 2,84E-6 | 0,07 | 2,39E-6 | 1,09E-6 |
| 10 | 1,584 | 4,39E-5 | 3,25E-5 | 0,905 | 3,08E-5 | 1,41E-5 |
| 100 | 36,13 | 1,00E-3 | 7,42E-4 | 29,33 | 1,00E-3 | 4,57E-4 |

Tabelle 8-6: Berechnete mechanische Dehnungen und Auslenkungen für verschiedene Drücke bei nichtlinearer Annahme.

8.2 Anhang: Experimentell ermittelte lineare Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von aufgedampften Platin

Die lineare Relation der Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands von aufgedampften Platin ist in Abbildung 8-1 dargestellt. Für diese Messung wurde der elektrische Widerstand eines Sensors im lastfreien Zustand in einem Temperaturbereich von 20-100°C bestimmt. Zu diesem Zweck wurde der Sensor in einem Klimaofen auf unterschiedliche Temperaturen erwärmt und der dazugehörige elektrische Widerstand aufgenommen.

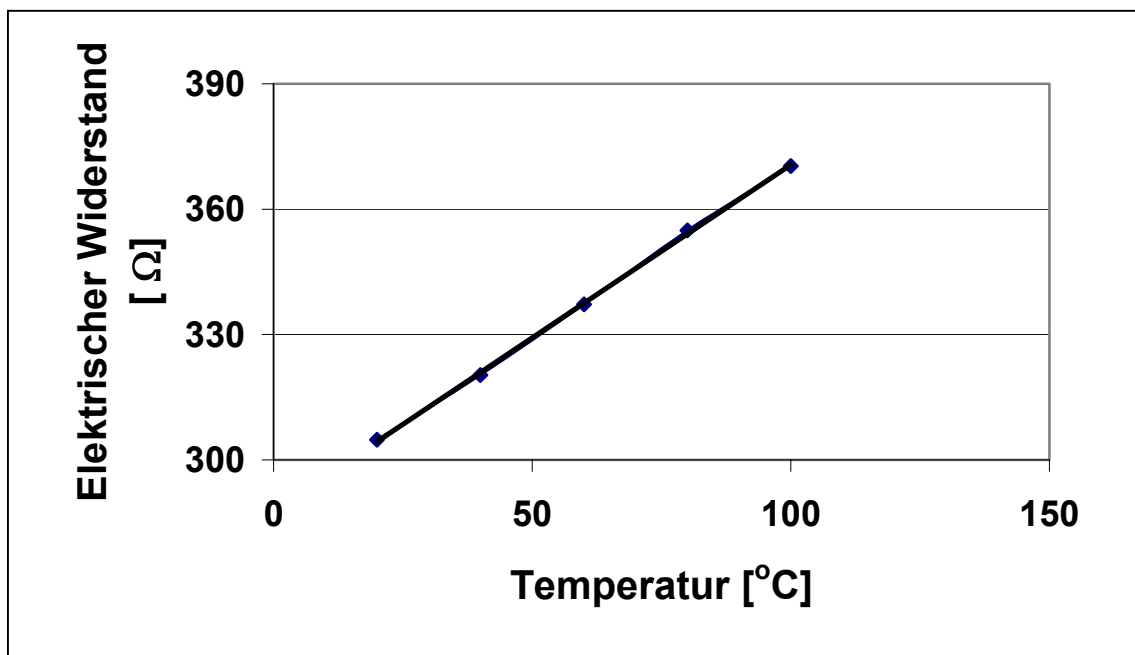


Abbildung 8-1: Experimentell ermittelter elektrischer Widerstand als Funktion der Temperatur von aufgedampften Platin.

8.3 Anhang: Thermischer Massenstrommesser nach dem kalorimetrischen Prinzip

Die Messgröße für den Durchfluss bei thermischen Massenstrommessern ist der von einem Heizer ausgehende und vom Fluid transportierte Wärmestrom. Er entspricht der aufgewendeten elektrischen Heizleistung und ist ein direktes Maß für den Massenstrom.

Gleichung 8-14
$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T = I^2 \cdot R_s = P$$

mit:

\dot{Q} = zugeführte Wärmemenge (J), \dot{m} = Massenstrom (kg / s), C_p = spezifische Wärmekapazität bei konst. Druck (kJ / kg · K)
 ΔT = Temperaturerhöhung im Fluid (K), R_s = Widerst. des Heizelements bei der Arbeitstemperatur (Ohm) I = Stromstärke (A),
 P = zugeführte Leistung (W)

Nachfolgend werden verschiedene Aufbauten zur thermischen Bestimmung des Massenstroms aufgezeigt.

