

# Galvanisch erzeugte Mikro- und Nanodrähte für die Gasflusssensorik

**Electro deposited Mikro- and Nanowires for Gas Flow Sensors**

Zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Sebastian Quednau aus Königs Wusterhausen

Tag der Einreichung: 09.07.2015, Tag der Prüfung: 20.11.2015

Darmstadt 2016 — D 17

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
2. Gutachten: Prof. Dr. Wolfgang Ensinger



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

Fachbereich Elektrotechnik und Infor-  
mationstechnik  
Institut für Elektromechanische Kon-  
struktionen

Galvanisch erzeugte Mikro- und Nanodrähte für die Gasflusssensorik  
Electro deposited Mikro- and Nanowires for Gas Flow Sensors

Genehmigte Dissertation von Dipl.-Ing. Sebastian Quednau aus Königs Wusterhausen

1. Gutachten: Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak
2. Gutachten: Prof. Dr. Wolfgang Ensinger

Tag der Einreichung: 09.07.2015

Tag der Prüfung: 20.11.2015

Darmstadt – D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-53311

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/5331>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

[tuprints@ulb.tu-darmstadt.de](mailto:tuprints@ulb.tu-darmstadt.de)



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Keine kommerzielle Nutzung – Keine Bearbeitung 3.0 Deutschland

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/de/>

---

## Erklärung zur Dissertation

---

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 23. Februar 2016

---

(S. Quednau)



---

## Vorwort

---

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Elektromechanische Konstruktionen der Technischen Universität Darmstadt. Ermöglicht wurde mir die Arbeit durch die Finanzierung mehrerer Projekte durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF). Insbesondere das Projekt „3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasfluss-sensorik - 3-DOING“ (FKZ 16SV5476) hat wesentlich zu Forschungsergebnissen beigetragen.

Ich bedanke mich herzlich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut F. Schlaak, der mir viel Freiraum während meiner Arbeiten einräumte und sich stets offen gegenüber neuen Ideen zeigte. Dadurch wurde es mir ermöglicht auch unkonventionelle Lösungsansätze zu erproben, welche mich schließlich zum Ergebnis dieser Arbeit geführt haben.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr. Wolfgang Ensinger für die Übernahme des Korreferats und dem der Arbeit entgegengebrachten Interesse bedanken. Die Zusammenarbeit und vor allem die Entwicklung neuer Projektideen hat mir sehr viel Freude bereitet.

Nicht zuletzt danke ich allen Mitarbeitern des Instituts für die vielen offenen und konstruktiven Diskussionen. Insbesondere den Mitarbeitern der MNI-Gruppe, Florian Dassinger und Farough Roustaie, danke ich für die vielen Monate innovativen und kreativen, gemeinsamen Schaffens.

Besonderer Dank gilt Herrn Bernhard Jochem, der für technologische Problemstellungen immer eine Lösung bereithielt und durch seine Erfahrungen sowie viel Engagement den Reinraumbetrieb am Institut ermöglicht. Ebenso danke ich dem Werkstatt-Team des Institutes, die so manches Mal mit kurzfristigen Arbeiten eingesprungen sind.

Meine Familie, angeboren wie angeheiratet, danke ich für die Begeisterung für meine Arbeit, auch wenn sie für nicht immer für alle nachvollziehbar war. Der größte Dank gilt meiner Frau Sarah, die durch ihre Geduld, ihr Einfühlungsvermögen und ihre Zuversicht dafür gesorgt hat, dass auch Fehlschläge mich nicht entmutigt haben, das Thema weiter zu verfolgen. Und nicht zuletzt hat das Lächeln meiner Tochter Emilia mir die Kraft gegeben, die Herausforderungen zu meistern und die Arbeit zum Abschluss zu bringen.

Darmstadt, im Juli 2015

Sebastian Quednau



---

## Zusammenfassung

---

Metallische Drähte, deren Querschnitte Abmessungen von weniger als  $1\ \mu\text{m}$  aufweisen, besitzen Eigenschaften, die sie zur Verwendung als sensitive Elemente in Mikrosystemen interessant machen. Besonders das sehr hohe Oberflächen- / Volumenverhältnis der Drähte prädestiniert sie zur Verwendung in thermischen Sensoren, wie kalorimetrischen Strömungssensoren. Diese Arbeit stellt einen Ansatz vor, der eine Vor-Ort-Erzeugung von metallischen Drähten mit Abmessungen im Submikrometer-Bereich direkt im Mikrosystem ermöglicht. Den gesamten Themenkomplex bezeichnet man daher als *Mikro-Nano-Integration*. Die in dieser Arbeit entwickelten Prozesse sind allesamt Bottom-Up-Verfahren. Das heißt, sie verfolgen nicht die aufwändige und kostenintensive Miniaturisierung bestehender Technologien, sondern setzen auf neue, selbstorganisierende Ansätze. Demonstriert werden die neu entwickelten Technologien an der Realisierung eines kalorimetrischen Strömungssensors. Der Sensor profitiert von dem hohen Oberflächen- / Volumen-Verhältnis. Eine deutliche Verringerung der Ansprechzeit gegenüber konventionellen Sensoren ist das Resultat. Ein möglicher Einsatzzweck solcher Strömungssensoren ist eine photoakustische Messzelle.

Die Arbeit beginnt mit einer umfangreichen Darstellung des aktuellen Standes von Forschung und Technik. Dabei werden realisierte thermische Sensoren in einem Zeitraum von 1974 bis heute betrachtet. Die Kennwerte der Sensoren werden tabellarisch gegenüber gestellt. Anschließend werden Prozesse zur Integration metallischer Mikro- und Nanodrähte vorgestellt und miteinander verglichen. Darauf aufbauend wird ein Konzept zur Vor-Ort-Erzeugung von metallischen Mikro- und Nanodrähten entwickelt und demonstriert. Das Verfahren ist eine konsequente Fortsetzung des Ionenspurätzverfahrens, welches seit Jahrzehnten zur Erzeugung von Mikro- und Nanodrähten eingesetzt wird. Technologisch bedingt lassen sich dabei keine einzelnen Drähte, sondern nur Drahtverbünde (sog. *Arrays*) herstellen, die je nach Abmessung aus nur wenigen ( $< 10$ ) oder auch aus Milliarden von Drähten (sog. Nanorasen) bestehen können. Die Drähte sind dabei immer Senkrecht zum Substrat angeordnet. Das Verfahren ermöglicht es, Drähte mit Durchmessern von  $100\ \text{nm}$  bis zu einigen  $\mu\text{m}$  herzustellen. Die Drahtlänge kann dabei von faktisch  $0$  bis zu  $100\ \mu\text{m}$  variiert werden. Die Anzahl der Drähte pro Flächeneinheit (*Drahtdichte*) kann von  $10^6$  Drähten pro  $\text{cm}^2$  bis zu  $6 \cdot 10^8$  Drähten pro  $\text{cm}^2$  eingestellt werden. Auf die galvanische Erzeugung der Drähte und die dazu realisierte technische Ausrüstung wird detailliert eingegangen.

Da die mit dem Ionenspurätzverfahren hergestellten Drähte jedoch nicht geeignet sind, um einen hochsensitiven und gleichzeitig schnellen kalorimetrischen Strömungssensor aufzubauen, wird ein weiteres Verfahren, das sog. Ätzkantenverfahren, adaptiert und weiterentwickelt. Dieses ermöglicht die Herstellung einzelner Drähte, die horizontal über ein Substrat aufgehängt sind. Diese Drähte können prinzipiell beliebig lang sein, in dieser Arbeit wurden Längen von  $700\ \mu\text{m}$  realisiert. Technologisch bedingt weisen die so hergestellten Drähte einen rechteckigen Querschnitt auf, der in dieser Arbeit minimal  $0,2 \times 2\ \mu\text{m}^2$  beträgt, jedoch weiter verringerbar ist. Die Drähte weisen sehr gute Eigenschaften für die Verwendung in kalorimetrischen Strömungssensoren auf.

Um die Drähte als sensitive Elemente in kalorimetrischen Sensoren einsetzen zu können wurden Konzepte zur Modellierung entwickelt. Da die Abmessungen der Drähte bereits im Bereich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle liegen, können keine etablierten Modellierungsprogramme verwendet werden. Daher wird ein Lösungsalgorithmus vorgestellt, der den Wärmeaustausch unter Berücksichtigung von Slip-Randbedingungen zwischen den Drähten und dem umgebenden Medium modelliert. Die Berechnung setzt dabei die Finite Volumen Methode (*FVM*) ein. Der Algorithmus wurde an einem bestehenden Vakuumsensor der Hochschule Rhein-Main in Rüsselsheim validiert und steht in sehr guter Übereinstimmung mit den Messwerten. Die Algorithmen wurden allesamt in OpenFOAM implementiert. Eine weitere Herausforderung sind die skalenübergreifenden Größenverhältnisse in den Sensoren. So

---

liegt das Größenverhältnis zwischen den Drähten als funktionelle Elemente und dem Strömungskanal des Sensors bei 350000:1, was eine Herausforderung bei der Erstellung der Rechenetze ist.

Aufbauend auf den Herstellungsprozessen und der numerischen Modellierung wurden Sensorkonzepte entwickelt und realisiert. Dabei wurden sowohl Demonstratoren für das Ionenspurätzverfahren als auch für das Ätzkantengalvanikverfahren realisiert und die stationäre Kennlinie von 0..1000 sccm ermittelt. Beide Systeme liefern Messwerte in guter Übereinstimmung mit den vorher durchgeführten Simulationen. Die Demonstratoren aus dem Ätzkantengalvanikverfahren wurden zudem noch dynamisch mit Hilfe eines Lautsprechers von 0..700 Hz charakterisiert. Frequenzen von 0,05 bis 500 Hz konnten ohne weiteres nachgewiesen werden.

Die Arbeit schließt mit einem Ausblick, der das hohe Potential der entwickelten Mikro-Nano-Integrationsprozesse darlegt. So werden Anwendungen dargestellt, die von der Nutzung metallischer Mikro- und Nanodrähte profitieren können, wie z.B. BioMEMS oder chemische Sensoren. Der Anhang der Arbeit gibt einen tiefen Einblick in die Programmierlogik der verwendeten Software OpenFOAM.

---

## Abstract

---

Metallic wires with diameters of less than  $1\ \mu\text{m}$  have several properties that make them attractive as functional parts in microsystems. For example, they can be used as temperature sensitive elements in thermal gas flow sensors due to their extremely high surface / volume ratio. A process for the in-place synthesis of metallic nanowires is developed and presented in this work, which is part of a topic called "Micro-Nano-Integration". The bottom-up methods developed within this work make use of smart self-organizing processes instead of complex and expensive miniaturized conventional technologies. A gas flow sensor is built to demonstrate the benefits of nanowires. Nanowires in gas flow sensors enable a much faster response time compared to conventional fabricated ones. Photoacoustic gas analysis is identified as a potential field of use.

The first part of this work is the presentation of the current state of research and technology in the field of micro machined thermal gas flow sensors and the fabrication and integration of metallic nanowires. The characteristic parameters of the sensors are listed in tables enabling a fast comparison of the working principles, fabrication technologies and measurement performances. Based on the current state of research a concept for the galvanic in-place synthesis of metallic nanowires is developed continuing a long term development of the fabrication of nanowires in ion track etched polymer membranes. The developed fabrication process enables the synthesis of bunches of nanowires arranged perpendicular to the substrate, the so called nanowire arrays. Single nanowires cannot be fabricated but the number of wires inside such an array ranges from only a few wires to billions of them. The diameter of the wires is given by the used polymer template and can be varied between 100 nm and some microns. The maximum length of the wires is limited by the thickness of used template. Thus the wire length can be adjusted between 0 and  $100\ \mu\text{m}$ . The number of wires per unit area depends on the pore density in the template and ranges from  $10^6$  to  $6 \times 10^8$  wires per square centimeter. The process and the used equipment are described in detail.

The nanowire arrays enabled by ion track etch process are not suitable for gas flow sensors demanding single nanowires. Thus a process for the fabrication of single nanowires for use in gas flow sensors is described. This process is a further development of the etch step decoration process known from literature. The length of the horizontally spanned wires is in principal unlimited, in this work a wire length up to  $700\ \mu\text{m}$  was realized. The technology enables wires with a rectangular cross section. Wires fabricated within this work have a minimal cross section of  $0.2 \times 2\ \mu\text{m}^2$ . The process allows much smaller cross sections.

Beside the development of suitable fabrication processes, concepts for the mathematical modelling of heat transfer in nanowires have been developed. Due to their small dimensions, which are in the same magnitude than the mean free path of air, conventional models with no-slip boundary conditions tend to fail. Therefore the developed algorithm uses slip boundary conditions to model the conjugate heat transfer between the nanowires inside the device and the surrounding gas. The algorithm is based on the finite volume method (FVM) and implemented in OpenFOAM. Challenging for the generation of the computational grid is the ratio between the characteristic size the gas flow channel and the diameter of the wires, which is 350.000:1. The results of the numerical modeling were used to design thermal gas flow sensors using nanowires as temperature sensitive elements. Demonstrators for both types of nanowires were fabricated and tested. The characteristic from 0..1000 scfm was recorded. For the etch step type nanowires a dynamic test with a frequency range from 0.05 to 700 Hz was performed. Frequencies up to 500 Hz can reliably be detected.

The work concludes with an outlook, which points out the high potential of the developed micro-nano-integration processes for several products. Applications are shown, which can benefit from the use of

---

metallic micro- and nanowires, e.g. BioMEMS or chemical sensors. The appendix provides a deep insight into the programming logic of the software OpenFOAM.

---

## Inhaltsverzeichnis

---

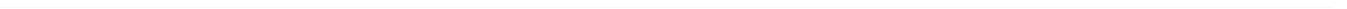
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Mikrosystemtechnische Strömungssensoren . . . . .	1
1.2	Thermische Strömungsmessung . . . . .	3
1.3	Integration metallischer Nanodrähte . . . . .	6
1.4	Struktur und Ziele der Arbeit . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Stand der Technik in der thermischen Strömungsmesstechnik</b>	<b>9</b>
2.1	Konventionelle Strömungssensoren . . . . .	9
2.1.1	Hitzdrahtanemometrie . . . . .	9
2.1.1.1	Herstellung der Drähte für Hitzdrahtanemometer . . . . .	10
2.1.1.2	Einsatz von Hitzdrahtanemometern . . . . .	11
2.1.2	Andere konventionelle thermische Strömungssensoren . . . . .	11
2.1.3	Zusammenfassung . . . . .	12
2.2	Mikrotechnische Strömungssensoren . . . . .	12
2.2.1	Sensoren mit Heiz- und Messelement direkt auf dem Substrat . . . . .	13
2.2.2	Sensoren, mit Heiz- und Messelement auf einer Membran . . . . .	15
2.2.2.1	Bulk-Mikromechanik . . . . .	15
2.2.2.2	Oberflächenmikromechanik . . . . .	18
2.2.3	Sensoren mit freischwebenden Drähten . . . . .	19
2.2.4	Messelemente zur Erfassung oszillierender Strömungen . . . . .	21
2.3	Fazit . . . . .	23
<b>3</b>	<b>Verfahren zur Integration metallischer Nanodrähte</b>	<b>25</b>
3.1	Das Ionenspurätzverfahren zur Erzeugung von Drähten mit Durchmesser im Nanometerbereich . . . . .	25
3.2	Integrationsverfahren für Drähte aus dem Ionenspurätzverfahren . . . . .	26
<b>4</b>	<b>Modellierung thermischer Strömungssensoren</b>	<b>31</b>
4.1	Wärmebilanz eines beheizten Drahtes . . . . .	31
4.1.1	Zeitabhängige Erwärmung . . . . .	33
4.2	Modellierung der Wärmeverteilung in langen Drähten . . . . .	34
4.2.1	Diskretisierung der eindimensionalen Poissongleichung . . . . .	36
4.2.2	Einarbeiten der Randbedingungen . . . . .	37
4.2.3	Aufstellen der Steifigkeitsmatrix . . . . .	39
4.2.4	Berücksichtigung der Wärmeab- oder Zufuhr durch Luft . . . . .	39
4.2.5	Zeitliche Abhängigkeit . . . . .	40
4.2.6	Berücksichtigung der elektrischen Größen . . . . .	41
4.2.7	Erwärmung durch konstanten Strom . . . . .	41
4.2.7.1	Implizite Implementierung . . . . .	42
4.2.7.2	Explizite Implementierung . . . . .	42
4.2.7.3	Ableiten anderer elektrischer Größen . . . . .	42
4.2.8	Erwärmung durch konstante Spannung . . . . .	43
4.2.9	Berechnungsbeispiele . . . . .	44
4.2.9.1	Abhängigkeit der Drahttemperatur von der Strömungsgeschwindigkeit . . . . .	44
4.2.9.2	Transientes Verhalten von Drähten . . . . .	46

4.2.10	Fazit . . . . .	47
4.3	Numerische Simulation mittels Finiter Volumen Methode . . . . .	48
4.3.1	Verwendete Gleichungen . . . . .	48
4.3.2	Ablauf einer Strömungssimulation . . . . .	50
4.3.3	Finite Volumen Berechnung mit OpenFOAM . . . . .	51
4.3.4	Kopplung zwischen Festkörper und Gas . . . . .	52
4.3.5	Modellierung von Strömungen durch nanoskalige Strukturen . . . . .	54
4.3.5.1	Slip-Randbedingungen für die Navier-Stokes-Gleichungen . . . . .	56
4.3.6	Validierung des Lösungsalgorithmus anhand eines Pirani-Drucksensors . . . . .	57
4.4	Modellierung des photoakustischen Effekts . . . . .	63
4.5	Fazit zu den Modellierungsmethoden . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Vor-Ort-Synthese von Mikro- und Nanodrähten</b>	<b>69</b>
5.1	Das Ionenspurätzverfahren . . . . .	69
5.2	Anforderungen an den Integrationsprozess . . . . .	70
5.3	Ausgangssituation der Integrationsverfahren . . . . .	71
5.4	Prozessablauf zur Vor-Ort-Erzeugung der Nanodrahtarrays . . . . .	72
5.4.1	Herstellung der Startelektroden und Leiterbahnen . . . . .	73
5.4.1.1	Strukturierung durch Ätzen eines Chrom-Nickel-Schichtverbundes . . . . .	73
5.4.1.2	Direktes Aufdampfen und Strukturieren einer Goldschicht . . . . .	76
5.4.2	Aufbringen der Folie auf das Substrat . . . . .	77
5.4.2.1	Thermische Lamination mit Schmelzklebefolie . . . . .	77
5.4.2.2	Thermische Lamination mit Positiv-Photoresist . . . . .	81
5.4.2.3	Lamination mit Lösungsmittelunterstützung . . . . .	84
5.4.2.4	Zusammenfassung der Prozesse zur Folienintegration . . . . .	86
5.5	Galvanische Erzeugung der Nanodrähte . . . . .	88
5.5.1	Grundlagen der galvanischen Abscheidung . . . . .	88
5.5.2	Puls- und Umkehrpulsabscheidung . . . . .	91
5.5.3	Anlage zur Durchführung der Abscheidung . . . . .	92
5.5.3.1	Galvanikzelle zur Erzeugung von Nanodrähten auf 4“-Substraten . . . . .	93
5.5.3.2	Anlage zur Steuerung der Abscheidung . . . . .	93
5.5.4	Benetzung der Template . . . . .	95
5.5.5	Abscheidung der Nanodrähte in den Templaten . . . . .	97
5.5.5.1	Phasen bei der Abscheidung . . . . .	97
5.5.5.2	Parameter für die Abscheidung . . . . .	99
5.6	Reihenschaltung mehrerer Nanodrahtarrays . . . . .	102
5.7	Entfernen des Templates . . . . .	104
5.8	Vereinzeln der Chips . . . . .	106
5.9	Alternativer Prozess zur Herstellung von Nanodrähten für die Gasflusssensorik . . . . .	106
5.9.1	Prozess der Ätzkantengalvanik . . . . .	106
5.9.2	Fazit . . . . .	110
<b>6</b>	<b>Konzipierung und Auslegung von Strömungssensoren mit galvanisch erzeugten Drähten</b>	<b>113</b>
6.1	Konzept für einen Strömungssensor mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren . . . . .	113
6.1.1	Layout des Strömungssensors . . . . .	114
6.2	Konzept für einen Strömungssensor mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren . . . . .	116
6.2.1	Layout des Strömungssensors . . . . .	116
6.3	Elektrische Kontaktierung der Sensorelemente sowie Platzierung im Strömungskanal . . . . .	118
6.4	Konzept für den Strömungskanal . . . . .	119
6.4.1	Auslegung des Strömungskanals . . . . .	120