Die Abbildung 8-2 zeigt einen Fluidkanal, in dem ein Heizer zwischen zwei Temperaturfühlern auf einer Membran angeordnet ist. Als Temperaturfühler werden Widerstandsthermometer und als Heizung Widerstandsdrähte verwendet. Der vom Heizelement abgeführte Wärmestrom erhöht die Fluidtemperatur, die der Fühler S2 detektiert. Die Temperaturerhöhung ΔT zwischen Temperaturfühler S1 und S2 ist bei bekannter Wärmekapazität des Messfluids ein Maß für den Massenstrom. Bei konstant gehaltener Temperaturdifferenz zwischen S1 und S2 erhält man einen linearen Zusammenhang zwischen dem Massenstrom und der zugeführten Leistung. Durch eine zusätzliche Membranschicht können die Heizelemente bzw. Temperaturfühler vor den Fluid geschützt werden.

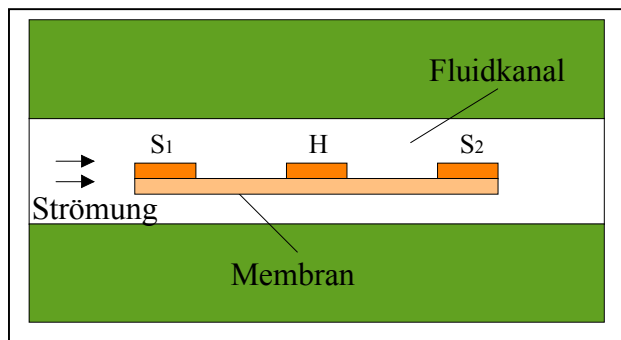


Abbildung 8-2: Schematische Darstellung eines thermischen Massenstromsensors mit einem Heizelement und zwei Temperaturfühlern.

Eine weitere günstige Messanordnung besitzt der in Abbildung 8-3 gezeigte Massenstromsensor. Durch den symmetrischen Aufbau der Heizelemente H1/2 und der Temperaturfühler T1/2 können zusätzlich Rückflüsse erkannt bzw. gemessen werden. Als Heizelemente werden massive Widerstandsheizungen, die gleichzeitig als Wärmesenke fungieren, verwendet. Die Temperaturmessung erfolgt außerhalb der Strömung mittels Widerstandsthermometern, die auf einer dünnen Membran aufgebracht sind. Dabei besteht im zu messenden Bereich Linearität zwischen dem Massenstrom und der Temperaturdifferenz [Scha76]:

$$\text{Gleichung 8-15} \quad \Delta T = K \cdot C_p \cdot \dot{m}$$

mit K =Kalibrierungskonstante

Die Funktionsweise des Sensorsprinzips wird anhand Abbildung 8-4 erläutert:

Aufgrund der elektrischen Erwärmung stellt sich ohne Strömung längs der Membran eine parabolische Temperaturverteilung mit dem Höchstwert in der Mitte ein, so dass die Temperaturdifferenz zwischen den Messstellen T1 und T2 Null ist (durchgezogene Linie/ Abbildung 8-4). Bei einsetzender Strömung verzerrt sich das Temperaturprofil infolge des Wärmetransportes und erzeugt eine dem Massenstrom proportionale Temperaturdifferenz an den Punkten T1 und T2 (gestrichelte Linie/ Abbildung 8-4). Die Heizleistungen können aufgrund der Unabhängigkeit vom Messergebnis klein gehalten werden.

Erste, nach dem kalorimetrischen Prinzip arbeitende Funktionsmuster mit symmetrischen Aufbau wurden in Einzelfertigung hergestellt. Zu diesem Zweck wurde ein Gehäuse mit integriertem Fluidkanal aus PMMA gefertigt. Als Trägerkörper diente eine 1,8 μm starke Poly-

imidmembran mit einer darauf befindlichen 60nm dünnen Goldschicht. Die auf der Membran befindlichen Widerstandsheizungen wurden mit Hilfe eines elektrisch leitenden Klebstoffs hergestellt. Abbildung 8-5 zeigt die Drauf- und Unteransicht des Funktionsmusters, wobei die mit Graphitlack schwarz eingefärbte Membran mit den Widerstandsheizungen und der in PMMA strukturierte Fluidkanal dargestellt sind. Zur praktischen Untersuchung der Temperaturverteilung während des Sensorbetriebs wurden Wärmebilder aufgenommen.

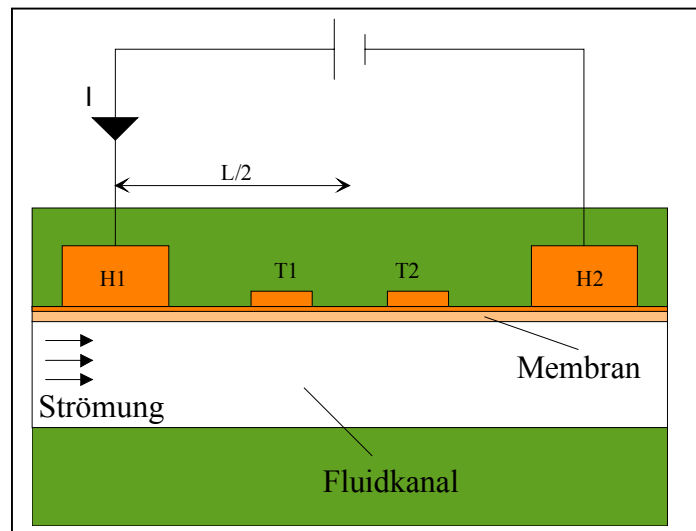


Abbildung 8-3: Thermischer Massenströmungssensor mit symmetrischem Aufbau der Sensorelemente.

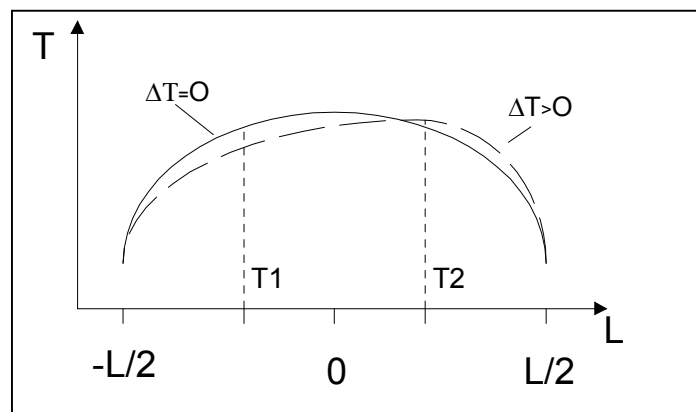


Abbildung 8-4: Temperaturverteilung über der Membran mit und ohne Strömung.

Der Versuchsaufbau zur Aufnahme von Infrarotbildern ist in Abbildung 8-6 links schematisch dargestellt. Das Ersatzschaltbild des Sensors (a) zeigt seine verschiedenen Komponenten (siehe Abbildung 8-6 rechts). Über einen Strom aus einer Konstantstromquelle (b) wird die Membran erwärmt. Aus einer Gasflasche (c) wird das System mit Stickstoff versorgt. Der Volumenstrom wird mit Hilfe einer Drossel (e) fest eingestellt und mit einem Durchflussmesser (f) kontrolliert. Die Absoluttemperaturen und die Temperaturverteilungen der Membranoberfläche werden bei verschiedenen Volumenströmen mit Hilfe der Wärmebildkamera aufgenommen. Die fluidische Abdichtung des Kanals erfolgte aus messtechnischen Gründen mit einer $2\mu\text{m}$ dünnen Membran.