6.4.2	Berechnung der Temperaturverteilung im Strömungskanal zur optimalen Platzierung der Temperaturmeselemente . . . . .	121
6.4.3	Einfluss der Submikrodrahtarrays . . . . .	127
6.5	Sensoren und Strömungskanal der zweiten Generation . . . . .	131
6.5.1	Strömungsprofil des Kanals der zweiten Generation . . . . .	131
6.5.2	Temperaturverteilung . . . . .	133
6.6	Konzept zur dynamischen Charakterisierung . . . . .	136
<b>7</b>	<b>Aufbau und Charakterisierung von Technologiedemonstratoren</b>	<b>137</b>
7.1	Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands . . . . .	137
7.2	Statische Kennlinie des Sensorelementes im Strömungskanal der ersten Generation . . . . .	138
7.2.1	Sensorelemente mit Nanodrahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren . . . . .	139
7.2.2	Sensorelemente mit Submikrodrahten aus dem Ätzkantenverfahren . . . . .	141
7.2.3	Fazit aus der Erfassung der statischen Kennlinie . . . . .	144
7.3	Charakterisierung von Mustern der zweiten Generation . . . . .	145
7.3.1	Sensorelektronik . . . . .	145
7.3.2	Statische Kennlinie . . . . .	146
7.3.3	Dynamische Charakterisierung . . . . .	147
7.3.3.1	Frequenzen bis 1 Hz . . . . .	147
7.3.3.2	Dynamische Charakterisierung für höhere Frequenzen . . . . .	149
7.4	Fazit . . . . .	151
<b>8</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>153</b>
8.1	Ergebnisse und Möglichkeiten des Ionenspurätzverfahrens . . . . .	153
8.1.1	Weitere Anwendungen für das Ionenspurätzverfahren . . . . .	155
8.2	Strömungssensoren mit Drähten aus dem Ätzflankengalvanikverfahren . . . . .	156
8.3	Strömungsmodellierung . . . . .	157
<b>9</b>	<b>Literatur</b>	<b>161</b>
<b>A</b>	<b>Ergänzungen zur Finite Volumen Modellierung</b>	<b>171</b>
A.1	Prinzip der Finiten Volumen Methode . . . . .	171
A.1.1	Diskretisierung des konvektiven Terms . . . . .	171
A.1.2	Diskretisierung des diffusiven Terms . . . . .	172
A.1.3	Gleichungssystem . . . . .	172
A.1.4	Zeitdiskretisierung . . . . .	172
A.2	Darstellung der Differentialgleichungen in OpenFOAM . . . . .	173
A.3	Kopplung von Druck und Geschwindigkeit, Druckkorrekturverfahren . . . . .	174
A.4	Implementierung des Photoakustischen Effektes . . . . .	174
A.5	Randbedingungen in OpenFOAM . . . . .	176
A.6	Solver für 2-Regionen-Simulation . . . . .	177
A.7	Aufbau von OpenFOAM-Cases . . . . .	182
A.8	Parameter der in der Arbeit durchgeführten Simulationen . . . . .	182
A.8.1	Modellierung des Piranisensors nach Abschnitt 4.3.6 . . . . .	183
A.8.2	Modellierung des Strömungskanals der ersten Generation nach Abschnitt 6.4.1 . . . . .	191
A.8.3	Modellierung des Strömungssensors unter Berücksichtigung der Drahtarrays nach Abschnitt 6.4.3 . . . . .	202
A.8.4	Modellierung des Photoakustischen Effektes nach Abschnitt 4.4 . . . . .	213
A.9	Aufteilung auf mehrere Prozessoren . . . . .	220
A.10	Erstellung der Rechenetze . . . . .	220

---

<b>B Datenblätter</b>	<b>229</b>
B.1 Platon	229
B.2 Als Adhäsionsschicht verwendete Photoresiste	230
B.2.1 ma-P 1215 zur thermischen Lamination	231
B.2.2 AZ9260 zur Lösungsmitteldampflamination	232
B.2.3 Haftvermittler TI Prime	236



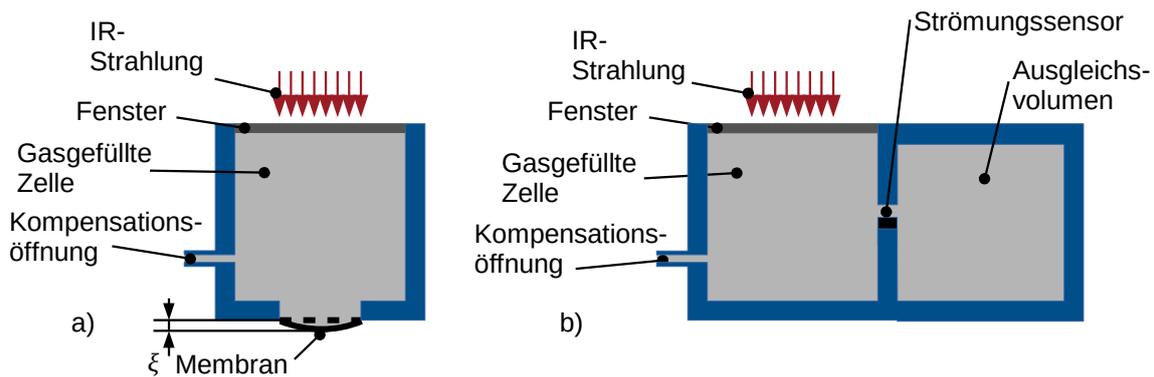


---

## 1 Einleitung

---

Thermische Strömungssensoren kommen in vielen Bereichen zum Einsatz. Die Anwendungen reichen von starken Strömungen in der Prozessmess- oder Automobiltechnik, bis hin zu kleinen Strömungen in der Analyse- oder Medizintechnik. Bei einigen technischen Anwendungen sind sogar extrem kleine, teilweise pulsierende Gasströmungen zu messen. Als Beispiel sei hier die Verwendung eines kalorimetrischen Strömungssensors in einer photoakustischen Messzelle (*Golay-Zelle*) genannt (vergleiche Abbildung 1.1). Durch ein infrarotdurchlässiges Fenster gelangt Infrarotstrahlung in die gasgefüllte Messzelle. Das Gas absorbiert die Strahlung, erwärmt sich dadurch und expandiert. Üblicherweise wird die Expansion des Gases durch die Auslenkung einer Membran gemessen. Die Auslenkung kann dabei kapazitiv oder optisch erfasst werden [1] (Abbildung 1.1 a)). Eine weitere Möglichkeit der Erfassung der Gasexpansion ist die Verwendung eines Strömungssensors, der in einem Kanal zwischen der Messzelle und einem Ausgleichsvolumen platziert wird (Abbildung 1.1 a)). Diese Lösung umgeht das Problem der besonders körperschall- und schwingungsempfindlichen Membran. Strömungssensoren, die in photoakustischen System verwendet werden sollen, müssen auf Grund der auftretenden kleinen Strömungsgeschwindigkeiten und hohen Frequenzen sehr empfindlich sein und gleichzeitig eine sehr niedrige Ansprechzeit aufweisen [1, 2].



**Abbildung 1.1:** Photoakustische Zelle zur Detektion von Infrarotstrahlung. Das Gas in der Messzelle absorbiert die Infrarotstrahlung, erwärmt sich dadurch und expandiert, a) die Expansion des Gases lenkt eine Membran aus. Die Auslenkung  $\xi$  wird gemessen, b) durch die Expansion strömt Gas aus der Messzelle in das Ausgleichsvolumen. Diese Strömung wird mit einem Sensor gemessen.

Eine weitere Anwendung, bei der sehr kleine Strömungen gemessen werden müssen, ist die Messung von Leckageströmungen in geschlossenen Systemen. Auch die Messung des menschlichen Atemstroms stellt hohe Anforderungen an die Strömungssensoren, da die zeitlichen Verläufe sehr gut aufgelöst werden müssen.

---

### 1.1 Mikrosystemtechnische Strömungssensoren

---

Mikroelektronische Bauelemente verarbeiten elektrische Signale und geben sie verarbeitet ebenfalls elektrisch aus. Die Mikrosystemtechnik versteht sich daher als Erweiterung der Mikroelektronik um weitere Domänen neben der elektrischen, z.B. der mechanischen, optischen oder magnetischen Domäne [3]. Mikrotechnische Sensoren verarbeiten physikalische Signale und wandeln sie üblicherweise in elektrische

---

Signale um. Aber auch der umgekehrte Fall ist verbreitet: Ein Tintendruckkopf z.B. setzt eingehende elektrische Signale in eine dem Druckmuster entsprechende Sequenz ausgestoßener Tintentropfen um. Dabei ist die Mikrosystemtechnik aus den Technologien der Mikroelektronik entstanden und verwendet ähnliche Prozessschritte. So stellt die Photolithographie mit anschließender Strukturierung den zentralen Prozessschritt sowohl in der Mikroelektronik als auch in der Mikrosystemtechnik dar. Ebenfalls sind PVD (*Physical Vapour Deposition*) und CVD (*Chemical vapour deposition*) wichtige Prozesselemente sowohl in der Mikroelektronik als auch in der Mikrosystemtechnik. Daneben weist die Mikrosystemtechnik einige besondere Fertigungsprozesse auf, die im Laufe der Zeit immer weiter entwickelt wurden. Dazu zählen vor allem Ätzprozesse, mit denen sich gezielt auch größere Mengen Material aus einem Volumen entfernen lassen. Insbesondere das anisotrope Ätzen von Silizium hat die Entwicklung von Mikrosystemen stimuliert, da sich mit diesem Verfahren gezielt dreidimensionale Strukturen in einen Siliziumkristall ätzen lassen. Damit können eine Vielzahl von mikromechanischen, -optischen, -fluidischen u.a. Bauelemente hergestellt werden. Da die Strukturen bei dieser Technologie durch Ätzen direkt aus dem Siliziumkristall strukturiert werden, wird diese Technologie üblicherweise als *Bulk-Silizium-Mikromechanik (BMM)* bezeichnet. Hohe Prozesszeiten und eine begrenzte Strukturvielfalt begünstigten im Laufe der 1990er Jahre die Etablierung der *Oberflächen-Mikromechanik (OMM)*. Hierbei werden die Funktionsstrukturen auf der Oberfläche erzeugt. Dazu werden zunächst Schichten aus Polysilizium<sup>1</sup> abgeschieden und dann durch Lithographie und Ätzprozesse strukturiert. Im Gegensatz zur Bulk-Silizium-Mikromechanik werden zur Strukturierung meist Trockenätzprozesse eingesetzt (RIE, DRIE etc.). Dabei sind die Prozesszeiten deutlich kürzer und die Vielfalt der Formgebung größer.

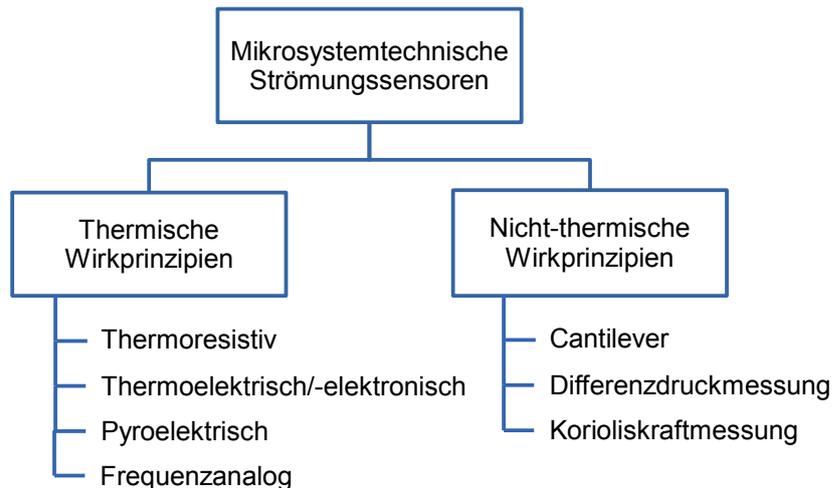
Eine Besonderheit gegenüber der etablierten mikroelektronischen Fertigungsprozesse stellt die Lithographie mit anschließender Galvanoformung dar. Hierbei wird ein vergleichsweise dicker (einige  $\mu\text{m}$  bis einige  $100\ \mu\text{m}$ ) Photolack strukturiert und anschließend als Form zur galvanischen Abformung benutzt. Hiermit lassen sich beliebig zweidimensional geformte metallische Strukturen auf einem Substrat erzeugen. Eine Weiterentwicklung dieses Prozesses stellt das in Karlsruhe entwickelte LIGA (*Lithographie-Galvanik-Abformung*) Verfahren dar: Dieses nutzt hoch parallele Röntgenstrahlung zur Strukturierung des Photolacks, um das Verhältnis von der Höhe zur kleinsten realisierbaren Breite (das sog. Aspektverhältnis) zu erhöhen. Damit die Bestrahlung, die sehr teuer ist, nicht für jedes Substrat wiederholt werden muss, werden nach der galvanischen Erzeugung der Metallstrukturen durch Abgießen weitere Formsätze hergestellt. Dadurch können vergleichsweise günstig sehr feine Strukturen gefertigt werden, deren Herstellung bei der Belichtung mit UV-Licht nicht möglich gewesen wäre.

Die Möglichkeit der Batch-Fabrikation auf einem Wafer ermöglicht die Herstellung einer Vielzahl von Systemen gleichzeitig. Das macht Mikrosysteme im Vergleich zu konventionell aufgebauten Systemen deutlich preisgünstiger.

Die Fertigungstechnologien der Mikrosystemtechnik ermöglichen die Herstellung einer Vielzahl von Strömungssensoren unterschiedlichster Bauart und Funktionsweise. Nach Abbildung 1.2 können mikrosystemtechnische Strömungssensoren in thermische und nichtthermische Prinzipien eingeteilt werden [4, 5]. Alle thermischen Prinzipien beruhen darauf, dass der Wärmetransport von einem Festkörper weg oder von einem Festkörper zu einem anderen von der Strömungsgeschwindigkeit des umgebenden Gases abhängt. Die Umsetzung der Strömungsgeschwindigkeit in ein elektrisches Signal beruht dabei immer auf der Temperaturmessung durch ein geeignetes Temperaturmesselement. Dieses kann thermoresistiv, thermoelektrisch, pyroelektrisch oder frequenzanalog sein. Nicht-thermische Prinzipien basieren auf einer mechanischen Wechselwirkung zwischen dem strömenden Medium und dem Messelement. Cantilever (Biegebalken) werden durch eine Strömung verbogen, die Verbiegung kann gemessen und in ein strömungsproportionales Signal umgesetzt werden. Bei der Differenzdruckmessung wird der Druck vor- und hinter einem Strömungshindernis ausgewertet. Die Messung der Corioliskraft eines auf eine Kreisbahn gelenkten strömenden Fluids, ist ebenfalls eine Möglichkeit der Strömungsmessung, die mikrosystemtechnisch umgesetzt wurde.

---

<sup>1</sup> polykristallines Silizium



**Abbildung 1.2:** Physikalische Wirkprinzipien bei Mikrosystemtechnischen Strömungssensoren

Vor allem die thermischen Prinzipien haben sich in der Mikrosystemtechnik durchgesetzt, da sie keine beweglichen Teile benötigen und dadurch vergleichsweise einfach zu fertigen sind. Durch die Miniaturisierung haben sie das Potential, genau und schnell genug für einen Einsatz in einer photoakustischen Messzelle zu sein.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich daher ausschließlich mit Strömungssensoren, die auf thermischen Wirkprinzipien basieren. Gerade die galvanische Erzeugung der funktionsbestimmenden Elemente wird in dieser Arbeit genauer beleuchtet, da sie das Potential bietet, Messelemente zu erzeugen, die eine sehr niedrige thermische Masse aufweisen und damit über eine niedrige Zeitkonstante verfügen. Um die Zeitkonstante gegenüber dem Stand der Technik zu verringern setzt diese Arbeit Prozesstechniken ein, die im Zuge der Mikro-Nano-Integration entwickelt werden. Das Ziel ist es, die äußeren Abmessungen der funktionsbestimmenden Elemente in den Nanometerbereich zu bringen. Eine weitere Einschränkung wird bei der Wahl der Umwandlung der Temperatur in ein elektrisches Signal eingeführt. Da in dieser Arbeit galvanisch erzeugte Mikro- oder Nanodrähte als Temperaturmeselemente eingesetzt werden, wird die *thermoresistive* Wandlung zur Erzeugung des elektrischen Signals genutzt.

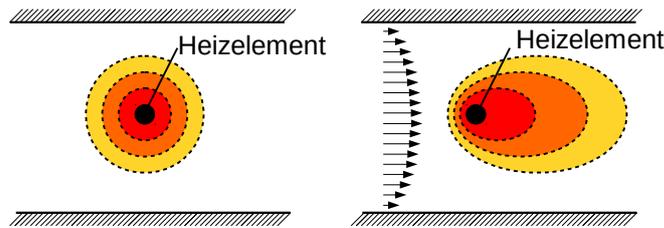
## 1.2 Thermische Strömungsmessung

Thermische Prinzipien zur Messung von Strömungen basieren darauf, dass das Temperaturfeld (Isothermenfeld) mit dem Strömungsfeld gekoppelt ist, d.h. ein bestehendes Temperaturfeld wird durch eine einsetzende Fluidströmung (Gas- oder Flüssigkeitsströmung) verformt. Diese Veränderung des Isothermenfeldes wird gemessen. Dazu muss in jedem Fall zunächst ein Temperaturfeld erzeugt werden, was i.A. ein Heizleiter bzw. -widerstand übernimmt (siehe Abbildung 1.3).

Für ein inkompressibles Fluid, d.h. Flüssigkeiten und Gase bei geringen Strömungsgeschwindigkeiten<sup>2</sup>, lässt sich die Temperaturverteilung mit Hilfe der skalaren Transportgleichung berechnen [6].

$$\rho c \vec{v} \cdot (\nabla \cdot T) - \lambda \nabla T = q \quad (1.1)$$

<sup>2</sup> Gase können für die Modellierung als inkompressibel angenommen werden, wenn die auftretenden Strömungsgeschwindigkeiten 30 % seiner Schallgeschwindigkeit nicht überschreiten



**Abbildung 1.3:** Isothermen um ein linienförmiges Heizelement, a) ungestörter Fall b) durch eine gleichmäßige Rohrströmung gestörtes Isothermenfeld

$$\rho = \text{Dichte} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c = \text{spez. Wärmekapazität} / \frac{\text{J}}{\text{kgK}}$$

$$\vec{v} = \text{Strömungsgeschwindigkeit} / \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$\lambda = \text{Wärmeleitfähigkeit} / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$T = \text{Temperatur} / \text{K}$$

$$q = \text{Leistungsdichte} / \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

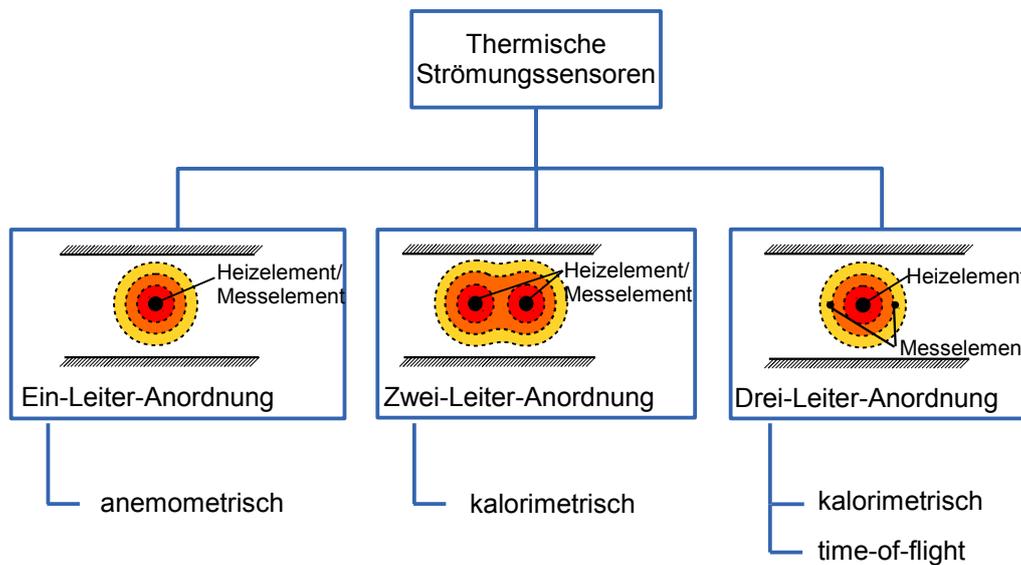
Eine genaue Betrachtung des konvektiven Terms  $\rho \cdot c \cdot \vec{v} \cdot (\nabla \cdot T)$  zeigt, dass die Veränderung des Temperaturfeldes vom Massefluss pro Fläche  $\frac{\dot{m}}{A} = \rho \cdot \vec{v}$  abhängt. Daher misst man mit thermischen Strömungssensoren grundsätzlich immer den *Massefluss*  $\dot{m}$ .

Je nach dem, mit welcher Anzahl von Elementen der Sensor betrieben wird unterscheidet man zwischen Einleiter-, Zweileiter- und Dreileiter-Anordnung. Bei der Einleiter-Anordnung wird die Erzeugung sowie die Messung des Temperaturfeldes von ein und dem selben Element übernommen. Bei der Zweileiter-Anordnung erzeugen üblicherweise beide Elemente das Temperaturfeld und messen dessen gasflussinduzierte Veränderung. Bei der Drei-Leiter-Anordnung wird das Isothermenfeld von einem mittig platzierten Heizelement erzeugt, zwei separate Temperaturmeselemente erfassen die gasflussinduzierte Veränderung des Feldes.

Zur Messung der gasflussinduzierten Veränderung des Temperaturfeldes gibt es verschiedene Möglichkeiten, wobei grundsätzlich drei verschiedene Verfahren unterschieden werden können [7]:

- *Messen der Abkühlung des Heizelementes* Für diese Messmethode reicht ein einzelnes Heizelement aus, welches üblicherweise bei einer konstanten Temperatur betrieben wird. Die Leistung, die benötigt wird, um das Heizelement auf Temperatur zu halten ist das Maß für den Massefluss. Diese Messmethode wird als *anemometrisches Messverfahren* bezeichnet.
- *Messen der Asymmetrie des Temperaturfeldes* Je nach Ausführungsform nutzt man entweder zwei kombinierte Heiz- und Messelemente oder ein Heiz- und zwei separate Messelemente. Da im Prinzip die Wärmeübertragung von einem Element in ein anderes gemessen wird bezeichnet man dieses Verfahren im Allgemeinen als *kalorimetrisches Verfahren*.
- *Messung der Passierzeit von Wärmepulsen* Für dieses Verfahren werden ein Heizelement sowie zwei getrennte Messelemente benötigt. Das Heizelement erzeugt einen zeitlich begrenzten Wärmepuls. Gemessen wird die Differenz der Zeitdauern, die der Wärmepuls zum Erreichen der Messelemente benötigt. Diese Sensoren werden als *time-of-flight-Sensoren* bezeichnet.

Da nicht jede Anordnung mit jeder Messmethode kombiniert werden kann setzt Abbildung 1.4 die drei unterschiedlichen Bauformen thermischer Gasflusssensoren mit den Messmethoden in Bezug.



**Abbildung 1.4:** Messanordnung in Bezug mit den Messmethoden

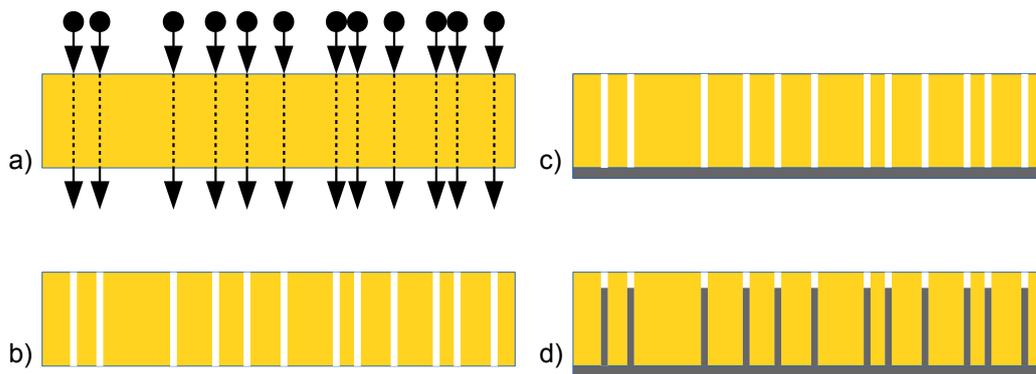
Die Einleiter-Anordnung misst die Abkühlleistung des strömenden Fluids, die bei bekannten Materialparametern (Wärmeleitfähigkeit, Wärmekapazität) ein Maß für den Massefluss ist. Das System ist jedoch empfindlich gegenüber Temperaturschwankungen des Fluids, so dass diese gesondert mit erfasst werden müssen. Die Richtung des Gasflusses ist ebenfalls nicht erfassbar. Je nach Ausführung sind Sensoren, die auf dieser Funktionsweise basieren sehr schnell. Für die Erfassung langsamer Strömungen sind Sensoren, die nur einen Draht einsetzen, jedoch auf Grund fehlender Sensitivität in diesem Bereich nicht geeignet. Die 2-Leiter-Anordnung erfasst die Temperaturdifferenz zwischen den beiden Leitern, die auch in dieser Anordnung sowohl als Heizelement als auch als Messelement fungieren. Mit dieser Anordnung kann zusätzlich die Richtung des Masseflusses bestimmt werden. Da die Temperaturdifferenz zwischen den Leitern ausgewertet wird, ist eine zusätzliche Temperaturerfassung nicht erforderlich. Die Zweileiter-Anordnung kann noch um ein Heizelement erweitert werden, so dass die Messelemente nicht mehr die Aufgabe der Erzeugung des Temperaturfeldes übernehmen müssen.

### Verwendung von Mikro- und Nanodrähten in Strömungssensoren

Die genauesten und dabei schnellsten Sensoren verwenden dünne metallische Drähte als Mess- bzw. Heizelemente, die mitten in der Gasströmung platziert werden. Da es derzeit kein bekanntes Verfahren gibt, mit dem geeignete Drähte direkt im System erzeugt werden können, werden die Drähte üblicherweise von Hand in die Strömungssensoren montiert. Die sehr genauen Instrumente sind deshalb sehr teuer und empfindlich. In der vorliegenden Arbeit werden daher Prozesse entwickelt und untersucht, mit denen metallische Drähte direkt in Mikrosystemen zur Strömungsmessung erzeugt werden können. Die derzeitige manuelle Montage begrenzt den Drahtdurchmesser auf minimal ca. 1  $\mu\text{m}$ , üblich sind eher 5  $\mu\text{m}$ . Daher werden vor allem Prozesse beleuchtet, die die Möglichkeit bieten, den Durchmesser der Drähte weiter zu senken, so dass der Nanometerbereich erreicht wird. Es ist zu erwarten dass die Ansprechzeit dadurch weiter sinkt. Das nachfolgend beschriebene Ionenspurätzverfahren stellt ein etabliertes Verfahren zur Herstellung von Drähten mit einem Durchmesser von deutlich unter einem Mikrometer dar. Es motiviert daher die Untersuchung, inwiefern solche Drähte geeignet sind, um in einem thermischen Strömungssensor Anwendung zu finden und die Leistungsfähigkeit des Sensors zu steigern.

### 1.3 Integration metallischer Nanodrähte

Als Grundlage dient in dieser Arbeit das in den 1960er eingeführte und mittlerweile etablierte Ionenspurätzverfahren (siehe Abbildung 1.5). Dabei wird eine Kunststofffolie einem Schwerionenstrahl ausgesetzt [8]. Beim Passieren der Folie hinterlassen die Schwerionen Schädigungen im Kunststoff. Diese Schädigungen bewirken, dass die Ätzrate eines alkalischen Ätzmediums entlang der Spur deutlich höher ist als quer zu ihr. Dadurch können zylindrische Kanäle in die bestrahlte Kunststofffolie geätzt werden. Die entstandene poröse Folie wird im Folgenden als *Templat* bezeichnet. Je nach Ätzdauer können Kanäle mit einem Durchmesser von nur einigen 10 Nanometern bis hin zu einigen Mikrometern erzeugt werden.



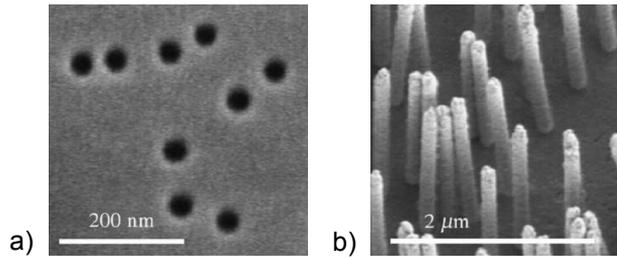
**Abbildung 1.5:** Ionenspurätzverfahren; a) Bestrahlen einer Kunststofffolie mit Schwerionen, b) Ätzen der Kanäle, c) Aufbringen einer Startschicht für die galvanische Erzeugung der Nanodrähte, d) Galvanisches Erzeugen der Nanodrähte

Auf dieses Templat wird eine metallische Startschicht, z.B. mittels PVD aufgebracht. Ausgehend von dieser Startschicht werden dann die Nanodrähte durch galvanische Abscheidung von Metall in den Poren erzeugt. Der Drahtdurchmesser entspricht dabei dem Kanaldurchmesser. Die Drahtdichte, d.h. die Anzahl der Kanäle bzw. Drähte pro Folienstück wird durch die Verweildauer im Ionenstrahl eingestellt und beträgt zwischen  $10^4$  und  $10^{10} \frac{1}{\text{cm}^2}$ . Die maximale Drahtlänge hängt von der Dicke der Folie ab. Kommerziell erhältliche Folien haben eine Dicke von  $10 \mu\text{m}$  bis  $50 \mu\text{m}$ . Am Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung GSI in Darmstadt sind auf Grund des größeren Beschleunigers Foliendicken bis  $100 \mu\text{m}$  erhältlich. Nach dem Abscheiden der Drähte wird das Polymer mittels eines Lösungsmittels entfernt, um die Drähte freizustellen. Abbildung 1.6 zeigt eine bestrahlte und aufgeätzte Polymerfolie (a)) sowie freigestellte Drähte (b)).

Mit dem Ionenspurätzverfahren ist es möglich, metallische Drähte mit sehr hohem Aspektverhältnis herzustellen. Die Drähte sind mit der Startschicht verbunden, wenn diese jedoch nur wenige nm dick ist, wird sie beim Entfernen der Folie mit zerstört. Man erhält dann einzelne, in einer Suspension befindliche, Drähte, die für eine Integration in ein Mikrosystem so nicht geeignet sind.

In dieser Arbeit wird ein Verfahren entwickelt, das diese Technologie für die Mikrosystemtechnik nutzbar macht. Besonderes Augenmerk liegt darauf, dass die Drähte direkt im Mikrosystem wachsen und nicht in einem aufwendigen Transferprozess überführt werden müssen.

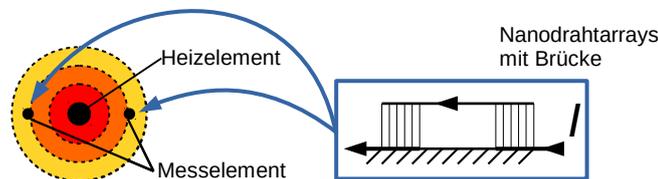
Zusätzlich wird ein alternatives Verfahren zur Herstellung von dünnen Drähten vorgestellt: An einer Ätzkante wird durch galvanische Abscheidung ein horizontal über dem Substrat frei schwebender Draht erzeugt.



**Abbildung 1.6:** Ionenspurätzverfahren [9] a) Polycarbonatfolie mit ionenspurgeätzten Kanälen, b) mit solchen Templaten hergestellte Nanodrähte

### Nanodrähte in kalorimetrischen Strömungssensoren

Mit dem Ionenspurätzverfahren lassen sich senkrecht auf der galvanischen Startschicht stehende Nanodrähte erzeugen, die durch den Ionenstrahl statistisch verteilt sind. Das Grundkonzept einer Vor-Ort-Synthese wird im Wesentlichen darauf beruhen, die Startschicht (vgl. Abbildung 1.5 c)) durch ein geeignetes Substrat zu ersetzen, damit die Drähte direkt auf dem Substrat wachsen können. Dadurch ergibt sich das Verbinden von Substrat und der bestrahlten, aufgeätzten Folie als zentraler Schwerpunkt bei der Entwicklung von Integrationsprozessen. Da das Ziel der Arbeit die Verwendung von Nanodrähten als Messelemente in einem kalorimetrischen Strömungssensor ist, müssen diese beidseitig kontaktiert werden, damit der temperaturabhängige Widerstand der Drähte gemessen werden kann. Die beidseitige Kontaktierung kann durch eine Brücke zwischen zwei Arrays aus Nanodrähten realisiert werden. Diese Struktur ersetzt die konventionellen Messelemente in kalorimetrischen Strömungssensoren (vgl. Abbildung 1.7).



**Abbildung 1.7:** Grundsätzliches Konzept für die Verwendung von Nanodrähten in kalorimetrischen Strömungssensoren. Die konventionellen Messelemente sollen durch integrierte, durch eine Brücke verbundene Nanodrahtarrays ersetzt werden.

Das Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Integrationsprozesses sowie die Konzipierung eines Strömungssensors, der als Messelemente voll integrierte und beidseitig kontaktierte Nanodrähte einsetzt, die mit dem Ionenspurätzverfahren hergestellt wurden.

## 1.4 Struktur und Ziele der Arbeit

Zunächst wird der aktuelle Stand der Technik beschrieben. Die Arbeit beschränkt sich auf die Darstellung thermischer Strömungssensoren und gibt einen kurzen Abriss von konventionell gefertigten Hitzdrahtanemometern bis hin zu neueren, in der Erforschung befindlichen, Systemen. Weiterhin wird der aktuelle Stand der Forschung der Integration metallischer Nanodrähte in Mikrosysteme vorgestellt. Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der theoretischen Modellierung von Mikro- bzw. Nanodrähten und stellt Modellierungsmethoden für Strömungssensoren vor. Ein Fokus bildet die Entwicklung eines

Algorithmus, der die Berechnung von Strömungen durch nanoskalige Systeme ermöglicht. Danach werden die entwickelten Prozesse zur Integration bzw. Vor-Ort-Erzeugung metallischer Nanodrähte im Strömungssensor aufgezeigt. Aus diesen Prozessen ergeben sich die Randbedingungen für die Entwicklung von Konzepten zur Fertigung von Strömungssensoren, die eben diese Nanodrähte als funktionsbestimmende Elemente nutzen. Bei der Auslegung der konzipierten Strömungssensoren finden die entwickelten numerischen Berechnungsverfahren Berücksichtigung. Abschließend werden die Sensoren gefertigt und charakterisiert. Die Gliederung ist in Abbildung 1.8 dargestellt. Die Arbeit stellt demnach die komplette Wertschöpfungskette vom Konzept, über die Technologieentwicklung und physikalische Modellierung bis zum fertigen Demonstrator dar.

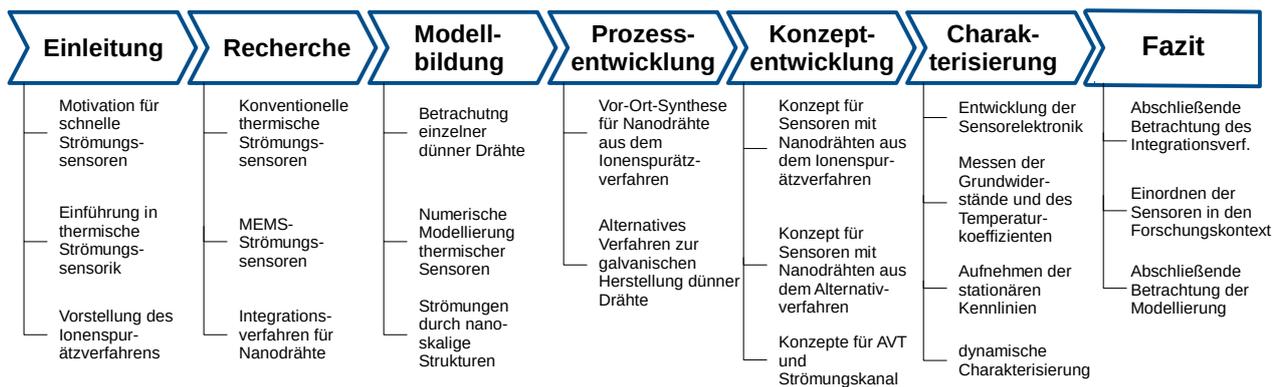


Abbildung 1.8: Gliederung der vorliegenden Arbeit

---

## 2 Stand der Technik in der thermischen Strömungsmesstechnik

---

Gerade durch das Aufkommen der mikrotechnischen Fertigungsverfahren können leistungsfähige und schnelle thermische Strömungssensoren hergestellt werden. Das nachfolgende Kapitel gibt einen Überblick über den derzeitigen Stand der Technik solcher Sensoren. Dabei werden nur *thermische* Messprinzipien betrachtet, da nur solche für diese Arbeit von Interesse sind. Zudem geht die Arbeit ausschließlich auf die Messung von Strömungsgeschwindigkeiten in Gasen ein. Eine weitere Einschränkung wird bezüglich der Erfassung der strömungsinduzierten Temperaturänderung eingeführt: Auf Grund der Fülle an Sensoren werden ausschließlich thermoresistive Messprinzipien betrachtet, deren Messeffekt auf der temperaturabhängigen Änderung des elektrischen Widerstands beruht.

---

### 2.1 Konventionelle Strömungssensoren

---

Mit konventionellen Sensoren sind Strömungssensoren gemeint, die aus diskreten Einzelementen aufgebaut sind. Im Allgemeinen handelt es sich hierbei um dünne Drähte, die als Heiz- bzw. Messelement eingesetzt werden. In allen Fällen wird der temperaturabhängige Widerstand des Heiz- bzw. Messelementes ausgewertet. Da es sich üblicherweise um Metalle handelt, steigt der Widerstand mit steigender Temperatur (PTC - positive temperature coefficient) nach Gleichung (2.1). Es wird nur der lineare Teil der Temperaturänderung berücksichtigt, da die strömungsinduzierten Temperaturänderungen ausreichend klein sind.

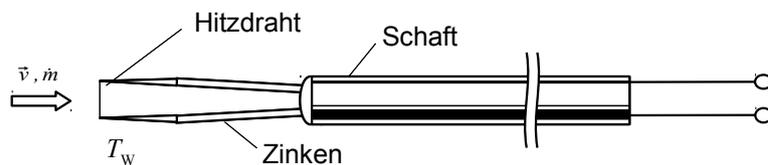
$$R_W = R_{W,0} (1 + \alpha(T_W - T_{W,0})) \quad (2.1)$$

---

#### 2.1.1 Hitzdrahtanemometrie

---

Das älteste thermische Verfahren, welches in der Strömungsmesstechnik eingesetzt wird, ist die Hitzdrahtanemometrie [10]. Hierbei handelt es sich im Wesentlichen um einen Draht, der geheizt wird und dessen Wärmeverlust gemessen wird. Ein gesondertes Heizelement wird nicht benötigt. Da jedoch die Wärmeabfuhr vom Draht auch von der Umgebungstemperatur abhängig ist, muss die Temperatur des Mediums mit gemessen werden. In konventioneller Bauweise handelt es sich bei dem Messelement um einen dünnen Draht mit wenigen  $\mu\text{m}$  (5 - 10  $\mu\text{m}$ ) Durchmesser. Abbildung 2.1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau von Hitzdrahtanemometern.



**Abbildung 2.1:** Grundsätzlicher Aufbau eines Hitzdrahtanemometers

Unter der Annahme dass, die geometrischen Abmessungen und Stoffparameter konstant sind, kann der folgende Zusammenhang zwischen der durch die Luft abgeführten Heizleistung  $P_W$  und Strömungsgeschwindigkeit  $v$  angenommen werden [10, 11]:

$$P_W = A + B v^n \quad (2.2)$$

Dieser Zusammenhang wird als *King'sches Gesetz* [12] bezeichnet. Der Exponent  $n$  beträgt dabei näherungsweise  $n = 0,4..0,5$ , da bei der Umströmung des Hitzdrahtes von einer laminaren Strömung ausgegangen werden kann.  $A$  und  $B$  bezeichnen Kalibrierkonstanten, die für jeden Anwendungsfall ermittelt werden müssen.

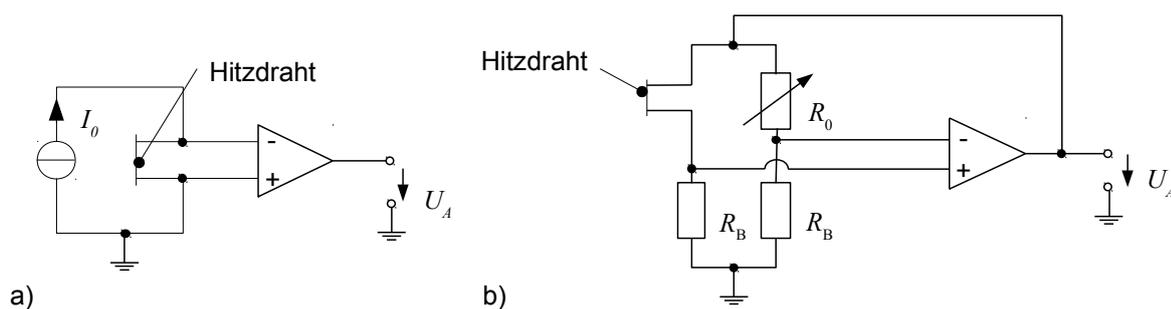
Je mehr Heizleistung abgeführt wird, desto kühler wird der Draht bei gleichbleibender Heizleistung, bzw. desto mehr Heizleistung ist nötig um die Temperatur des Drahtes aufrecht zu erhalten. Daraus ergeben sich direkt zwei Betriebsmodi für die Strömungsmesser: Konstantstrombetrieb (*CCA - Constant Current Anemometry*) und Konstanttemperaturbetrieb (*CTA - Constant Temperature Anemometer*).

### Konstantstromanemometer

In dieser Betriebsart wird der Draht mit einem konstanten Strom geheizt. Der Drahtwiderstand (bzw. die Spannung, die über dem Draht abfällt) ist die elektrische Messgröße die erfasst wird, um die Strömungsgeschwindigkeit zu bestimmen. Abbildung 2.2 a) zeigt die zugehörige elektrische Verschaltung. Da die Wärmeträgheit des Drahtes nicht kompensiert wird, muss dies in einem nachfolgenden Schritt passieren. Dadurch ist diese Methode für die Strömungsgeschwindigkeitsmessung praktisch nicht mehr von Bedeutung.

### Konstanttemperaturanemometer

In dieser Betriebsart ist der Heizdraht Teil einer Messbrücke. Durch eine Rückkopplungsschaltung mit einem Verstärker wird der Drahtwiderstand und damit die Drahttemperatur auf einen festen Wert geregelt. Die Messgröße ist die dazu benötigte Heizleistung, bzw. die Ausgangsspannung des Rückkopplungsverstärkers. Abbildung 2.2 b) zeigt das Konzept der elektronischen Schaltungen. Der Konstanttemperaturbetrieb zeichnet sich vor allem durch die hohe Messgeschwindigkeit aus, da der Draht seine Temperatur nicht ändert und damit die Wärmekapazität des Drahtes weniger ins Gewicht fällt. Durch die verbreitete Verwendung von integrierten Verstärkern hat sich diese Betriebsart durchgesetzt.



**Abbildung 2.2:** Elektronische Schaltungen für die Betriebsmodi bei Hitzdrahtanemometern; a) Konstantstrombetrieb, b) Konstanttemperaturbetrieb [13]

#### 2.1.1.1 Herstellung der Drähte für Hitzdrahtanemometer

In konventionell aufgebauten Hitzdrahtanemometern werden Drähte verbaut, die einen Durchmesser von weniger als  $10 \mu\text{m}$  aufweisen. Besonders hervorzuheben ist die Verwendung sog. Wollastondrähte

[14]. Dabei wird zunächst ein Platindraht gezogen, bis er etwa einen Durchmesser von 50-80  $\mu\text{m}$  aufweist. Anschließend wird der Draht galvanisch mit einer 2,5 mm dicken Silberschicht überzogen, die zur mechanischen Stabilisierung des Drahtes dient. Danach wird er weiter gezogen, bis der Durchmesser des Verbunddrahtes wieder 50  $\mu\text{m}$  beträgt. Der Durchmesser des Platinkerns beträgt dann nur etwa 2-5  $\mu\text{m}$ . Der Verbunddraht wird nach diesem Prozess in die Messsonde montiert. Abschließend wird mit Salpetersäure die Silberummantelung entfernt, so dass nur der Platinkern übrig bleibt.