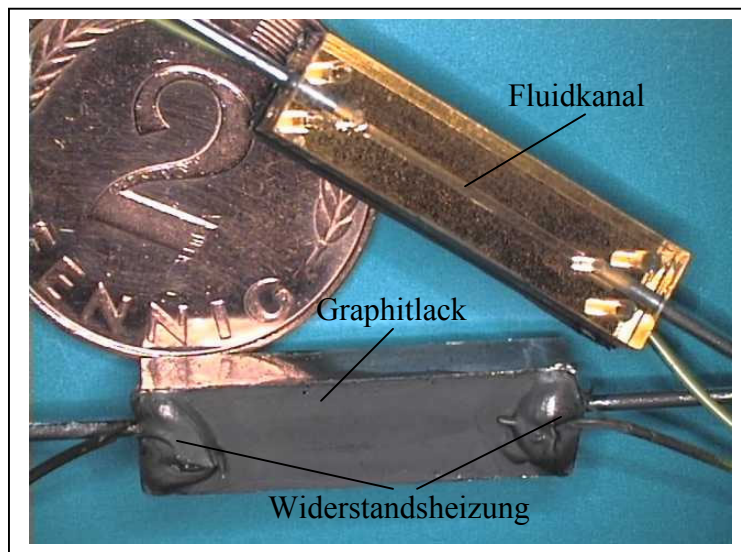


Abbildung 8-5: Erste Funktionsmuster des thermischen Massenströmsensors mit symmetrischem Aufbau der Funktionselemente.

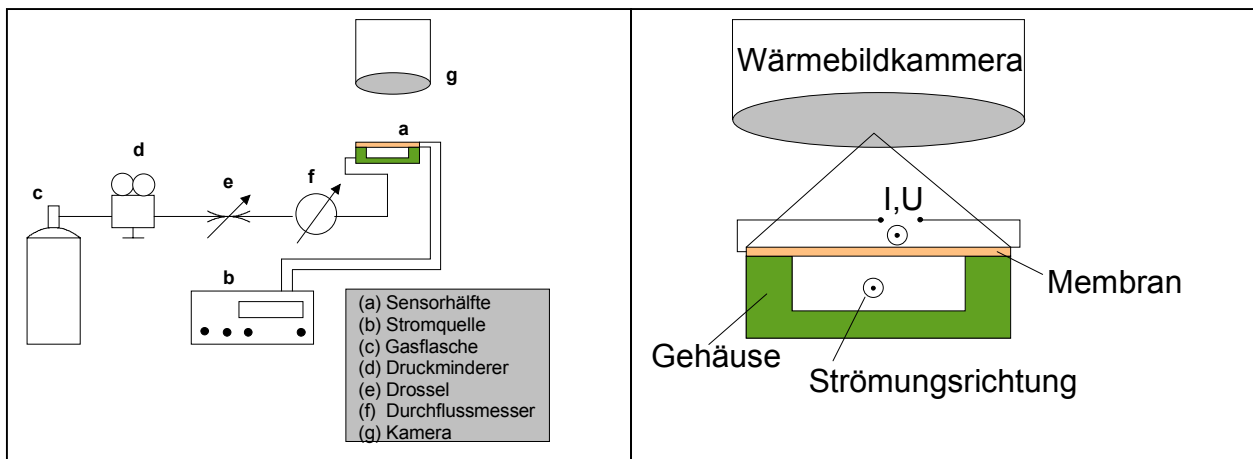


Abbildung 8-6: links: Schematische Darstellung des Messaufbaus für Wärmebilder. rechts: Schematische Darstellung des Massenströmsensors für Wärmebilder.

Die Temperaturen wurden an fünf verschiedenen Punkten entlang des Strömungskanals gemessen (siehe Abbildung 8-7). Dabei liegt Punkt 1 in der Nähe des fluidischen Einlasses und Punkt 5 am Auslass des Kanals.

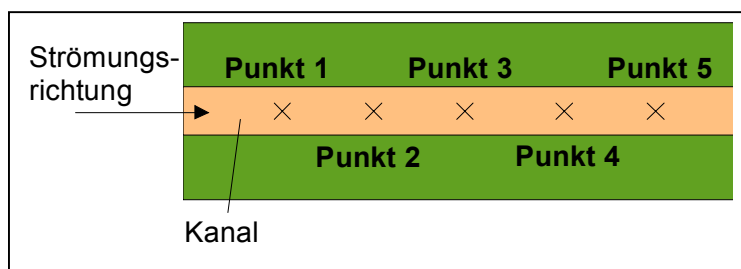


Abbildung 8-7: Schematische Darstellung des Sensors in Draufsicht mit den fünf Punkten der Temperaturmessung auf der Membran.

Die Abbildung 8-8 und Abbildung 8-9 zeigen Wärmebilder, die mit dem beschriebenen Messaufbau aufgenommen wurden.