### 2.1.1.2 Einsatz von Hitzdrahtanemometern

Auf Grund der dünnen Drähte und der Konstanttemperaturbetriebsart können Ansprechzeiten im ms-Bereich mit Hitzdrahtanemometern erreicht werden. Das macht sie besonders für Messungen von turbulenten Strömungen interessant. Nachteilig ist jedoch die aufwendige Kalibrierung der Messsonden, so dass zur Durchführung einer Messung mit einem Hitzdrahtanemometer ein großes Maß an Erfahrung erforderlich ist. So haben die Temperatur des strömenden Mediums, die Ausrichtung des Drahtes zur Strömung als auch der Turbulenzgrad der Strömung Einfluss auf die Messergebnisse [10]. Des weiteren ist der Aufbau solcher Sonden sehr aufwendig, da die Sonden auf Grund des dünnen Messdrahtes eine geringe mechanische Stabilität aufweisen. Daher werden Hitzdrahtanemometer hauptsächlich bei der Entwicklung strömungsdynamischer Bauteile eingesetzt um den Einfluss von Turbulenzen erfassen zu können. In technischen Produkten zur Strömungsüberwachung sind sie aus den o.g. Gründen hingegen kaum zu finden. Für die Messung langsamer Strömungen sind Hitzdrahtanemometer nicht geeignet, da sie im unteren Geschwindigkeitsbereich eine vergleichsweise geringe Empfindlichkeit aufweisen.

### 2.1.2 Andere konventionelle thermische Strömungssensoren

#### Pulsdrahtanemometer

Neben der Hitzdrahtanemometrie stellen Pulsdrahtanemometer (Abbildung 2.3) eine weitere Gattung konventionell gefertigter Strömungssensoren dar. Diese verwenden, ebenso wie Hitzdrahtanemometer, dünne metallische Drähte als sensitive Elemente. Das Verfahren beruht darauf, dass ein Draht durch pulsartiges Beheizen Wärmepulse erzeugt, die durch das strömende Gas zum stromabwärts liegenden Messdraht transportiert werden und dort eine kurzzeitige Widerstandsänderung erzeugen. Die Passierdauer der Wärmepulse ist abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit des Gases. Diese Methode eignet sich nur zur Messung langsamer Strömungen mit Geschwindigkeiten von  $v < 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  [10], da sonst keine eindeutige Zuordnung der Messpulse mehr möglich ist.

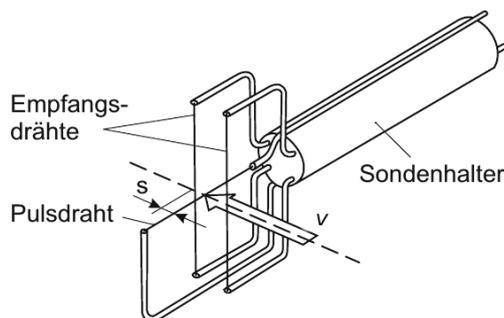
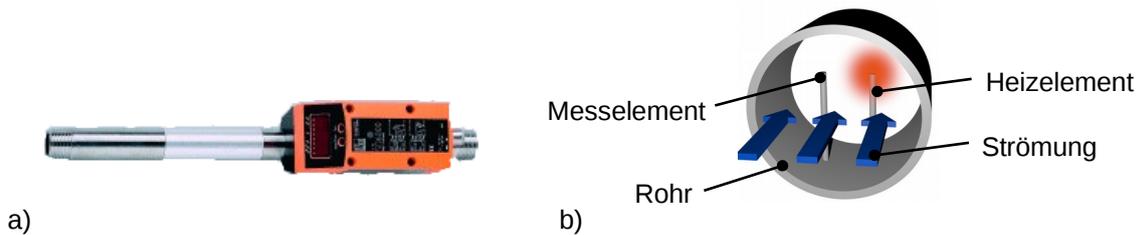


Abbildung 2.3: Aufbau eines Pulsdrahtanemometers [10]

## Kalorimetrischer Druckluftzähler

Ein Beispiel für konventionell aufgebaute kalorimetrische Strömungssensoren ist der Druckluftzähler SD6000 der Firma ifm electronic [\_sd6000\_???? ] (Abbildung 2.4 a)). Die Sensoren bestehen aus zwei einzelnen Messfühlern, die quer zur Strömung angeordnet sind (Abbildung 2.4 b)). Ein Messfühler erzeugt Wärme, der zweite Messfühler misst die Temperatur. Durch eine einsetzende Strömung wird der Transport der Wärme von einem zum anderen Messfühler gestört, der zweite Messfühler misst abhängig von der Strömung eine geringere Temperatur. Das System ist darauf ausgelegt bis zu  $75 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  zu messen und dient zur Erfassung des Druckluftverbrauchs in der Hauptleitung von Druckluftverteilungen. Hier wird von der Eigenschaft kalorimetrischer Sensoren Gebrauch gemacht, auch langsame Strömungen zu erfassen. Die Ansprechzeit ist mit etwa 0,1 s angegeben.



**Abbildung 2.4:** Kalorimetrischer Druckluftzähler SD6000 der Fa. ifm electronic [\_sd6000\_???? ]

### 2.1.3 Zusammenfassung

Konventionelle Hitzdrahtanemometer verwenden sehr dünne Drähte als sensitive Elemente. Dadurch sind diese Messinstrumente sehr schnell. Ein weiterer Vorteil gegenüber den später vorgestellten, weit verbreiteten mikrotechnisch gefertigten Strömungssensoren ist die Aufhängung der Drähte in der Strömung. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten Dünnfilmelementen befinden sich die Drähte nicht in einer Grenzschicht und erzeugen somit ein stärkeres Signal. Daher sind konventionell gefertigte Hitzdrahtanemometer immer noch die einzigen Instrumente, die bei sehr schnellen Strömungsänderungen und Turbulenzmessungen zuverlässige Ergebnisse liefern. Da sie keine langsamen Strömungen erfassen können, muss man in diesem Fall auf Pulsdrahtanemometer zurück greifen. Konventionell aufgebaute kalorimetrische Sensoren werden auch zur Erfassung des Druckluftverbrauchs eingesetzt. Mit ihnen können ebenfalls langsame Strömungsgeschwindigkeiten gemessen werden, die Ansprechzeit ist mit 0,1 s jedoch vergleichsweise lang.

## 2.2 Mikrotechnische Strömungssensoren

Das Konzept der Mikro-Elektro-Mechanischen Systeme (MEMS) geht bis in die 1960er Jahre zurück. Im Gegensatz zur Fertigung mikroelektronischer Schaltungen werden in MEMS durch partielles, selektives Ätzen des Silizium-Substrates (Bulk-Mikromechanik) oder durch gezieltes Aufbringen und Strukturieren zusätzlicher (Poly-)Silizium-, Metall oder Polymerschichten elektromechanische Elemente erzeugt. Die Technologiepalette reicht dabei von Abscheidungsverfahren (PVD<sup>1</sup>, CVD<sup>2</sup>, Galvanik, Strukturübertragungsverfahren (Photolithographie) bis zu Ätztechnologien (iso- und anisotropes Nassätzen, Plasmaätzen,

<sup>1</sup> physical vapour deposition - Physikalische Dampfphasenabscheidung

<sup>2</sup> chemical vapour deposition - Chemische Dampfphasenabscheidung

---

RIE<sup>3</sup>, DRIE<sup>4</sup>). Obwohl die Mikrosystemtechnik eine Schwellentechnologie ist, gibt es sehr viele kommerziell erfolgreiche Produkte wie Drucksensoren, Inertialsensoren, Mikrospiegelarrays uvm. [15].

Die Messung von Gasgeschwindigkeiten ist essentiell für viele Bereiche in der Produktions- und Analysetechnik. Diese Anforderungen haben dazu geführt, dass in den vergangenen Jahrzehnten viele MEMS-Strömungssensoren entwickelt wurden.

Die größte Herausforderung bei der Herstellung thermischer MEMS-Strömungssensoren ist die Isolation der Messelemente vom Substrat, um die Sensitivität zu erhöhen. Während bei konventionell aufgebauten Systemen die Isolation durch die dünnen Drähte gewährleistet wird, werden bei MEMS-Strömungssensoren auf Grund prozesstechnischer Erfordernisse Dünnschichtleiterbahnen als temperaturempfindliche Elemente verwendet. Da diese flächig auf einer stützenden Struktur aufgebracht sind, ist die Wärmeisolation deutlich schlechter [16].

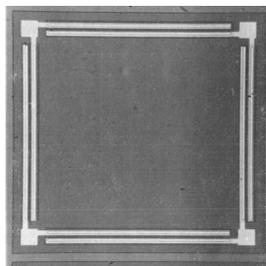
Daher wird im Folgenden eine Klassifikation der Sensoren nach der Platzierung der sensitiven Elemente durchgeführt. Zunächst ist die Messmethode dabei unerheblich, da sie sich nur in der Anzahl der verwendeten Mess- bzw. Heizelemente unterscheiden.

---

### 2.2.1 Sensoren mit Heiz- und Messelement direkt auf dem Substrat

---

Der erste thermische Strömungssensor, der mit MEMS-Technologien auf einem Siliziumchip realisiert wurde, wurde 1974 in [17] vorgestellt. Das System nutzt vier in einem 50 µm dickem Siliziumelement eindotierte Widerstände als thermische Messelemente. Die Widerstände sind in einer Messbrücke angeordnet und dienen gleichzeitig als Heiz- und Messelemente (siehe Abbildung 2.5). Durch die Verwendung mehrerer Widerstände wurde ein kalorimetrisches Prinzip realisiert. Auf Grund der schlechten Isolation der Messelemente vom Substrat ist die Leistungsfähigkeit des Messelementes noch begrenzt, die Funktionsfähigkeit des Prinzips wurde jedoch nachgewiesen.



**Abbildung 2.5:** Erster auf einem Siliziumchip realisierter Strömungssensor [17]. Zu erkennen sind die Zuleitungen sowie die Kontaktpads für die vier Heiz-/Messwiderstände.

Da Silizium eine sehr hohe Wärmeleitfähigkeit ( $\lambda_{\text{Si}} = 150 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ ) aufweist, müssen für Silizium-Strömungsmesselemente Maßnahmen zur Wärmeisolation der Mess- bzw. Heizelemente getroffen werden.

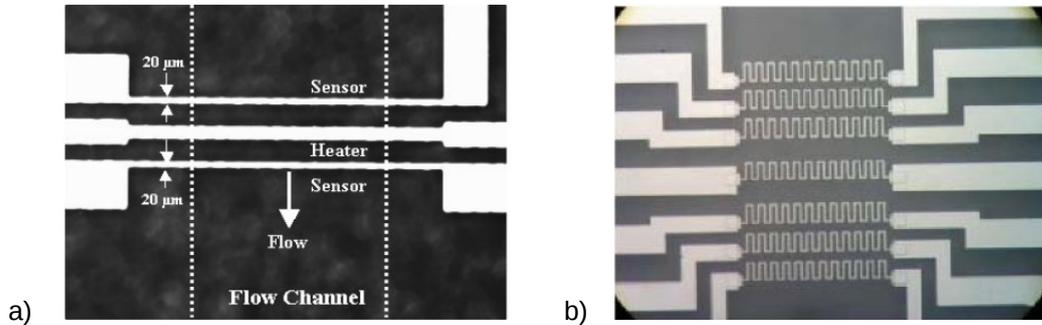
Neben Silizium sind in der Mikrosystemtechnik auch andere Substratmaterialien verbreitet, z.B. Glas oder Polymere, die eine deutlich niedrigere Wärmeleitfähigkeit aufweisen. In [18] und [19] werden die Heiz- bzw. Messelemente aus Aluminium bzw. Platin auf einem Glassubstrat (Borosilikatglas) platziert (vgl. Abbildung 2.6). Beide Messelemente arbeiten nach dem kalorimetrischen Prinzip. Die Form und Position der einzelnen Elemente werden in [18] variiert, um das Messelement zu optimieren. Die Ansprechzeit wurde nicht gemessen, sondern mit Berechnungen auf 70 ms geschätzt. Das Messelement wird durch anodisches Bonden mit einem Siliziumchip, der einen Kanal mit einem Querschnitt von

---

<sup>3</sup> reactive ion etch - reaktives Ionenätzen

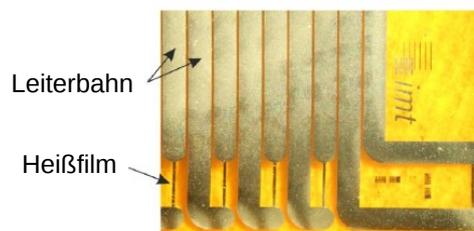
<sup>4</sup> deep reactive ion etch - Tieftrockenätzen, Bosch-Prozess

$A_{\text{Kanal}} = 500 \times 610 \mu\text{m}^2$  enthält. Es können Masseflüsse von  $\dot{m} = 0 - 20 \text{ sccm}^5$  gemessen werden, was einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $\bar{v} = \frac{\dot{m}}{A_{\text{Kanal}}} = 0..1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  entspricht. Das in [19] vorgestellte Messelement setzt mehr als jeweils einen Up- und Downstream-Messwiderstand ein, die je nach vorhandener Strömung umschalten. Das Messelement wurde in einem Standardrohr mit 50 mm Durchmesser platziert. Mit diesem Aufbau können Strömungen von  $\dot{V} = 37,5 \frac{\text{m}^3}{\text{h}}$  gemessen werden, was einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit im Rohr von  $\bar{v} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  und einem Massefluss von  $\dot{m} = 0..6, 25 \cdot 10^5 \text{ sccm}$  unter Standardbedingungen<sup>6</sup> entspricht.



**Abbildung 2.6:** a) Messelement aus [18]: auf einem Borosilikatglaschip sind Heiz- und Messelemente in Dünnschichttechnik platziert, b) Messelement aus [19]: es werden mehrere Messelemente verwendet, um eine höhere Flexibilität bei der Wahl des Messbereiches zu erreichen

In [20] werden Messelemente vorgestellt, die als Dünnschichtleiterbahnen aus Aluminium, Gold oder Nickel auf Polyimid-Folien aufgebracht sind (Abbildung 2.7). Die Elemente arbeiten als Heißfilmanemometer. Das ganze System besteht aus einer Vielzahl dieser Anemometer und dient dazu, die Strömungsverhältnisse an Flugzeugtragflächen zu beurteilen. Der Vorteil von Kunststoffsubstraten ist deren Flexibilität, so dass die Messelemente auf gekrümmten Oberflächen appliziert werden können. Zur Sensitivität sowie Ansprechzeit sind keine Angaben vorhanden. Da aber Turbulenzen mit einer Frequenz von 10 Hz aufgelöst werden können, muss die Ansprechzeit deutlich kleiner als 0,1 s sein. Der Betrieb der Heißfilme erfolgt als Konstanttemperaturanemometer.



**Abbildung 2.7:** Array aus Heißfilmanemometern [20]. Die Heißfilme sind in Dünnschichttechnologie auf einer Polyimidfolie realisiert.

Die einzelnen Sensoren sind in Tabelle 2.3 zusammenfassend gegenüber gestellt. Das Aufbringen der resistiven Temperaturmesselemente direkt auf dem Substrat ist ein sehr einfacher Prozess, mit dem zuverlässige Strömungssensoren hergestellt werden können. Die geringen Herstellkosten werden mit einer geringeren Sensitivität sowie einer höheren Ansprechzeit, bedingt durch die schlechte Isolation vom Substrat, erkauft. Weiterhin bedingt die schlechtere Isolation der resistiven Temperaturmesselemente auch eine höhere Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen der Umweltbedingungen.

<sup>5</sup> sccm - Standard-Kubikzentimeter pro Minute - Einheit für den Massefluss

<sup>6</sup> Umgebungsdruck  $p_0 = 1013 \text{ hPa}$ , Umgebungstemperatur  $T_0 = 20\text{C}$

**Tabelle 2.1:** Strömungssensoren, deren resistive Temperaturmesselemente direkt auf dem Substrat aufgebracht sind. Der Vergleich zu konventionell aufgebauten Hitzdrahtanemometern zeigt, dass diese Systeme deutlich langsamer sind. Der Herstellungspreis beträgt jedoch nur ein Bruchteil.

Quelle	Messmethode	Substrat	Leitermaterial	Kanal	Messbereich $\dot{m}$	$\bar{v}$	Ansprechzeit
[18]	Kalorimetrisch	Glas	Al	$500 \times 610 \mu\text{m}^2$	0..20 sccm	$\approx 0..1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	70 ms
[19]	Kalorimetrisch	Glas	Pt	$\approx 2000 \text{mm}^2$	$0..6, 25 \cdot 10^5 \text{sccm}$	$\approx 0..5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	k.A.
[20]	CTA <sup>1</sup>	Polyimid	Al, Au, Ni	k.A.	k.A.		< 0,1 s

<sup>1</sup> CTA - constant temperature anemometry, Konstanttemperaturanemometer, vgl. Abschnitt 1.2

## 2.2.2 Sensoren, mit Heiz- und Messelement auf einer Membran

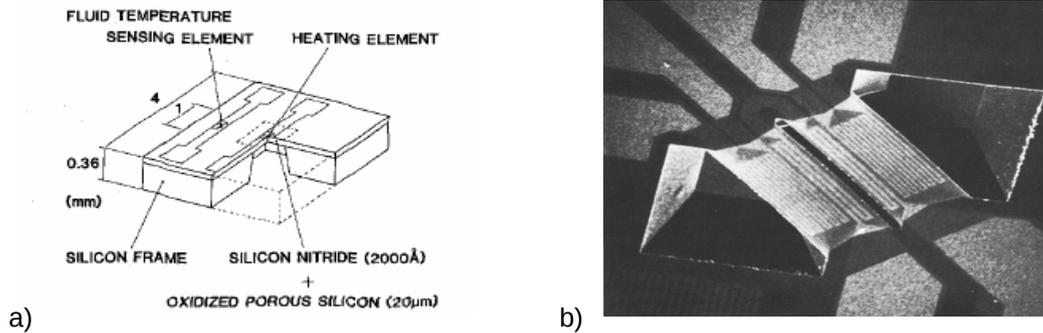
Die im vorherigen Abschnitt gezeigten Unzulänglichkeiten führen dazu, dass eine bessere Isolation der Heiz- bzw. Messelemente vom Substrat angestrebt wird. Ein in der Mikrosystemtechnik weit verbreitetes Verfahren zur thermischen Isolation ist die Erzeugung von dünnen Membranen aus Siliziumdioxid und Siliziumnitrid [21]. Die Erzeugung der Membranen kann dabei durch substraktive (Bulk-Mikromechanik - BMM) oder additive Technologieschritte (Oberflächenmikromechanik - OMM) ausgeführt werden.

### 2.2.2.1 Bulk-Mikromechanik

1986 wurde von Tabata et al. [22] ein Sensor vorgestellt, bei dem das resistive Messelement auf einer Membran platziert wird. Die Membran besteht aus Siliziumnitrid, die allerdings nicht freischwebend ist, sondern zur mechanischen Verstärkung auf porösem Silizium (vgl. Abbildung 2.8 a)) platziert ist. Die geringe Wärmeleitfähigkeit des porösen Siliziums gewährleistet die thermische Isolation des auf der Membran platzierten Temperaturmesselementes. Das Messelement wird in einem Windkanal platziert, der Messbereich mit  $0..14 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben. Neben dem resistiven Messelement für die Strömungserfassung ist auf dem Chip zusätzlich ein Referenzmesselement zur Erfassung und Kompensation der Fluidtemperatur angeordnet. Das Messelement erreicht eine Ansprechzeit von 100 ms. Die Isolation aus porösem Silizium hat den Vorteil, dass die Membran sowohl thermisch isoliert als auch gestützt ist, so dass das in [22] vorgestellte Element unempfindlich gegenüber hohen Druckschwankungen ist.

Im gleichen Jahr wurde ein Sensor vorgestellt, der auf dem kalorimetrischem Messprinzip basiert [23]. Sowohl das Heiz- als auch die beiden resistiven Temperaturmesselemente sind auf einer Membran aus einem dielektrischen Material (Siliziumoxid, -nitrid) platziert (siehe Abbildung 2.8 b)). Die Membran ist dabei nicht geschlossen, sondern als einzelne Brücken ausgeführt. Das ist notwendig, damit das darunter liegende Silizium durch Nassätzen entfernt werden kann. Zudem verbessert sich die thermische Isolation nochmals. Ein Novum ist, dass die Primärelektronik direkt auf dem Chip mit integriert wurde. Der Messbereich ist mit  $0..1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben [5], die erreichte Zeitkonstante beträgt etwa 10 ms. Besonders erwähnenswert ist, dass dieser Sensor bis auf wenige Modifikationen nach wie vor von der Fa. Honeywell vertrieben wird.

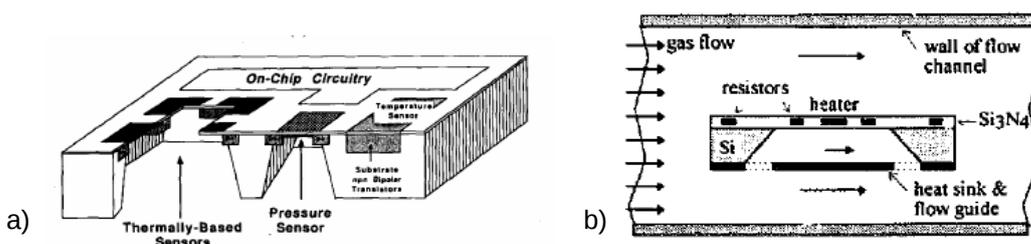
Die zusätzliche Platzierung eines Drucksensors auf demselben Chip wie der Strömungssensor setzt die konsequente Integration verschiedener Sensoren auf nur einem Siliziumchip fort [24]. In dieser Arbeit wurde, neben mehreren Strömungssensoren (für unterschiedliche Strömungsgeschwindigkeiten), zusätzlich ein Drucksensor zur vollständigen Charakterisierung der Strömung mit integriert (Abbildung 2.9 a)). Die Strömungssensoren sind als kalorimetrische Sensoren auf einer Oxid-Nitrid-Membran ausgeführt. Damit die beiden Strömungssensoren unterschiedliche Messbereiche abdecken, ist das Heizelement des einen aus Metall (Chrom-Gold) und das des anderen aus Polysilizium ausgeführt. Damit können unterschiedliche Heiztemperaturen erreicht werden. Es wird ein Messbereich bis  $8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  für den Sensor mit



**Abbildung 2.8:** a) Messelement aus [22]: Eine Siliziumnitridmembran, die zur mechanischen Unterstützung auf porösem Silizium platziert ist, sorgt für thermische Isolation vom Substrat. Ein zweites Temperaturmesselement erfasst die Fluidtemperatur, b) Strömungsmesselement aus [23]: Heiz- und Messelemente sind auf zwei freischwebenden Oxid-Nitrid-Brücken aufgebracht. Das darunterliegende Silizium wurde nasschemisch anisotrop geätzt.

Metallfilmheizelement angegeben. Für das Poly-Silizium-Heizelement sind keine Daten verfügbar. Für den Strömungssensor ist eine Grenzfrequenz von etwa 12 Hz angegeben, was einer Zeitkonstante von ca. 83 ms entspricht. Damit auch die Strömungsrichtung erfasst werden kann, ist ein zusätzlicher kalorimetrischer Sensor mit vielen thermoelektrischen Messelementen auf dem Chip integriert, der eine Richtungsauflösung von  $5^\circ$  erlaubt. Die Integration der Primärelektronik auf dem Chip wurde vorgesehen und 1992 in [25] realisiert. Ein Gassensor ist ebenfalls auf dem Siliziumchip integriert.

1996 wurde in [26] ein Strömungssensor vorgestellt, der zusätzlich zu den auf einer Membran platzierten Heiz- und Messelementen eine Strömungsführung und Wärmesenke integriert hat (Abbildung 2.9 b)). Beide Vorrichtungen dienen dazu, die Sensitivität des Systems zu erhöhen. So verursacht eine Strömung von  $3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  eine Temperaturdifferenz zwischen dem resistiven Up- und Downstreammesselement von 27 K, was in einer entsprechend hohen Ausgangsspannung resultiert. Die Ansprechzeit ist mit weniger als 150 ms angegeben.

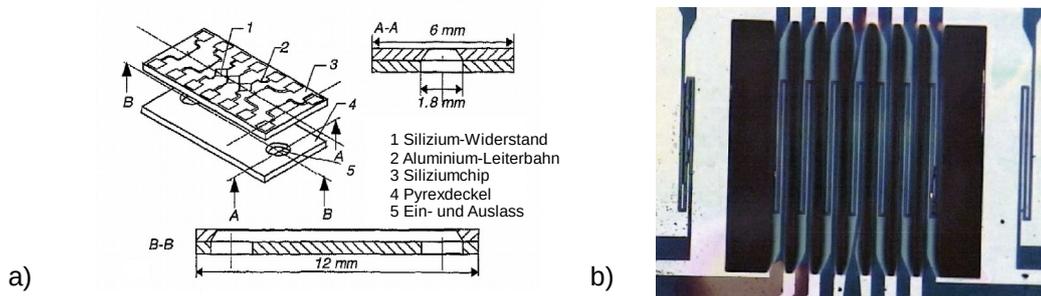


**Abbildung 2.9:** a) Messelement aus [25]: Strömungs-, Gas- und Drucksensoren, sowie die Auswerteelektronik sind auf einem Siliziumchip integriert. Die Strömungssensoren sind auf Oxid-Nitrid-Membran realisiert, b) Messelement aus [26]: Das Messelement verfügt zusätzlich über eine Strömungsführung sowie eine Wärmesenke. Dadurch wird die Sensitivität des Sensors erhöht.

Da eine einsetzende Strömung das durch das Heizelement erzeugte Temperaturfeld asymmetrisch verzerrt, liegt es nahe, Heiz- und Messelemente auch asymmetrisch zueinander anzuordnen. 1997 wurde in [27] ein Sensor vorgestellt, der auf einer Nitridmembran drei Heizelemente und je ein Up- und Downstream-Messelement realisiert hat. Durch Aktivieren der unterschiedlichen Heizelemente kann der Sensor an unterschiedliche Strömungsbedingungen angepasst werden (vgl. Abbildung 2.10 a)).

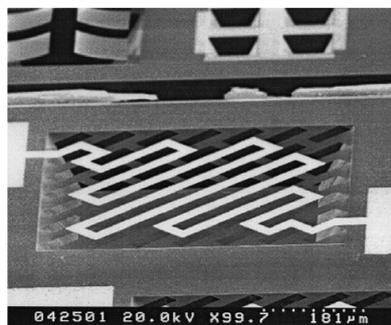
Der Messbereich des Volumenstroms ist mit  $\dot{V} = 0..50 \frac{\text{ml}}{\text{min}}$  angegeben, was unter Standardbedingungen einem Massefluss von  $\dot{m} = 0..50 \text{ sccm}$  entspricht. Angaben zum Strömungskanal zur Umrechnung in eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}$  sind nicht vorhanden. Die Ansprechzeit wurde ebenfalls nicht angegeben.

Ein ähnlicher Ansatz wurde in [28] vorgeschlagen: doch statt mehrerer Heizelemente wurden mehrere (hier insgesamt sechs) Messwiderstände realisiert, die je nach Strömungsverhältnissen ausgewertet werden können. Die Messwiderstände und das Heizelement sind auf einer dünnen Oxid-Nitrid-Membran angeordnet (vgl. Abbildung 2.10 b)). Je nachdem, welche Messwiderstände zur Auswertung herangezogen werden, kann ein Messbereich zwischen  $\dot{m} = 0..200 \text{ sccm}$  bzw. bis zu  $8000 \text{ sccm}$  abgedeckt werden. Mit dem angegebenen Kanalquerschnitt von  $A_{\text{Kanal}} = 7 \text{ mm}^2$  entspricht dies mittleren Strömungsgeschwindigkeiten von  $\bar{v} = 0..0,48 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  bzw. bis zu  $\bar{v} = 20 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Die Ansprechzeit wurde nicht angegeben.



**Abbildung 2.10:** a) Messelement aus [27]: Heizelement-Array und Temperaturmesswiderstände des Strömungssensors; b) Messelement aus [28]: Symmetrisch um ein Heizelement sind je drei Up- und Downstreammesswiderstände angeordnet. Je nach Strömung können unterschiedliche Messwiderstände ausgewertet werden.

Eine Methode zur weiteren Verbesserung der thermischen Isolation der Heiz- bzw. Messelemente vom Substrat ist die Strukturierung der Membran. Dieser Weg wurde in [29] vorgestellt. Dieser Sensor, der nach dem Heißfilmanemometerprinzip arbeitet, verfügt über eine Nitrid-Membran, die mit vielen Öffnungen versehen ist. Das Material des Heißfilms ist Titan. Der Messbereich ist mit  $1,5..11 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  angegeben, die Zeitkonstante mit 5 ms.

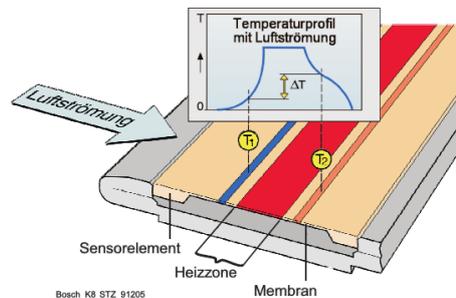


**Abbildung 2.11:** Messelement aus [29]: Auf einer strukturierten Nitridmembran ist ein mäandrierter Heißfilm aus Titan aufgebracht.

**Kommerziell verfügbare Sensoren:** Sensoren, deren Heiz- und Messwiderstand auf einer Oxid-Nitrid-Membran aufgebracht sind, sind weit verbreitet und decken weite Messbereiche ab. So vermarktet Honeywell nach wie vor den in [23] vorgestellten Sensor in leicht abgewandelter Form als AWM-Serie,

z.B. der AWM3300 für den Messbereich bis 1000 sccm. Es ist kein Kanalquerschnitt in den Datenblättern angegeben, was die Ableitung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit unmöglich macht.

Da thermische Strömungssensoren betriebsbedingt den Massefluss messen, setzt Bosch einen so aufgebauten Sensor als Luftmassensensor zur Zuluftsteuerung von Kfz-Motoren ein (vermarktet als *Bosch HFM 5*, Abbildung 2.12). Der Messbereich ist mit  $\dot{m} = -50..1500 \frac{\text{kg}}{\text{h}}$  ( $\dot{m} = 0,83..18,333 \cdot 10^6 \text{ sccm}$ ) angegeben was bei Standardatmosphäre<sup>7</sup> einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit von  $\bar{v} = 15 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  entspricht. Die Ansprechzeit gibt Bosch mit 15 ms an.



**Abbildung 2.12:** Luftmassensensor HFM 5 der Firma Bosch.

Tabelle 2.5 zeigt alle beschriebenen Sensoren im Vergleich. Zu erkennen ist, dass mit den so hergestellten Sensoren ein sehr weiter Messbereich abgedeckt wird. Weiterhin können Ansprechzeiten von wenigen ms realisiert werden, was für die meisten technischen Anwendungen ausreicht. Daher haben Sensoren mit Oxid-Nitrid-Membranen eine große Marktdurchdringung und sind als Massenprodukt etabliert.

**Tabelle 2.2:** Strömungssensoren, deren resistive Temperaturmeselemente auf einer Bulk-Mikromechanik Membran aufgebracht sind

Quelle	Messmethode	Substrat	Leitermaterial	Kanal	Messbereich		Ansprechzeit
					$\dot{m}$	$\bar{v}$	
[22]	an <sup>1</sup>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , por. Si	Pt	k.A.		0..14 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	100 ms
[23]	ka <sup>2</sup>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>	k.A.	k.A.		0..1,3 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	100 ms
[24]	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> , SiO <sub>2</sub>	Cr/Au.	k.A.		0..8 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	83 ms
[26]	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	NiCr/Au	k.A.		0..5 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	<150 ms
[27]	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Al	k.A.	0..50 sccm		k.A.
[28]	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Ni	7 mm <sup>2</sup>	0..8000 sccm	≈ 20 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	k.A.
[29]	an	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Ti	k.A.		1,5..11 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$	5 ms
Honeywell <sup>3</sup>	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	k.A.	k.A.	0..1000 sccm		3 ms
Bosch <sup>4</sup>	ka	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	k.A.	Rohr, Ø = 78 mm	0,83 · 10 <sup>6</sup> .. 18,333 · 10 <sup>6</sup> sccm	(≈ -0.7..15 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ )	15 ms

<sup>1</sup> an = anemometrisch, vgl. Abschnitt 1.2

<sup>2</sup> ka = kalorimetrisch

<sup>3</sup> Honeywell AWM 3300

<sup>4</sup> Bosch HFM 5

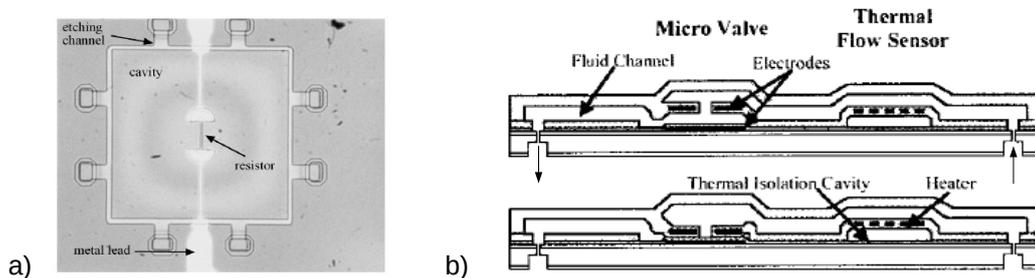
### 2.2.2.2 Oberflächenmikromechanik

Obwohl Sensoren, die mit Bulk-Mikromechanik hergestellt sind, sowohl einen weiten Messbereich als auch sehr niedrige Ansprechzeiten abdecken, gibt es einige Arbeiten, die eine Oberflächen-Mikromechanik einsetzen, um dünne Membranen zu erzeugen. 1999 wurde in [30] ein anemometrisch

<sup>7</sup> Luftdichte  $\rho_{\text{Luft}} = 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$

(CTA) arbeitender Sensor vorgestellt, dessen Heizelement auf einer Nitridmembran platziert ist, die auf einer PSG<sup>8</sup>-Opferschicht erzeugt wurde (vgl. Abbildung 2.13 a)). Die Opferschicht wird anschließend durch eine Ätzöffnung hindurch entfernt, woraufhin die Ätzöffnung wieder versiegelt werden kann. Der große Vorteil besteht darin, dass der entstehende Hohlraum versiegelt ist, und daher unter Vakuum gesetzt werden kann. Das verbessert die Isolation nochmal deutlich, so dass Ansprechzeiten bis zu 75  $\mu\text{s}$  angegeben sind.

Durch die zusätzliche Integration von Aktoren lassen sich auch *Mass-Flow-Controller* realisieren. In [31] wird ein solches Konzept vorgestellt: Ein elektrostatisch aktuiertes Ventil wird mit einem thermischen Strömungssensor, der nach dem anemometrischen Prinzip (CCA) arbeitet, kombiniert (Abbildung 2.13 b)). Der Heizwiderstand aus Chrom-Gold ist dabei auf einer Parylene-Membran aufgebracht. Der Messbereich ist mit bis zu  $\dot{V} = 10 \frac{\mu\text{l}}{\text{min}}$  angegeben (entspricht  $\dot{m} = 0,01 \text{ sccm}$  bei Standardbedingungen), die Zeitkonstante beträgt etwa 1 ms.



**Abbildung 2.13:** a) Messelement aus [30]: Der Poly-Silizium-Heizwiderstand ist auf einer Membran, die oberhalb einer versiegelten Kavität platziert ist, aufgebracht. Die Kavität ist unter Vakuum gesetzt ; b) Mass-Flow-Controller aus [31]: Der Strömungssensor arbeitet anemometrisch und ist auf einer Parylene-Membran aufgebracht. Das obere Bild zeigt das System mit geöffnetem, das untere mit geschlossenem Ventil.

**Tabelle 2.3:** Strömungssensoren, deren resistive Temperaturmesselemente auf einer Membran in Oberflächen-Mikromechanik aufgebracht sind

Quelle	Messmethode	Substrat	Leitermaterial	Kanal	Messbereich		Ansprechzeit
					$\dot{m}$	$\bar{v}$	
[30]	an <sup>1</sup>	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Poly-Si	k.A.	10..30 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$		15 $\mu\text{s}$
[31] <sup>2</sup>	an	Parylene	Cr/Au	$A_{\text{Kanal}} = 100 \times 5 \mu\text{m}^2$	0..0,01 sccm	$\approx 0..0,3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	1 ms

<sup>1</sup> an = anemometrisch, vgl. Abschnitt 1.2

<sup>2</sup> vollständig integrierter Mass-Flow-Controller

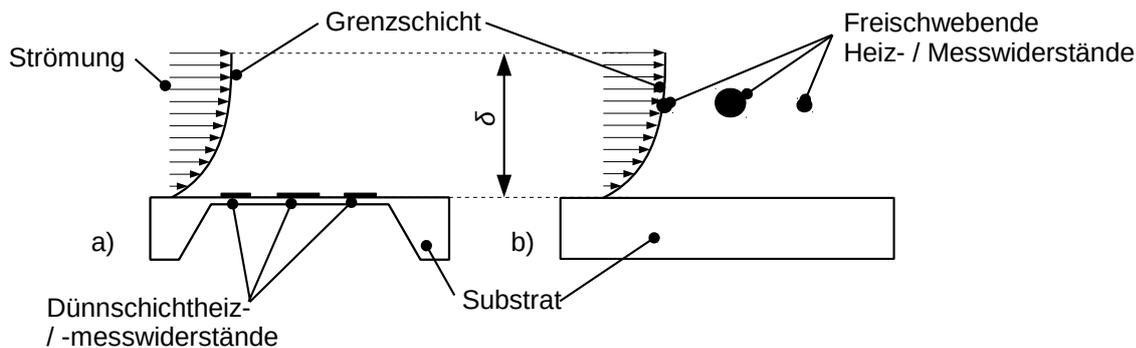
Es zeigt sich, dass die Oberflächenmikromechanik eine sehr viel größere Materialvielfalt und Designvariabilität ermöglicht, als die Bulk-Mikromechanik. Daher können sehr schnelle Messelemente realisiert werden, bzw. voll integrierte Sensor-Aktor-Systeme. Das begründet zugleich auch den Nachteil: Die Prozessschritte aus der Bulk-Mikromechanik sind weit verbreitet und etabliert, so dass die Serienreife viel eher gegeben ist. Daher sind kommerzielle Produkte nur in Bulk-Mikromechanik verfügbar.

### 2.2.3 Sensoren mit freischwebenden Drähten

Obwohl Sensoren, deren Heiz- und Messwiderstände auf dünnen Membranen platziert sind, weit verbreitet sind und bereits eine hohe Leistungsfähigkeit aufweisen, gibt es dennoch einen erheblichen Nachteil,

<sup>8</sup> PSG - Phosphor-Silikat-Glas - weit verbreitetes Opferschichtmaterial

der in Abbildung 2.14 verdeutlicht wird. Da die Heiz- und Messwiderstände direkt auf einer Fläche appliziert sind, befinden sie sich unterhalb der Strömungsgrenzschicht, deren Dicke von der Geometrie des Messelementes und des Strömungskanals abhängt, und einige mm betragen kann. Das heißt direkt am Messelement herrscht eine Strömungsgeschwindigkeit von  $\vec{v} = 0$ . Durch die Grenzschicht findet demnach Wärmetransport hauptsächlich durch Diffusion statt, die jedoch nicht von der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Das verringert die Sensitivität der Elemente [5, 7]. Konventionell gefertigte Hitzdrahtanemometer weisen diese Nachteile nicht auf, weshalb eine Reihe von Arbeiten versuchen, einen solchen Aufbau durch mikrotechnische Fertigungsverfahren zu realisieren.



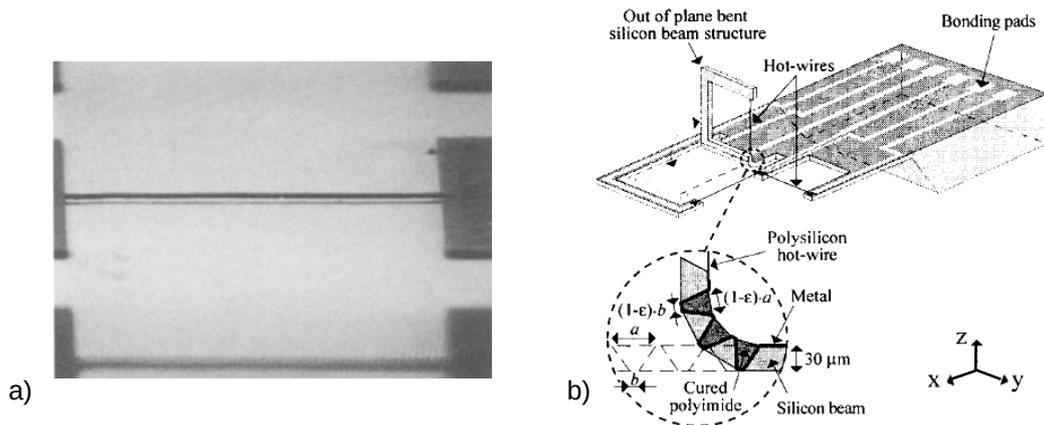
**Abbildung 2.14:** Dünnschichtwiderstände zum Heizen bzw. Messen der Temperatur liegen unterhalb der Grenzschicht mit der Dicke  $\delta$ . Dieser Nachteil kann mit freischwebenden Elementen umgangen werden, die oberhalb der Grenzschicht platziert werden.

Bereits 1988 wurde in [32] ein Strömungssensor vorgestellt, der schwach dotierte Poly-Siliziumbrücken als Messwiderstände einsetzt. Die Brücke des anemometrisch arbeitenden Sensors hat einen Querschnitt von  $1,5 \times 5 \mu\text{m}^2$  und eine Länge von  $200 \mu\text{m}$  (vgl. Abbildung 2.15 a)). Der schwach dotierte Bereich, der den sensitiven Bereich darstellt, weist eine Länge von  $1,5 \mu\text{m}$  auf. Da die Brücke nur etwa  $3 \mu\text{m}$  über dem Substrat aufgespannt ist, ist die Leistungsfähigkeit des Sensors noch vergleichsweise gering. Das Prinzip der frei aufgespannten Mess- bzw. Heizwiderstände konnte gezeigt werden. Der Sensor deckt einen Messbereich von  $\dot{m} = 0..2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  ab und erreicht eine Ansprechzeit von 3 s.