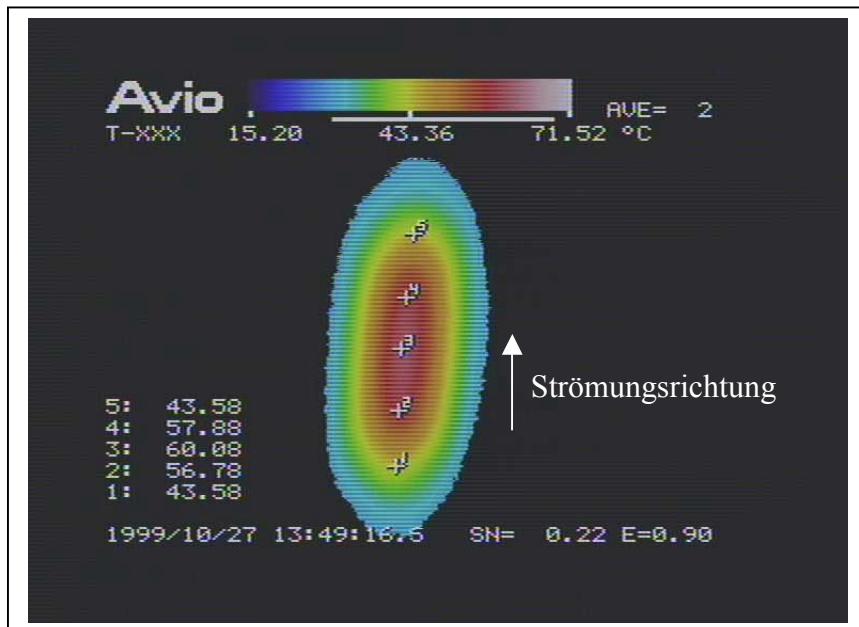


Abbildung 8-8: Wärmebildaufnahme bei einem Volumenstrom von 0sccm.

In Abbildung 8-8 erkennt man die symmetrische Temperaturverteilung über der Membran mit dem Höchstwert in der Mitte bei Punkt 3. Die Absoluttemperaturen an den Punkten 1 und 5 sind identisch und liegen aufgrund der großen Masse der Widerstandsheizung unter den Temperaturwerten der übrigen Punkte. Bei einem Volumenstrom von 300 sccm stellt sich eine in Abbildung 8-9 dargestellte allgemeine Temperaturabsenkung sowie eine Temperaturverschiebung in Strömungsrichtung ein. Nachdem der Volumenstrom wieder auf 0 sccm geregelt wurde, herrscht wieder eine symmetrische Temperaturverteilung, wie sie in Abbildung 8-8 gezeigt ist.

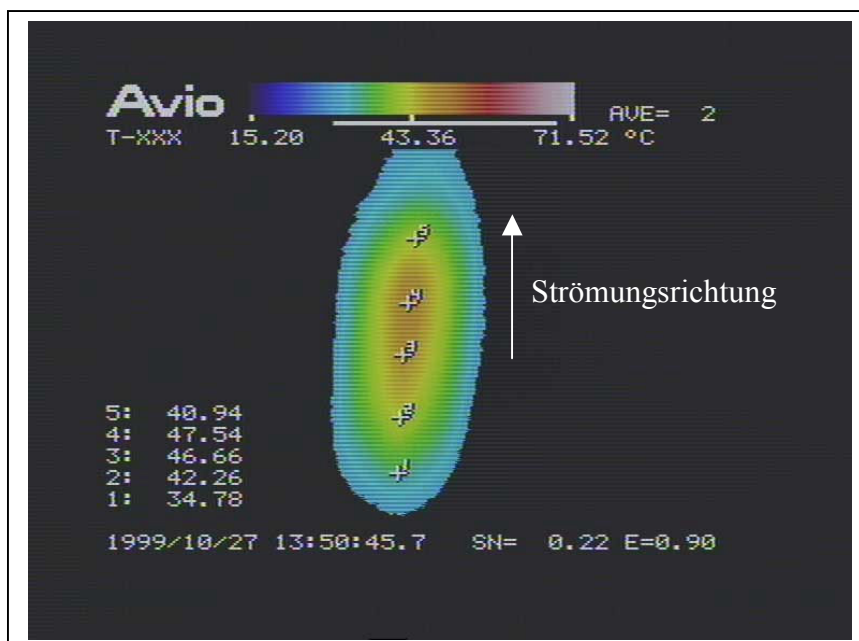


Abbildung 8-9: Wärmebildaufnahme bei einem Volumenstrom von 300sccm.