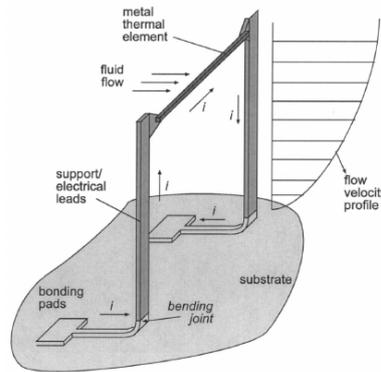
Zehn Jahre später, 1998, wurde in [33] ein mikrotechnisches Hitzdrahtanemometer vorgestellt, welches über drei frei aufgehängte Drähte verfügt. Jeder Draht dient zur Messung der Strömung in eine Raumrichtung. Zwei der Drähte sind in der Ebene des Substrates aufgespannt, der dritte wird nach der Erzeugung aus der Ebene "herausgehoben". Dazu werden eigens geätzte Gräben mit einem Polyimid gefüllt, welches durch Schrumpfung bei der Vernetzung die Aufhängung des Drahtes nach oben biegt (vgl. Abbildung 2.15 b)). Der Draht ist so mehrere hundert  $\mu\text{m}$  über der Substratebene aufgespannt. Die Drähte selbst sind aus Polysilizium. Der Sensor deckt einen Bereich von  $\dot{m} = 0..60000 \text{ sccm}$ , was bei einem Kanal von  $A_{\text{Kanal}} = 16 \times 16 \text{ mm}^2$  eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von  $\vec{v} = 0..3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  entspricht. Die Arbeit gibt eine minimale Zeitkonstante von  $120 \mu\text{s}$  an.

2002 wurde in [34] ein Anemometer vorgestellt, welches Drähte verwendet, bei denen eine Abmessung im Nanometerbereich liegt. Der Hitzdraht wird wie in [33] auch in der Waferebene erzeugt. Die Aufhängung der Drähte ist aus Permalloy, so dass nach der Prozessierung die Aufhängung durch Anlegen eines magnetischen Feldes aus der Waferebene herausgebogen wird. Der Draht selbst ist aus Nickel-Chrom. Die kleinste realisierte Drahtdicke in dieser Arbeit betrug  $100 \text{ nm}$  bei einer Drahtlänge von  $50 \mu\text{m}$ . Im Konstanttemperaturbetrieb (CTA) konnte eine minimale Zeitkonstante von  $50 \mu\text{s}$  erreicht werden. Der abgedeckte Messbereich beträgt  $v = 0..2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ .

Die gleiche Autorengruppe veröffentlichte 2003 in [35] einen Sensor, der den in [34] entwickelten Sensor auf zwei Dimensionen erweitert.



**Abbildung 2.15:** a) Messelement aus [32]: frei aufgehängte Poly-Siliziumdrähte dienen als Hitzdraht, b) Messelement aus [33]: drei frei aufgehängte Drähte dienen zur 3-dimensionalen Strömungsmessung. Der dritte Draht wird durch Polyimid-Schrumpfung aus der Ebene "gehoben".  $\epsilon$  ist der Schrumpfungskoeffizient.



**Abbildung 2.16:** Konzept des Messelementes aus [34, 35]. Durch Anlegen eines äußeren Magnetfeldes biegen sich die Drahtaufhängungen nach oben. Dadurch befindet sich der Draht nicht mehr unterhalb der Strömungsgrenzschicht.

**Tabelle 2.4:** Strömungssensoren, die freischwebende Drähte als Messelemente verwenden

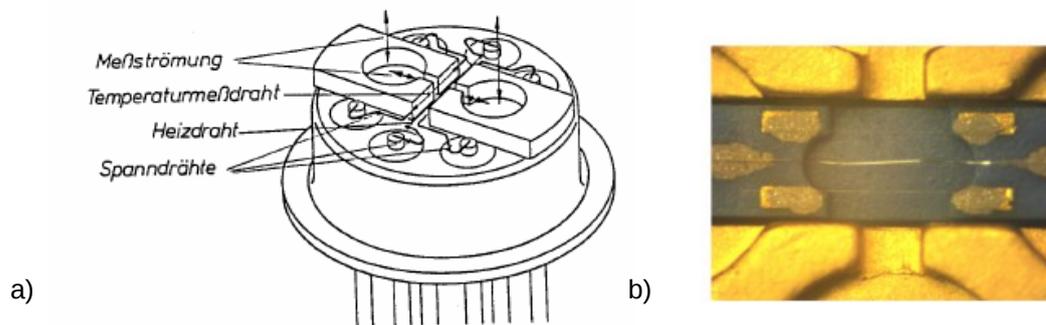
Quelle	Messmethode	Substrat	Leitermaterial	Kanal	Messbereich $\bar{v}$	Ansprechzeit
[32]	anemometrisch <sup>1</sup>	Poly-Si	$1,5 \times 5 \times 200 \mu\text{m}^3$	k.A.	$0..2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	3 s
[33]	anemometrisch	Poly-Si	$2 \times 5 \times 500 \mu\text{m}^3$	$16 \times 16 \text{mm}^2$	$\approx 0..3,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$120 \mu\text{s}$
[34, 35]	anemometrisch	Ni-Cr	Dicke: 100 nm Länge: 50 $\mu\text{m}$	k.A.	$0..2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$	$50 \mu\text{s}$

<sup>1</sup> Vergleich Abschnitt 1.2

## 2.2.4 Messelemente zur Erfassung oszillierender Strömungen

Eine Motivation für die Entwicklung sehr schneller Strömungssensoren auf Basis von Submikrometer- bzw. Nanodrähten ist die Anwendung in photoakustischen Zellen. Daher wird im Folgenden nochmal speziell auf den aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik bei der Messung oszillierender Strömungen eingegangen. Das erste thermische Messelement zur Messung oszillierender Strömungen wurde in

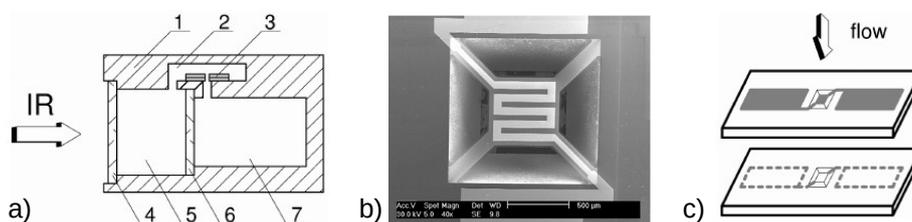
[1] vorgestellt. Hierbei handelt es sich um ein kalorimetrisches Messelement in konventionellem Aufbau (vgl. Abbildung 2.17 a)).



**Abbildung 2.17:** a) In [1] realisierter Sensor für kleine, schnell oszillierende Strömungen. Die Basis ist ein TO-5/6 Sockel mit einer zusätzlichen Strömungsführung. b) Daraus abgeleitet wurde ein kalorimetrischer Sensor entwickelt, der auf eine Keramik-Struktur geklebte Wollastondrähte als Temperaturmessdrähte verwendet (arteos GmbH, [36])

Das Element nutzt einen Hitzdraht und zwei Temperaturmessdrähte. Die dünnsten verwendeten Messdrähte sind Platindrähte, mit einem Durchmesser von  $1,27 \mu\text{m}$ . Diese Drähte liegen als Wollastondrähte vor (vgl. Abschnitt 2.1.1.1). Mit dem Aufbau können oszillierende Strömungen von einigen hundert Hertz bei einer Bandbreite von 1 Hz nachgewiesen werden. Dieses Element bildet die Basis für ein Messelement, welches derzeit in photoakustischen Analysesystemen der Firma Emerson Process verwendet wird (vgl. Abbildung 2.17 b)). In diesem System werden die Wollastondrähte mit leitfähigem Klebstoff in eine AVT<sup>9</sup>-Struktur aus Keramik geklebt.

2009 wurde in [2] ein kalorimetrisch arbeitender Strömungssensor, der in Bulk-Mikromechanik hergestellt wurde, in eine photoakustische Zelle montiert (Abbildung 2.18). Der Sensor besteht aus zwei einzelnen Chips, auf denen ein Platinheizelement auf einer Nitridmembran platziert ist. Beide Chips zusammen bilden das kalorimetrische Messelement. Die Messfrequenz des photoakustischen Systems ist mit 100 Hz angegeben, die Ansprechzeit entspricht 11 ms. Mit dieser Arbeit wurde demnach nachgewiesen, dass auch mikrotechnisch gefertigte Strömungssensoren Anwendung in photoakustischen Messzellen finden können.



**Abbildung 2.18:** Mikrotechnisch gefertigter Sensor zum Einsatz in einer photoakustischen Zelle nach [2]; a) 1 Metallgehäuse, 2 Strömungskanal, 3 Strömungssensor, 4 Infrarotdurchlässiges Fenster, 5 Anregungskammer, 6 Trennwand, 7 Ausgleichskammer, b) REM Aufnahme des Strömungssensors, c) Der Strömungssensor ist aus zwei Chips mit je einem auf einer Nitridmembran aufgetragenen Heizelement aufgebaut. Beide Elemente werden in senkrechter Richtung durchströmt.

<sup>9</sup> AVT - Aufbau- und Verbindungstechnik

Thermische Strömungssensoren lassen sich auch zur Messung akustischer Kenngrößen heranziehen [37]. Der in dieser Arbeit realisierte Sensor setzt auf Nitridbrücken platzierte Heiz- und Messwiderstände ein. Da der Sensor die Strömungsgeschwindigkeit misst, kann ein sehr schnelles Messelement zur Bestimmung der Schallintensität eingesetzt werden [38]. Es wurden Elemente mit zwei Messwiderständen und einem Heizwiderstand (3-Leiter-Anordnung) sowie Elemente mit zwei kombinierten Heiz- und Messwiderständen (Zwei-Leiter-Anordnung) realisiert. Frequenzen von 200 Hz bis 400 Hz wurden in [39] angegeben.

Allen Sensoren für oszillierende Gasströmungen ist gemein, dass sie kalorimetrische Messprinzipien einsetzen (zwei- oder drei-Leiteranordnung). Das liegt daran, dass kalorimetrische Prinzipien vor allem gegenüber sehr geringen Strömungsgeschwindigkeiten sensitiv sind, wie sie bei technisch relevanten Wechselströmungen auftreten.

**Tabelle 2.5:** Strömungssensoren für oszillierende Gasströmungen

Quelle	Messmethode	Aufbau	erfassbare Frequenzen
[1]	Kalorimetrisch (2- und 3-Leiter)	verlötete Wollastondrähte	> 100 Hz
[2]	Kalorimetrisch (2-Leiter)	zwei Chips mit Nitridmembran und Heizelement	≈ 100 Hz
[37], [39]	Kalorimetrisch (2- und 3-Leiter)	Metallfilm auf Nitridbrücken	200-400 Hz

<sup>1</sup> vgl. Abschnitt 1.2

## 2.3 Fazit

Im vorangegangenen Kapitel wurde ein Abriss über thermische Strömungssensoren gegeben. Mit MEMS-Technologien ist es möglich, leistungsfähige und schnelle Strömungssensoren herzustellen. *Kalorimetrische Sensoren*, deren Heiz- und Messwiderstände auf einer dünnen Nitridmembran aufgebracht sind, haben sich in vielen Anwendungsbereichen gegenüber konventionell aufgebauten Strömungssensoren durchgesetzt. Mit ihnen kann ein großer Strömungsbereich gemessen werden. Selbst sehr langsame Strömungen können aufgelöst werden. Strömungssensoren, die nach dem anemometrischen Prinzip (Konstantstromanemometer) arbeiten, weisen eine sehr niedrige Ansprechzeit auf, die Sensitivität gegenüber langsamen Strömungen ist hingegen vergleichsweise gering. Weiterhin begrenzt die Platzierung der Mess- bzw. Heizwiderstände auf der Membran die Leistungsfähigkeit, da sie damit unterhalb der Strömungsgrenzschicht liegen. Abhilfe schaffen frei aufgehängte Drähte, die sich ebenfalls mit mikromechanischen Methoden herstellen lassen.

Das einzige vorgestellte System mit frei aufgehängten Drähten ist das in [34, 35] vorgestellte. In den Veröffentlichungen wurden nur die Drahtdicke und -länge angegeben, nicht aber die Breite. Zudem beträgt die Länge der Drähte nur 50 µm, was die Sensitivität begrenzt.

Zur Messung oszillierender Strömungen werden ausschließlich kalorimetrische Messprinzipien eingesetzt, obwohl sie langsamer sind als Konstantstromanemometer. Das liegt daran, dass eine hohe Sensitivität im Bereich langsamer Strömungsgeschwindigkeiten benötigt wird, um solche Strömungen zu messen.

Eine Verbesserung zur Messung oszillierender Strömungen bieten Drähte, die Durchmesser im Nanometerbereich aufweisen (Submikrometerdrähte). Galvanisch erzeugte Drähte haben den Vorteil, dass sie keine Stützstrukturen wie Membranen benötigen und somit frei in der Strömung platziert werden können. Daher werden in dieser Arbeit zwei Verfahren zur galvanischen Erzeugung solcher Drähte bezüglich ihrer Eignung zur Herstellung leistungsfähiger Strömungssensoren untersucht.



---

### 3 Verfahren zur Integration metallischer Nanodrähte

---

Im Folgenden Kapitel wird das Ionenspurätzverfahren zur Erzeugung von Nano- bzw. Mikrodrähten vorgestellt. Anschließend werden die Variationen und technologischen Möglichkeiten des Verfahrens diskutiert. Ein wichtiger Aspekt ist dabei die Vorstellung und Diskussion von bereits entwickelten Technologien zur Integration von Drähten in Mikrosysteme bzw. auf Substrate. Dabei werden Verfahren betrachtet die keine manuellen Platzierungsschritte der Drähte auf dem Substrat beinhalten, da manuelle Fertigungsschritte einer Verbreitung des realisierten Systems behindern würden.

---

#### 3.1 Das Ionenspurätzverfahren zur Erzeugung von Drähten mit Durchmessern im Nanometerbereich

---

Das Ionenspurätzverfahren gliedert sich grundsätzlich in drei Arbeitsschritte:

1. Bestrahlung eines Templates mit Schwerionen
2. Ätzen von Kanälen/Poren
3. Erzeugen der Drähte

Im ersten Schritt wird ein Polymertemplat mit beschleunigten Ionen bestrahlt [40, 41]. Beim Passieren des Templates hinterlassen sie *latente Spuren* im Material. Entlang dieser Spuren sind Bindungen innerhalb des Materials zerstört, so dass seine chemische Beständigkeit in diesem Bereich abnimmt. In einem anschließenden Ätzprozess mit einem stark alkalischen Medium können entlang dieser Spuren daher Kanäle geätzt werden. Die Ätzdauer gibt dabei den späteren Durchmesser der Kanäle vor.

Die Anzahl der Ionen pro Flächeneinheit, die die Folie passiert haben, entspricht der Anzahl der Kanäle in der Templatfolie vor. Je nach Energie und Art des beschleunigten Ions lassen sich Foliendicken bis zu 100  $\mu\text{m}$  durchstrahlen. Dickere Folien können nicht mit durchgehenden Kanälen versehen werden. Als Templatmaterialien kommen meist Kunststofffolien zum Einsatz, z.B. aus Polyimid, Polycarbonat und Polyethylenterephthalat.

Das ursprüngliche Verfahren sieht vor, nach dem Erzeugen der Kanäle eine Metallschicht auf die Unterseite des Templates aufzubringen, damit anschließend die Drähte galvanisch in den Poren erzeugt werden können (vgl. Abbildung 1.5 in Abschnitt 1.3). Dies geschieht in den meisten Fällen durch Aufspütern einer dünnen Goldschicht.

Die Drahterzeugung erfolgt anschließend durch galvanisches Abscheiden von Metallen in den Poren. Durch Variation der elektrischen Größen bei der galvanischen Abscheidung kann gezielt die Kristallinität des Drahtmaterials eingestellt werden [42]. Anschließend wird das Templat entfernt, was üblicherweise durch ein organisches Lösungsmittel geschieht. Im Falle von Polycarbonatfolien wird meist Dichlormethan verwendet. Die Drähte liegen dementsprechend als Suspension vor.

Das Ionenspurätzverfahren ermöglicht eine weite Variation der Parameter für Drahtarrays. Nachfolgend sind die wichtigsten Parameter aufgeführt.

**Drahtdurchmesser** Der Drahtdurchmesser wird durch die Konzentration des Ätzmediums sowie die Dauer des Ätzvorgangs beeinflusst. In mit Schwerionen bestrahlten Polymeren können zylindrische Kanäle mit Durchmessern von 10 nm bis einigen  $\mu\text{m}$  hergestellt werden.

**Drahtlänge** Die maximale Drahtlänge ist durch die Dicke der Polymertemplate vorgegeben und beträgt nach dem derzeitigen Stand der Technik 100  $\mu\text{m}$ .

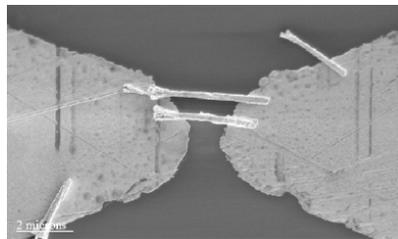
Anzahl der Drähte pro Flächeneinheit (Drahtdichte) Die Anzahl der Ionen, die die Polymerfolie passieren, gibt auch die Anzahl an Drähten in der Folie vor. Die realisierbaren Drahtdichten reichen dabei von  $10^4 \frac{1}{\text{cm}^2}$  bis ca.  $10^9 \frac{1}{\text{cm}^2}$ .

**Drahtmaterialien** Als Drahtmaterialien kommen im Prinzip alle Materialien in Betracht, die sich galvanisch abscheiden lassen. Die größte Bedeutung haben dabei Kupfer, Nickel, Gold und Platin.

Da das Ionenspurätzverfahren zunächst nur die Herstellung der Drähte beinhaltet, ist eine Verwendung der Drähte in Mikrosystemen noch nicht gewährleistet. Daher bedarf es Integrationstechnologien, die die Integration von Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren auf Substrate ermöglicht.

### 3.2 Integrationsverfahren für Drähte aus dem Ionenspurätzverfahren

Als erstes Verfahren zur gezielten Platzierung von Nanodrähten in Mikrosysteme ist die *Dielektrophorese* zu nennen. Dabei werden die in Suspension befindlichen Mikro- bzw. Nanodrähte einem elektrischen Gleich- oder Wechselfeld ausgesetzt. Das induziert in den Drähten ein Dipolmoment, was in einer Kraft auf den Draht resultiert. Der Draht richtet sich an den Feldlinien aus und wandert in Richtung der höheren Feldstärke. Zur Integration von metallischen Nanodrähten in Systeme wurde das Verfahren in [43] angewendet. Dabei werden die für die Dielektrophorese nötigen Elektroden auf das Substrat strukturiert. Anschließend wird die Suspension mit den Nanodrähten auf das Substrat aufgebracht und das elektrische Feld angelegt. Nachdem die Drähte ausgerichtet und positioniert sind, wird das Lösungsmittel verdampft. Durch Adhäsion verbleiben die Drähte anschließend auf ihrer Position (siehe Abbildung 3.1). Der Nachteil des Verfahrens ist, dass keine frei aufgehängten oder stehenden Drähte platziert werden können. Die Fixierung durch reine Adhäsionskräfte ist ebenfalls nicht ausreichend charakterisiert um Stabilität im späteren System zu gewährleisten.

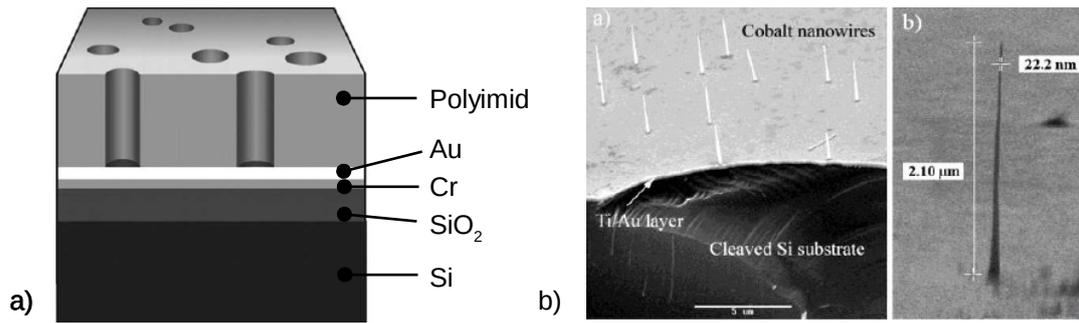


**Abbildung 3.1:** REM-Aufnahme von Gold-Nanodrähten, die mittels Dielektrophorese zwischen zwei Elektroden platziert wurden [43]

Die Dielektrophorese ist aus den genannten Gründen nicht geeignet, um Strömungssensoren herzustellen, die auf Nanodrähten aus dem Ionenspurätzverfahren basieren. Abhilfe schaffen Verfahren, die die Drähte direkt auf dem Substrat (*sog. Vor-Ort-Erzeugung oder -Synthese*) erzeugen. In [44] und [45] wird ein flüssiger Resist aus Polyimid direkt auf ein Substrat aufgeschleudert. Anschließend folgt eine Bestrahlung des kompletten Verbunds mit Schwerionen, woraufhin die Kanäle aufgeätzt werden. Nach dem Aufätzen können direkt auf dem Substrat die Drähte galvanisch abgeschieden werden (siehe Abbildung 3.2).

Das Verfahren ist sehr gut mit anderen MEMS-Technologien kombinierbar und zeichnet sich durch eine hohe Leistungsfähigkeit aus. Die so erzeugten Drähte sind fest auf dem Substrat verankert, eine beidseitige elektrische Kontaktierung ist direkt nicht vorgesehen, aber durch Brücken zwischen den Nanodrähten realisierbar [46].

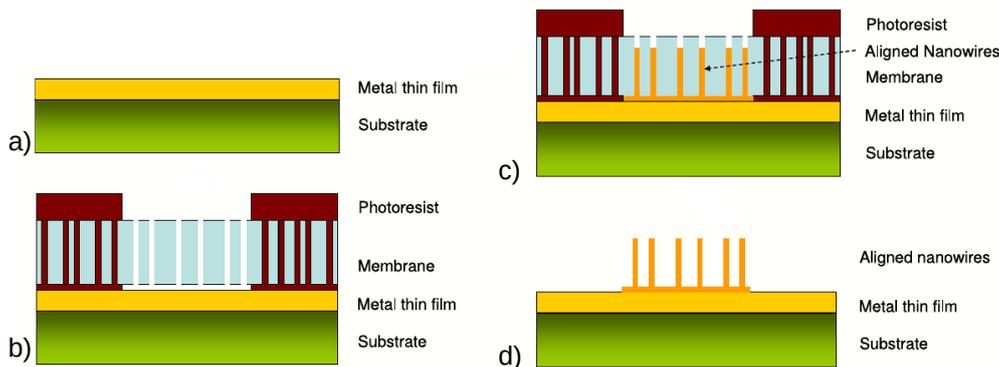
Der entscheidende Nachteil dieses Verfahrens ist, dass während der Prozessierung des Wafers ein Ionenbeschleuniger benötigt wird. Während die sonst üblichen Templatfolien im Rollenverfahren in großer



**Abbildung 3.2:** a) Verbund aus Substrat und aufgeschleudertem Polyimid [44], b) auf einem Substrat erzeugte Nanodrähte aus Kobalt

Masse bestrahlt werden können, muss hier jeder Wafer einzeln verarbeitet werden. Das sorgt dafür, dass das System später sehr teuer sein würde.

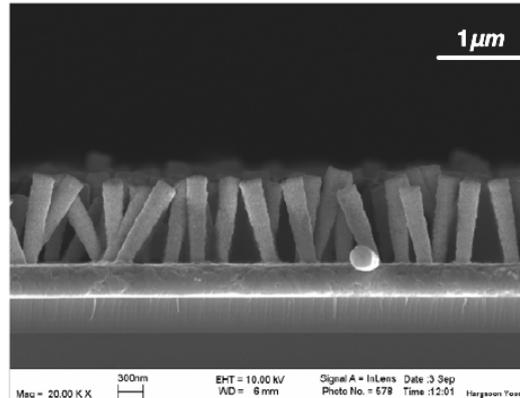
Abhilfe schaffen Verfahren, bei denen eine fertig bestrahlte Templatfolie verwendet wird, um die Drähte direkt auf dem Substrat zu erzeugen. In [47] wird ein Verfahren vorgestellt, dessen Kernschritt das Fixieren der bereits aufgeätzten Templatfolie auf dem Substrat mit Hilfe eines Positiv-Photoresistes (Shi-pley 1805) ist. Dazu wird die Templatfolie auf dem Wafer platziert. Anschließend wird der Fotolack auf die Templatfolie aufgebracht. Durch Kapillarkräfte kann der Resist durch die Kanäle auf das Substrat fließen. Durch anschließendes Schleudern wird die Photolackschichtdicke homogenisiert. Nach dem Softbake haftet das Templat durch die Adhäsionskräfte des Photoresistes auf dem Substrat. Durch Belichten und Entwickeln können gezielt Bereiche freigelegt werden, in denen die Drähte im nachfolgenden Prozessschritt galvanisch erzeugt werden können. Der Prozess ist in Abbildung 3.3 dargestellt.



**Abbildung 3.3:** Prozessablauf zur Herstellung von Arrays aus vertikalen Nanodrähten auf einem Substrat [47], a) Abscheiden der Startschicht, b) Aufbringen der Templatfolie, Aufgießen, Aufschleudern und Strukturieren des Photoresistes, c) Galvanische Abscheidung der Drähte, d) Entfernen der Templatfolie und des Resistes

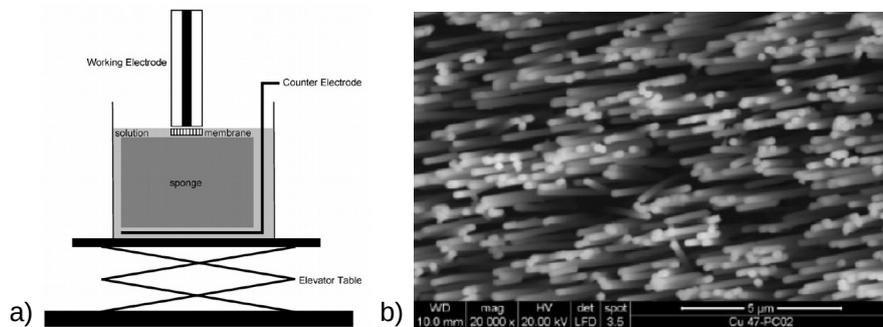
Mit diesem Verfahren wurde die Vor-Ort-Synthese von Drähten mit Durchmessern von minimal 200 nm erzeugt (Abbildung 3.4). Poren mit kleineren Durchmessern konnten nicht galvanisch gefüllt werden. Verwendet wurden kommerzielle Template der Firmen GE Osotics und Whatman. Die Länge der erzeugten Drähte ist damit auf ca. 10 µm begrenzt. Zudem wurde das Verfahren nur mit hohen Drahtdichten demonstriert, die für den Einsatz in der Strömungssensorik nicht geeignet sind. Das Konzept des

Klebens der Templatfolie mit Hilfe von Photoresist auf dem Substrat bildet jedoch die Kernidee des in Kapitel 5 entwickelten Prozesses.



**Abbildung 3.4:** REM-Aufnahme von Drähten aus Platin mit einem Durchmesser von 200 nm [47]

Eine weitere Möglichkeit die Templatfolie auf dem Substrat zu fixieren, ist das Aufpressen der Folie mit einem Schwamm. Der Schwamm dient dabei gleichzeitig als Fixierung und Elektrolytspeicher. Das Verfahren wurde zuerst in [48] demonstriert. Realisiert wurden Drähte mit Durchmessern von 200 nm bis 1 µm aus Kupfer und Nickel direkt auf einer Metallelektrode. Dabei wurden Drahtdichten von  $3 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$  für 200 nm Drähte bis zu  $2 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{cm}^2}$  für Drähte mit 1 µm Durchmesser vorgestellt. Für den Einsatz in der Strömungssensorik sind die Drahtdichten zu hoch. Ein strukturiertes Aufbringen der Drähte wurde nicht demonstriert, ist aber vorstellbar. Den Versuchsaufbau sowie ein exemplarisches Ergebnis zeigt Abbildung 3.5.



**Abbildung 3.5:** a) Versuchsaufbau aus [48], die Membran wird mit einem elektrolytgetränktem Schwamm auf die Arbeitselektrode gepresst, b) Drähte mit 200 nm Durchmesser, die mit dem vorgestellten Verfahren erzeugt wurden

Ein ähnliches Konzept stellt [49] vor. Der Schwamm wurde jedoch durch einen Papierfilter ersetzt. Da die Drähte in einer Siedekühlung zur Anwendung kommen sollten, werden ausschließlich Drähte mit Durchmessern im µm-Bereich aus Kupfer erzeugt.

Beide Konzepte (Anpressen der Membran mit Schwamm oder Filterpapier) sind gut geeignet, ganzflächig Nanodrähte auf einem Substrat zu erzeugen. Dabei muss die Drahtdichte sehr hoch sein, damit das Templat stabil auf dem Substrat bleibt. Ist die Drahtdichte zu gering, reißen die wenigen Drähte beim Entfernen des Schwamms vom Substrat ab. Daher ist das Verfahren so nicht geeignet, um Drähte für die Anwendung in der Strömungssensorik zu erzeugen.

---

Basierend auf den existierenden Verfahren zur Erzeugung und Integration von Drähten aus dem Ionensputzverfahren, wird in Kapitel 5 ein Verfahren entwickelt, welches die Vor-Ort-Erzeugung von Nanodrähten mit geringen Durchmessern und einer sehr niedrigen Drahtdichte ermöglicht.



---

## 4 Modellierung thermischer Strömungssensoren

---

Dieses Kapitel beschreibt die Modellierung von Wärmetransportmechanismen, die relevant für die Auslegung von Strömungssensoren sind. Im ersten Teil wird ein zentrales Element der Sensoren betrachtet: ein langer dünner Draht. An dieser einfachen Struktur wird die Wärmebilanz aufgestellt. So lassen sich auf einfache Art und Weise bereits Hinweise auf das Verhalten von Drähten in Bezug auf Wärmetransport ableiten. Zum Beispiel lässt sich der Einfluss von Drahtdurchmesser und -länge auf das stationäre sowie das transiente Verhalten der Drähte darstellen. Aufbauend darauf werden numerische Modellierungskonzepte für Strömungssensoren allgemein und Strömungssensoren mit nanoskaligen Strukturen im Speziellen dargestellt. Die Modellierungsmethoden werden im weiteren Verlauf der Arbeit (vgl. Kapitel 6) eingesetzt, um die erarbeiteten Sensorkonzepte umzusetzen und die Sensoren auszulegen.

---

### 4.1 Wärmebilanz eines beheizten Drahtes

---

Grundsätzlich basieren alle thermischen Strömungsmessprinzipien darauf, dass Wärme von einem elektrisch beheizten Widerstand weg transportiert wird. Im einfachsten Fall wird dieser Leistungsverlust direkt gemessen (*Hitzdraht- oder Heißfilmanemometrie*) oder es wird der Wärmetransport zu einem Temperaturmesselement erfasst (*kalorimetrische Messprinzipien*). Für die Modellierung ist es daher notwendig, die Energiebilanz eines elektrisch beheizten Drahtes aufzustellen. Die elektrisch zugeführte Leistung  $P_{\text{El}}$  ergibt sich aus dem Widerstand  $R$  und dem eingepprägtem Strom  $I_0$  zu

$$P_{\text{El}} = R \cdot I_0^2.$$

Die abgeführte Leistung setzt sich aus vier unterschiedlichen Anteilen zusammen [50], (vergleiche Abbildung 4.1):

<i>Freie (natürliche) Konvektion</i>	Durch Erwärmung entstehen Dichteunterschiede im umgebenden Gas, das warme Gas ist leichter als das kühlere und steigt nach oben, von der Wärmequelle weg. Dort kühlt es sich wieder ab und sinkt nach unten. Die dabei vom Heizelement weg transportierte Leistung ist proportional zur Temperaturdifferenz zwischen Gas und Heizelement.	$Q_K = A_M h_K \cdot (T_F - T_G)$
<i>Wärmeleitung</i>	Die Wärme wird sowohl durch Wärmeleitung im Gas ( $Q_{L,G}$ ) als auch durch Wärmeleitung im Festkörper ( $Q_{L,F}$ ) an den Aufhängungen/Kontaktstellen des Widerstandes abgeführt	$Q_L = Q_{L,G} + Q_{L,F} = \left( A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} \right) \cdot (T_F - T_G)$
<i>Wärmestrahlung</i>	Wärmestrahlung bezeichnet den Abtransport der Wärme durch elektromagnetische Wellen.	$Q_R = \epsilon \sigma T_F^4$
<i>Strömung</i>	Dieser Anteil bezeichnet die Wärmeabfuhr durch erzwungene Konvektion, d.h. durch eine von außen eingepprägte Strömung. Dieser Anteil ist proportional zur Wurzel der Strömungsgeschwindigkeit ( <i>Kings Law</i> [12])	$Q_S = A_Q h_S (T_F - T_G) \cdot  \vec{v} ^{0,5}$

$$\begin{aligned}
A_M &= \text{Mantelfläche des Widerstands} / \text{m}^2 \\
A_Q &= \text{Querschnittsfläche des Widerstands} / \text{m}^2 \\
T_F &= \text{Temperatur des Festkörpers (Drahtes)} / \text{K} \\
T_G &= \text{Temperatur des Gases} / \text{K} \\
h_K &= \text{Wärmeübergangskoeffizient für natürliche (freie) Konvektion} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \\
h_{L,G} &= \text{Wärmeübergangskoeffizient für Wärmeleitung im Gas} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \\
\lambda_F &= \text{Wärmeleitungskoeffizient im Draht} / \frac{\text{W}}{\text{mK}} \\
2 \cdot \Delta l^* &= \text{Länge des Drahtes}^1 / \text{m} \\
\epsilon &= \text{Emissionskoeffizient} \\
\sigma &= \text{Stefan-Boltzmann-Konstante} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} \\
h_S &= \text{Wärmeübergangskoeffizient für erzwungene Konvektion} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot \left(\frac{\text{s}}{\text{m}}\right)^{0,5}
\end{aligned}$$

Damit lässt sich folgende Wärmebilanz für den beheizten Widerstand aufstellen:

$$P_{\text{El}} = Q_K + Q_L + Q_R + Q_S$$

Der Anteil der freien Konvektion kann vernachlässigt werden, da in Mikrosystemen die räumlichen Abmessungen der Systeme so klein sind, dass der Anteil der freien Konvektion vernachlässigbar klein ist. Die Wärmestrahlung kann im Bereich der relevanten Betriebstemperaturen ebenfalls vernachlässigt werden.

$$P_{\text{El}} = Q_L + Q_S \quad (4.1)$$

Zusammen mit den dargestellten Beiträgen der Wärmeabfuhr ergibt sich für die Wärmebilanz folgender Ausdruck:

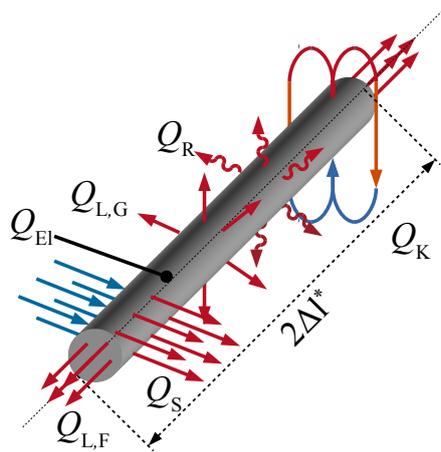
$$P_{\text{El}} = \underbrace{(T_F - T_G)}_{\Delta T} \left[ A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} + A_M h_S \vec{v}^{0,5} \right] \quad (4.2)$$

Wird dieser Ausdruck nach der sich einstellenden Temperaturdifferenz  $\Delta T = T_F - T_G$  umgeformt, ergibt sich

$$\Delta T = \frac{R \cdot I_0^2}{\left[ A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} + A_M h_S \vec{v}^{0,5} \right]} \quad (4.3)$$

Anhand dieser einfachen Bilanz lässt sich erkennen, welche Parameter Einfluss auf die Temperatur eines beheizten Drahtes haben. Vor allem der Einfluss der Wärmeabfuhr über die Einspannung/Befestigung des

<sup>1</sup>  $\Delta l$  entspricht der halben Drahtlänge, das heißt dem Abstand zwischen der heißesten Stelle in der Mitte und der kühlest Stelle, der Einspannung.



**Abbildung 4.1:** Wärmebilanz eines elektrisch erwärmten Drahtes. Die elektrisch erzeugte Wärme  $Q_{EI}$  wird durch Wärmeleitung über die Drahtenden  $Q_{L,F}$ , Wärmeleitung durch das umgebende Gas  $Q_{L,G}$ , Wärmestrahlung  $Q_R$  sowie durch erzwungene Konvektion  $Q_S$  abgeführt.

Heizelementes sollte so gering wie möglich gehalten werden, damit der Einfluss des umgebenden Gases möglichst hoch ist. Das geschieht durch Erhöhen der effektiven Länge  $\Delta l^*$  sowie einer Verringerung der Querschnittsfläche. Eine Erhöhung der Länge bringt zudem gleichzeitig eine Erhöhung der Mantelfläche  $A_M$  mit sich, so dass der Einfluss des Umgebungsgases noch weiter erhöht wird.

Die in Gleichung (4.3) aufgestellte Bilanz trifft jedoch noch keine Aussagen zur Verteilung der Wärme in realen Heizelementen sowie dem zeitlichen Verhalten. Sie gibt lediglich Aufschluss über die Einflussparameter und deren qualitative Auswirkungen.

#### 4.1.1 Zeitabhängige Erwärmung

Um das Modell hinsichtlich der Zeitabhängigkeit zu erweitern, wird Gleichung (4.1) um einen weiteren Term erweitert. Dieser Term stellt die Wärmekapazität und die dazugehörige Eigenerwärmung des Drahtes dar:

$$\rho \cdot c \cdot A_Q \cdot 2\Delta l^* \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + Q_S + Q_L = P_{EI} \quad (4.4)$$

$$\rho = \text{Dichte des Drahtmaterials} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c = \text{spezifische Wärmekapazität des Drahtmaterials} / \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2\text{K}}$$

Zusammen mit den in Gleichung (4.2) dargestellten Parametern ergibt sich

$$\underbrace{\rho \cdot c \cdot A_Q \cdot 2\Delta l^*}_{c_1} \frac{\partial \Delta T}{\partial t} + \underbrace{\left[ A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} + A_M h_S \bar{v}^{0,5} \right]}_{c_2} \cdot \Delta T = P_{EI} \quad (4.5)$$

Bei Gleichung (4.5) handelt es sich um eine inhomogene DGL erster Ordnung mit konstanten Koeffizienten. Die allgemeine Lösung der DGL lautet

$$\Delta T(t) = \frac{P_{\text{El}}}{C_2} \left( 1 - e^{-\frac{C_2}{C_1} \cdot t} \right) = \frac{R \cdot I_0^2}{\left[ A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} + A_M h_S \vec{v}^{0,5} \right]} \cdot \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right). \quad (4.6)$$

$$\tau = \frac{C_1}{C_2} = \frac{\rho \cdot c \cdot A_Q \cdot 2\Delta l^*}{A_M h_{L,G} + \frac{A_Q \lambda_F}{\Delta l^*} + A_M h_S \vec{v}^{0,5}} = \frac{\rho \cdot c \cdot \frac{\pi d^2}{4} \cdot 2\Delta l^*}{\pi d 2\Delta l^* h_{L,G} + \frac{\pi d^2}{4} \lambda_F + \pi d 2\Delta l^* h_S \vec{v}^{0,5}}$$

Für  $t \rightarrow \infty$  entspricht die transiente Lösung (Gleichung (4.6)) der in Gleichung (4.3) dargestellten stationären Lösung.

Von besonderem Interesse ist die Zeitkonstante  $\tau$ , die angibt, bei welcher Zeit 63 % des stationären Endwertes erreicht sind. Sie zu minimieren ist das Hauptziel bei der Verwendung von sehr dünnen Drähten als Messelemente in Strömungssensoren. Eine Verringerung des Durchmessers  $d$  bringt in jedem Fall eine Verringerung der Ansprechzeit mit sich,  $\tau \rightarrow 0$  für  $d \rightarrow 0$ .

Der zweite Parameter, der für die Zeitkonstante von Bedeutung ist, ist die Länge des Drahtes  $2 \cdot \Delta l^*$ . Hierfür ist es zweckmäßig zwei Grenzwertbetrachtungen durchzuführen [51]: eine für sehr lange Drähte, d.h.  $\Delta l^* \rightarrow \infty$ , und eine für sehr kurze Drähte,  $\Delta l^* \rightarrow 0$ . Für sehr lange Drähte gilt

$$\tau_1 = \lim_{\Delta l^* \rightarrow \infty} \tau = \frac{\rho c d}{4(h_{L,G} + h_S \vec{v}^{0,5})}. \quad (4.7)$$

Die Zeitkonstante hängt dann linear vom Durchmesser sowie umgekehrt proportional von den Wärmeübergangskoeffizienten  $h_{L,G}$  und  $h_S$  sowie von der Strömung ab. Für lange Drähte dominieren demnach die Wärmetransporte durch das Gas das Verhalten des Drahtes. Die Zeitkonstante lässt sich durch Verringern des Drahtdurchmessers verringern. Für sehr kurze Drähte gilt hingegen

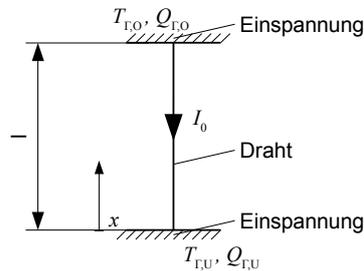
$$\tau_2 = \lim_{\Delta l^* \rightarrow 0} \tau = \frac{\rho \cdot c \cdot \Delta l^{*2}}{\lambda_F}. \quad (4.8)$$

In diesem Fall spielen Effekte, die durch das umgebende Gas hervorgerufen werden, keine Rolle mehr. Es dominiert der Wärmetransport durch die Aufhängung, was zwar eine sehr geringe Zeitkonstante hervorruft, jedoch die Abhängigkeit der Drahttemperatur vom strömenden Medium minimiert. Im realen System wird immer eine Mischform der beiden Zeitkonstanten auftreten. Nähere Betrachtungen des Drahtverhaltens sind möglich, wenn das Erwärmungsverhalten der Drähte etwas detaillierter modelliert wird. Dies geschieht im Folgenden, indem die Wärmeverteilung innerhalb der Drähte Berücksichtigung findet.

## 4.2 Modellierung der Wärmeverteilung in langen Drähten

Das Modell des beheizten Drahtes wird erweitert, indem der Draht als räumlich ausgedehntes Element betrachtet wird. Das heißt, der Draht weist keine einheitliche Temperatur über seine komplette Länge auf, sondern vielmehr folgt die Temperatur einer räumlichen Verteilung. Da der Draht lang im Vergleich

zu seinem Durchmesser ist, wird die Temperaturverteilung als eindimensional betrachtet. Insbesondere Effekte der Einspannung des Drahtes finden dadurch stärker Berücksichtigung als dies im vorhergehenden Modell der Fall war. Abbildung 4.2 zeigt einen beidseitig eingespannten Draht schematisch.