Eine graphische Darstellung der Messergebnisse ist in Abbildung 8-10 gezeigt. Vergleicht man diese Kurven mit denen aus Abbildung 8-4, ist eine ähnliche Temperaturverschiebung zu erkennen.

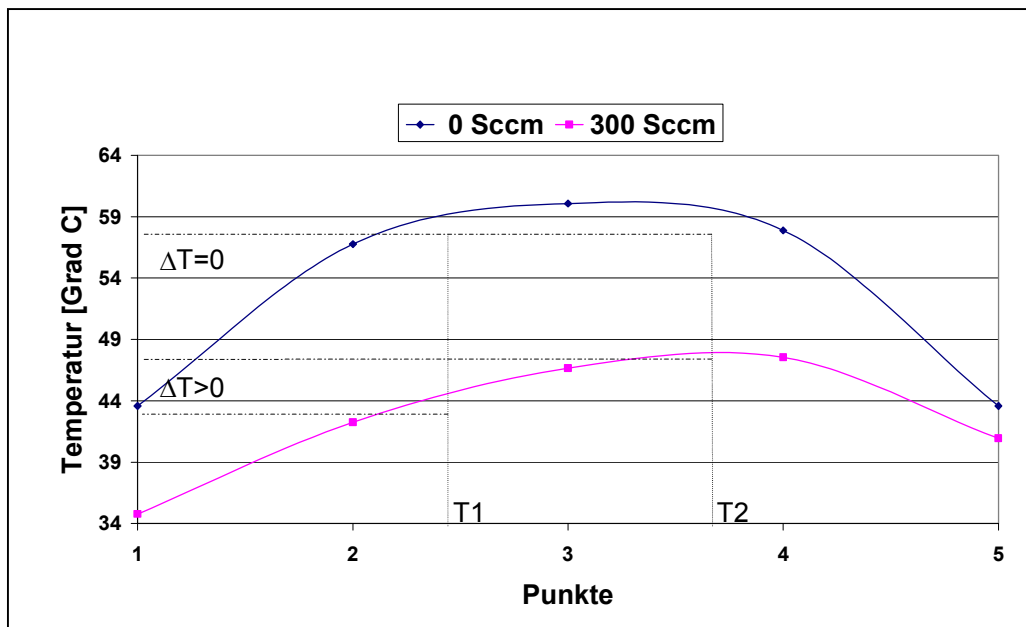


Abbildung 8-10: Graphische Darstellung der mit der Wärmebildkamera aufgenommenen Messwerte.

8.4 Anhang: Simulation des Sensors mit der Methode der finiten Elemente (FEM)

Zur Bestimmung der Temperaturverteilung bei vorgegebener Stromdichte sind drei Rechenschritte erforderlich:

1. Bestimmung der elektrischen Stromdichte: Hierzu wurde das Programm Tosca [Vector] verwendet.
2. Bestimmung der elektrischen Heizleistung anhand der Stromdichte: Dies wurde mit dem am Institut für Mikrostrukturtechnik (IMT) des Forschungszentrum Karlsruhe entwickelten Programm Script-Tosca [Krev98] durchgeführt. Diese Programm führt darüber hinaus die Umsetzung der Materialparameter und Randbedingungen vom elektrischen zum thermischen Problem durch.
3. Berechnung der Temperaturverteilung: Diese wurde mit einer am IMT modifizierten Version von Tosca durchgeführt. Dazu wurden die geschwindigkeitsabhängigen Terme der Systemmatrix hinzugefügt und damit eine neue Lösungsroutine für das hieraus resultierende nicht symmetrische Gleichungssystem eingebaut (bikonjugiertes Gradientenverfahren).

Der gesamte Rechenvorgang wird in einer Datei dokumentiert, anhand dessen ein am IMT entwickeltes Steuerprogramm den kompletten Ablauf automatisch durchführt [Krev98]. Im Simulationsprogramm Tosca wird die Methode der Finiten Elemente von Galerkin verwendet

(Die Ansatzfunktion für die zu berechnende physikalische Größe und die Gewichtsfunktionen sind gleich).

Das verwendete FEM-Model besteht aus 40000 Elementen. Diese hohe Zahl ist notwendig, da die Güte der Lösung von der Peclet-Zahl $\gamma = \rho * c_p * c * dl / K$ abhängig ist, die durch das Verhältnis der Elementlänge in Strömungsrichtung dl und der Wärmeleitfähigkeit K des strömenden Mediums bestimmt wird. Hierbei ist ρ die spezifische Dichte, c_p die spezifische Wärmekapazität und c die Strömungsgeschwindigkeit in Richtung von dl . Für Wasser gilt: $\rho = 10^{-3} \text{G/mm}^3$, $c_p = 4.2 \text{ J/g}$, $K = 0.6 \cdot 10^{-3} \text{ W/(mm K)}$.

Um eine gute Lösung zu erhalten, sollte die Peclet-Zahl bei Verwendung der Methode von Galerkin < 2 sein. Da für ein bestimmtes Medium bis auf dl alle Größen vorgegeben sind, lässt sich diese Bedingung nur durch ein kleines dl erreichen. Für das Model wurde ein Strömungskanal mit einer Länge von $L = 9.6 \text{ mm}$ (x-Richtung) verwendet. Für $\gamma = 1$ ist bei einem Volumenstrom von $20 \mu\text{l/min}$ eine Unterteilung von L um einen Faktor 100 erforderlich. Zur Berechnung größerer Volumenströme müssten die Elementbeiträge in Strömungsrichtung stärker gewichtet werden (Upwindung). Dies ist in das Programm noch nicht eingebaut.

Anstelle des mäanderförmigen Heizdrahts wurde ein homogenes Heizelement mit einer um einen Faktor 100 vergrößerten Dicke verwendet. Diese Maßnahme ist mit der Verbesserung des Aspektverhältnisses in den "Finiten Elementen" begründet. Zum Ausgleich dafür wurde die Wärmeleitfähigkeit um den entsprechenden Faktor erhöht. Die Dicke der Trägerschicht wurde auch entsprechend um ein Faktor 10 erhöht. Wie in Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23 dargestellt, ändert sich die Temperatur senkrecht zur Kanalebene (xy-Ebene) für einen Volumenstrom von $0 \mu\text{l/min}$ um weniger als 1%. Darüber hinaus änderte eine Variation der Wärmeleitfähigkeit der Trägerschicht um einen Faktor 10 die Temperaturverteilung um weniger als 1%. Dies lässt die Aussage zu, dass bei einem Volumenstrom von $0 \mu\text{l/min}$ die Wärmeleitfähigkeit, wegen der geringen Ausdehnung in z-Richtung, eine untergeordnete Rolle spielt. Der dominierende Einfluss bei diesem Volumenstrom ist die konvektive Kühlung an den Randflächen, die durch die umgebende Luft hervorgerufen wird. Diese wird durch eine gemischte Randbedingung der Form $q = h * (T - T_u)$ berücksichtigt. Der Wert des Wärmeübergangskoeffizienten h wurde durch Fitten an das experimentelle Ergebnis für einen Heizstrom von 2.5 mA und Volumenstrom von $0 \mu\text{l/min}$ zu $h = 80 \text{ W/(K m}^2)$ bestimmt. Die Temperatur T_u der umgebenden Luft wurde auf $27 \text{ }^\circ\text{C}$ gesetzt. Bei einem Volumenstrom von $16 \mu\text{l/min}$ führte eine Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit der Trägerschicht um einen Faktor 10 gegenüber dem in Tabelle 8-7 aufgeführten Wert zu einer 18% geringeren Temperaturerhöhung. Bei ansteigendem Volumenstrom verringern sich jedoch die berechneten Temperaturen gegenüber den experimentell ermittelten Werten schneller. Dies kann durch eine Überschätzung der Wärmeleitfähigkeit in der Trägerschicht und die ideale Annahme eines homogenen Geschwindigkeitsprofils im Kanal hervorgerufen werden.

| | Elektrische Leitfähigkeit [A/(V*mm)] | Thermische Leitfähigkeit [W/(mm*K)] |
|-------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------|
| Wasser (im Kanal) | 2.22e-10 | 0.6e-3 |
| Trägerkörper | 1.11e-10 | 1.2 10-4 |
| Heizelement | 8808 | 0.28 |
| Kanalabdeckung | 1.11e-10 | 20.e-4 |
| Gehäuse | 3.33e-10 | 2.0e-4 |

Tabelle 8-7: Berechnete elektrische und thermische Leitfähigkeiten.