**Abbildung 4.2:** Schema eines beidseitig eingespannten Drahtes. Die Randbedingungen werden durch die Einspannung vorgegeben, und mit der Indizierung „Γ“ gekennzeichnet.

Der Draht wird mit dem Strom  $I_0$  bestromt. Die obere Einspannung sowie die untere Einspannung geben die Randbedingungen vor. Diese können in Form einer festgelegten Temperatur vorliegen oder in Form eines vorgegebenen Wärmestroms. Die Wärmeverteilung in Festkörpern wird mit der *Poisson*-Gleichung berechnet.

$$-\lambda_F \nabla^2 T = p_{El}. \quad (4.9)$$

$$\lambda_F = \text{Wärmeleitkoeffizient im Draht} / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$p_{El} = \text{elektrische Leistungsdichte im Draht} / \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

Da der Draht als eindimensionales Element betrachtet werden kann, vereinfacht sich die Gleichung folgendermaßen:

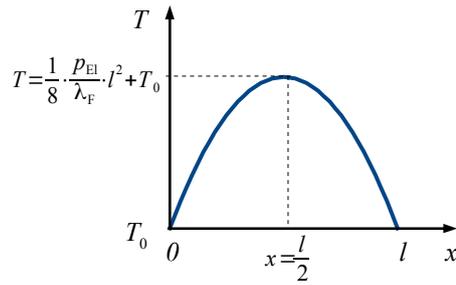
$$-\lambda_F \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = p_{El} \quad (4.10)$$

Ohne Berücksichtigung weiterer Effekte, wie den Wärmetransport durch das den Draht umgebende Gas oder der Erzeugung der Wärmeenergie durch Strom kann die Gleichung ohne weiteres durch zweifache Integration gelöst werden. Es ergibt sich für die Wärmeverteilung der folgende Ausdruck:

$$T(x) = -\frac{1}{\lambda_F} \cdot \left( \frac{1}{2} p_{El} x^2 + C_1 x + C_2 \right) \quad (4.11)$$

Die beiden Konstanten  $C_1$  und  $C_2$  lassen sich durch Einarbeiten der Randbedingung für die Temperatur an den Einspannungen berechnen,  $T(x=0) = T(x=l) = T_0$ . Daraus ergibt sich für eine Temperaturverteilung gemäß Abbildung 4.3

$$T(x) = \frac{p_{El}}{\lambda_F} l^2 \left( \frac{x}{l} - \frac{x^2}{l^2} \right) + T_0. \quad (4.12)$$

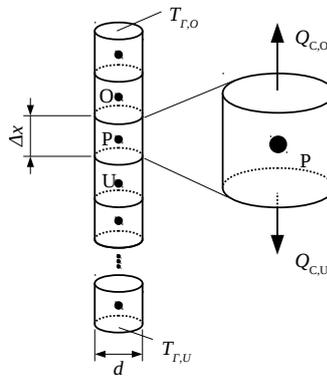


**Abbildung 4.3:** Temperaturverteilung in einem Draht als Lösung der eindimensionalen Poissongleichung

Damit weitere Effekte wie der Wärmetransport in das umgebende Gas oder die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands berücksichtigt werden können, wird die Poissongleichung nachfolgend numerisch gelöst. Dazu wird der Draht in einzelne Segmente unterteilt, und über jedes Segment die Wärmebilanz ähnlich zu dem oben dargestellten Bilanzmodell gebildet. Anschließend werden die Drahtsegmente zueinander in Bezug gesetzt.

#### 4.2.1 Diskretisierung der eindimensionalen Poissongleichung

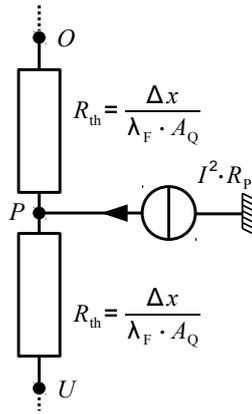
Die Diskretisierung hat das Ziel, die partielle Differentialgleichung in ein System aus vielen linearen Gleichungen umzuwandeln, die die Lösung an diskreten Stützstellen berechnen. Dazu wird der Draht in gleich große einzelne zylindrische Elemente der Länge  $\Delta x$  zerlegt (siehe Abbildung 4.4). Dann wird eines dieser Elemente betrachtet (Index P) und das Volumenintegral von Gleichung (4.10) über dieses Element gebildet. Zunächst gilt die Annahme dass keine Wärme über die Mantelfläche des Drahtes abfließen kann, sondern nur über die Stirnflächen.



**Abbildung 4.4:** Diskretisierung eines langen Drahtes in zylindrische Elemente mit der Länge  $\Delta x$ . Index „O“ und „U“ bedeuten oberer und unterer Nachbar. Die Indizes „Γ,O“ und „Γ,U“ stellen die obere bzw. untere Randbedingung dar. Der Index „P“ stellt das betrachtete Element dar.

$$-\lambda_F \int_V \Delta T dV = P_{El,P}$$

$P_{El,P}$  = elektrische Leistung im Drahtelement / W



**Abbildung 4.5:** Netzwerkäquivalent eines Drahtelementes

Die Leistungsdichte  $p$  wird durch die Integration über das Volumen in die Leistung  $P$  überführt. Durch Anwendung des *Gauß'schen Integralsatzes* wird das Volumenintegral in ein Oberflächenintegral abgebildet und damit in eine Wärmebilanz ähnlich zu Abschnitt 4.1 überführt.

$$-\lambda_F \int_A \text{grad} T \vec{n} \cdot \vec{A} = P_{\text{El},P}$$

Durch die Annahme, dass die Temperatur  $T_P$  in den Segmenten konstant ist, kann das Integral in eine Multiplikation überführt werden. Der Gradient wird in einen Differenzenquotienten umgewandelt.

$$-\lambda_F \left( \underbrace{A_Q \frac{T_O - T_P}{\Delta x}}_{Q_{C,O}} - \underbrace{A_Q \frac{T_P - T_U}{\Delta x}}_{Q_{C,U}} \right) = P_{\text{El},P} \quad (4.13)$$

Die Indizes „O“ und „U“ kennzeichnen dabei das benachbarte obere bzw. untere Element. Die Wärme eines Zylinderelementes kann dabei nur über die Stirnflächen in das benachbarte Element abfließen. Durch Umformen ergibt sich Gleichung (4.14):

$$-\frac{\lambda_F A_Q}{\Delta x} (T_O - 2T_P + T_U) = P_{\text{El},P} \quad (4.14)$$

mit der Querschnittsfläche des Drahtes  $A_Q = \pi \cdot \frac{d^2}{4}$  und der elektrischen Leistung  $P_{\text{El},P} = I \cdot R_P^2$  im Element.

Ein Drahtsegment lässt sich auch als Netzwerksegment eines thermischen Netzwerkes darstellen (vgl. Abbildung 4.5). Die Leistung  $P$ , die in einem Element umgesetzt wird, entspricht der elektrischen Leistung. Durch Aneinanderfügen einer Vielzahl solcher Elemente kann ein Draht modelliert werden.

---

## 4.2.2 Einarbeiten der Randbedingungen

---

Grundsätzlich gibt es bei partiellen Differentialgleichungen zwei unterschiedliche Arten von Randbedingungen.

- *Dirichlet'sche Randbedingung* Hierbei wird am Rand des Rechengebietes ein fester Wert vorgegeben. In diesem Fall entspricht dies der Vorgabe einer festen Temperatur auf dem Rand des Gebietes.
- *Neumann'sche Randbedingung* Diese Randbedingung gibt einen Gradienten am Rand des Rechengebietes vor. In dem Fall der Temperatur entspricht diese Randbedingung der Vorgabe eines Wärmestroms. Diese Randbedingung verwendet man vor allem, wenn Rechengebiete über ihre Ränder gekoppelt werden sollen.

### Randbedingungen für vorgegebene Temperatur (Dirichlet'sche Randbedingung)

Am Rand wird im einfachsten Fall eine konstante Temperatur  $T_\Gamma$  angenommen. Das entspricht einem fest temperierten Substrat. Am oberen Rand verändert sich die Diskretisierung wie folgt (vgl. Gleichung (4.13)):

$$-\lambda_F \left( A_Q \frac{T_O - T_P}{\frac{\Delta x}{2}} - A_Q \frac{T_P - T_U}{\Delta x} \right) = P_{EL,P}$$

$$-\frac{\lambda_F A_Q}{\Delta x} (2T_{\Gamma,O} - 3T_P + T_U) = P_{EL,P}$$

Für den unteren Rand gilt analog:

$$-\frac{\lambda_F A_Q}{\Delta x} (T_O - 3T_P + 2T_{\Gamma,U}) = P_{EL,P}$$

Für die im Zylinderelement umgesetzte Leistung gilt:  $P_{EL,P} = \frac{P_{EL,ges}}{n}$ , wobei  $n$  die Anzahl der Kontrollvolumina ist.

### Randbedingungen für vorgegebenen Wärmefluss (Neumann'sche Randbedingung)

Die zweite Möglichkeit zur Vorgabe einer Randbedingung ist die Vorgabe eines festen Wärmeflusses. Dies entspricht der Vorgabe eines Temperaturgradienten normal zur Randfläche. Der Wärmefluss an der Ober- bzw. Unterseite des Drahtes berechnet sich aus dem Temperaturgradienten folgendermaßen:

$$Q_{\Gamma,O} = -\lambda_F \cdot A_Q \frac{T_O - T_P}{\Delta x}$$

$$Q_{\Gamma,U} = -\lambda_F \cdot A_Q \frac{T_U - T_P}{\Delta x}$$

Diese Beziehungen werden in Gleichung (4.13) eingesetzt um die Diskretisierung für die Randvolumina zu gewinnen, an denen eine Neumann'sche Randbedingung festgelegt wurde. Es ergibt sich für das oberste bzw. unterste Volumen:

$$-\frac{\lambda_F A_Q}{\Delta x} \left( -\frac{Q_{\Gamma,O} \Delta x}{\lambda_F A_Q} - T_P + T_U \right) = P_{EL,P}$$

$$-\frac{\lambda_F A_Q}{\Delta x} \left( T_O - T_P - \frac{Q_{\Gamma,U} \Delta x}{\lambda_F A_Q} \right) = P_{EL,P}$$

Diese Randbedingung findet in den folgenden Berechnungen allerdings keine Berücksichtigung. Sie ist hier nur der Vollständigkeit halber angegeben. Sie ist anzuwenden, wenn die Modellierung der Drähte mit anderen Modellen (z.B. einer zusätzlichen Wärmekapazität durch das Substrat) gekoppelt werden soll.

#### 4.2.3 Aufstellen der Steifigkeitsmatrix

Aus den diskretisierten Gleichungen lässt unter der Annahme, dass am oberen und unteren Rand eine feste Temperatur  $T_\Gamma$  vorgegeben wird, sich das lineare Gleichungssystem  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{x} = \mathbf{b}$  aufbauen.

$$-G_{\text{th}} \begin{pmatrix} -3 & 1 & 0 & & & & 0 \\ & 1 & -2 & 1 & & & \vdots \\ 0 & 1 & -2 & 1 & & & \\ \vdots & & & & \ddots & & \\ & & & & & 0 & 1 & -2 & 1 \\ 0 & & & & & 0 & 1 & -3 & \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} T_1 \\ T_2 \\ \vdots \\ T_N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_{\text{El,P}} + G_{\text{th}} \cdot 2T_{\Gamma,\text{O}} \\ P_{\text{El,P}} \\ \vdots \\ P_{\text{El,P}} + G_{\text{th}} \cdot 2T_{\Gamma,\text{U}} \end{pmatrix} \quad (4.15)$$

mit

$$G_{\text{th}} = \frac{\lambda_{\text{F}} A_{\text{Q}}}{\Delta x}.$$

$G_{\text{th}}$  bezeichnet man in Analogie zur Elektrotechnik als *thermischer Leitwert*.

Die Lösung dieses Gleichungssystems liefert einen Wert  $T_i$  für jeden Punkt. Alle externen Einflüsse wie Randbedingungen oder zugeführte Leistungen lassen sich im *Lastvektor*  $\mathbf{b}$  darstellen. Die Matrix  $\mathbf{A}$  wird in Anlehnung an strukturmechanische Systeme auch *Steifigkeitsmatrix* genannt.

#### 4.2.4 Berücksichtigung der Wärmeab- oder Zufuhr durch Luft

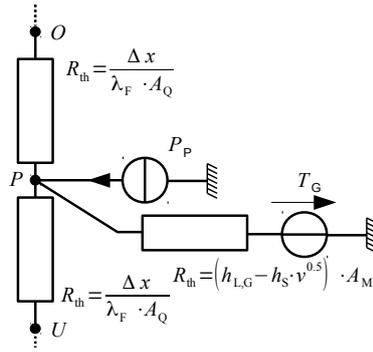
Bisher wurde in dem Modell nur die Wärmeableitung über die Aufhängung der Drähte berücksichtigt. Im Folgenden wird das diskretisierte Modell zusätzlich um die Wärmeabfuhr durch das umgebende Gas erweitert. Diese setzt sich aus einem konduktiven (Wärmeleitung) und konvektivem (Gasströmung) Anteil zusammen (vgl. Abschnitt 4.1).

$$\begin{aligned} Q_{\text{L,G}} &= A_{\text{M}} \cdot h_{\text{L,G}} \cdot (T - T_{\text{G}}) + A_{\text{M}} \cdot h_{\text{S}} \cdot (T - T_{\text{G}}) \cdot |\nu|^{0.5} \\ &= A_{\text{M}} \cdot (T - T_{\text{G}}) \cdot (h_{\text{L,G}} + h_{\text{S}} \cdot |\nu|^{0.5}) \end{aligned} \quad (4.16)$$

Gleichung (4.16) kann in Gleichung (4.14) eingefügt werden, die somit um die Wärmeabfuhr in das strömende Gas erweitert wird.

$$-G_{\text{th}} (T_{\text{O}} - 2T_{\text{P}} + T_{\text{U}}) = P_{\text{El,P}} - Q_{\text{L,G}} = P_{\text{El,P}} - A_{\text{M}} \cdot (T_{\text{P}} - T_{\text{G}}) \cdot (h_{\text{L,G}} + h_{\text{S}} \cdot |\nu|^{0.5}) \quad (4.17)$$

$$-G_{\text{th}} (T_{\text{O}} - 2T_{\text{P}} + T_{\text{U}}) + A_{\text{M}} \cdot (h_{\text{L,G}} + h_{\text{S}} \cdot |\vec{\nu}|^{0.5}) \cdot T_{\text{P}} = P_{\text{El,P}} + A_{\text{M}} \cdot (h_{\text{L,G}} + h_{\text{S}} \cdot |\vec{\nu}|^{0.5}) \cdot T_{\text{G}} \quad (4.18)$$



**Abbildung 4.6:** Netzwerkäquivalent eines Nanodrahtelementes. Der Wärmefluss, der durch die Umgebungsluft verursacht wird ist in dem Element mit berücksichtigt. Der zusätzliche Widerstand ist von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig. Die zusätzliche Spannungsquelle berücksichtigt die Temperatur des strömenden Gases

Die Lufttemperatur  $T_G$  kommt nur im Lastvektor vor, die Strömungsgeschwindigkeit  $v$  tritt auch in der Steifigkeitsmatrix auf.

Das neue Gleichungssystem hat die folgende Gestalt:

$$\left[ -G_{th} \cdot \mathbf{A} + \mathbf{I} \cdot A_M \cdot (h_{L,G} + h_S \cdot |\vec{v}|^{0.5}) \right] \cdot \mathbf{T} = \mathbf{b} + A_M \cdot (h_{L,G} + h_S \cdot |\vec{v}|^{0.5}) \cdot T_G \cdot \mathbf{e} \quad (4.19)$$

Das Netzwerkäquivalent unter Berücksichtigung des durch Luft verursachten Wärmeflusses ist in Abbildung 4.6 dargestellt. Es wurde um eine „Spannungsquelle“ und einen strömungsgeschwindigkeitsabhängigen Widerstand erweitert.

#### 4.2.5 Zeitliche Abhängigkeit

Durch Einführen der Wärmekapazität findet die zeitliche Abhängigkeit der Erwärmung Berücksichtigung. Dies geschieht analog zu Abschnitt 4.1.1.

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - \lambda_F \nabla^2 T = p$$

Zunächst wird nur die Ortsdiskretisierung gemäß Abschnitt 4.2.1 durchgeführt. Damit lässt sich die Wärmeleitungsgleichung als ein System linearer Differentialgleichungen mit konstanten Koeffizienten mit der Steifigkeitsmatrix  $\mathbf{A}$  folgendermaßen darstellen:

$$c \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot A_Q \frac{\partial \mathbf{T}}{\partial t} - G_{th} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T} = \mathbf{b}$$

Es entsteht für jedes Element des Drahtes eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung. Für das Netzwerkelement bedeutet das, dass eine Wärmekapazität eingefügt werden muss (vgl. Abbildung 4.7).

Rechnerisch wird eine Zeitdiskretisierung durchgeführt, indem der Differentialquotient der Zeit in einen Differenzenquotienten umgewandelt wird. Damit nicht extrem kleine Zeitschritte gewählt werden müssen, bietet sich das implizite Eulerverfahren für die Zeitintegration an [52].

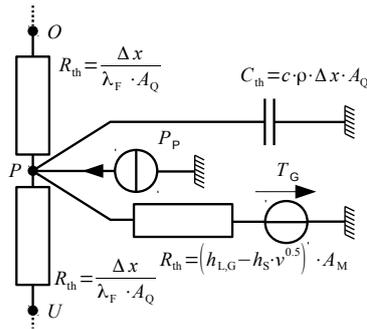


Abbildung 4.7: Netzwerkäquivalent mit zeitlicher Abhängigkeit

$$c \cdot \rho \cdot \Delta x \cdot A_Q \frac{T_{i+1} - T_i}{\Delta t} - G_{th} \cdot A \cdot T_{i+1} = b \quad (4.20)$$

Dieses Gleichungssystem wird nach  $T_{i+1}$  aufgelöst. Dabei entsteht für jeden Zeitschritt ein eigenes Gleichungssystem (Gleichung (4.21)). Die rechte Seite des Gleichungssystems hängt dabei von der Temperaturverteilung des vorhergehenden Zeitschritts ab.

$$\left( \mathbf{I} \cdot \frac{c \cdot \rho \Delta x \cdot A_Q}{\Delta t} - G_{th} \mathbf{A} \right) \mathbf{T}_{i+1} = \mathbf{b} + c \cdot \rho \cdot \frac{\mathbf{T}_i}{\Delta t} \quad (4.21)$$

#### 4.2.6 Berücksichtigung der elektrischen Größen

Die elektrischen Größen müssen berücksichtigt werden, wenn die Leistungsdichte nicht durch Einprägen einer Leistung  $P_{El}$  konstant gehalten, sondern wenn der Draht durch einen konstanten Strom oder durch eine konstante Spannung geheizt wird. Da die Leistungsdichte dann nichtlinear von der jeweiligen elektrischen Größe abhängt, ist das Verhalten des Drahtes bezüglich der elektrischen Größe nichtlinear.

#### 4.2.7 Erwärmung durch konstanten Strom

Die Leistung bestimmt sich aus dem eingepprägten Strom und dem elektrischen Widerstand des Drahtes bzw. des betrachteten Drahtsegmentes. Der Widerstand des Drahtelementes ändert sich jedoch in Abhängigkeit der Temperatur. Damit ergibt sich für die elektrisch erzeugte Leistung in einem Drahtsegment der folgende Ausdruck:

$$P_{El,P} = R_P(t) \cdot I_0^2 = \rho_{El}(T) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot I^2 = \rho_{El,0} \cdot (1 + \alpha(T_P - T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot I_0^2$$

$$\alpha = \text{Temperaturkoeffizient des spezifischen Widerstands} / \frac{1}{K}$$

$$T_0 = \text{Temperatur bei der } \rho_{El} = \rho_{El,0} \text{ gilt} / K$$

$$\rho_{El} = \text{spezifischer Widerstand} / \Omega m$$

$$\rho_{El,0} = \text{spezifischer Widerstand bei } T = T_0 / K$$

---

### 4.2.7.1 Implizite Implementierung

---

Da es sich nach wie vor um ein lineares System bezüglich der Temperatur handelt, ist eine implizite Lösung einfach möglich. Zur Berücksichtigung des temperaturabhängigen elektrischen Widerstands wird die Steifigkeitsmatrix aus Gleichungssystem (4.15) folgendermaßen erweitert:

$$\mathbf{A}_I = \mathbf{A} - \mathbf{I} \cdot \rho_{\text{El},0} \cdot \alpha \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot I^2$$

Im Lastvektor wird der Term für die Leistung  $P$  durch folgenden Ausdruck ersetzt.

$$P_{\text{El}} = \rho_{\text{El},0} \cdot (1 - \alpha T_0) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot I^2$$

Die implizite Lösung ermöglicht demnach die direkte Berücksichtigung des elektrischen Stroms und des temperaturabhängigen Widerstands in nur einem Rechenschritt. Das ist insbesondere dann vorteilhaft, wenn nur die stationäre Lösung gesucht wird. Zudem ist die Lösung numerisch deutlich stabiler als die nachfolgend erläuterte explizite Implementierung.

---

### 4.2.7.2 Explizite Implementierung

---

Ein anderes Konzept ist die explizite Implementierung des temperaturabhängigen Widerstands. Sie bietet sich an, wenn die transiente Lösung (Gleichung (4.20)) berechnet werden soll. Dann wird für jeden Zeitschritt der Widerstand aus der Temperatur des vorhergehenden Zeitschritts  $i$  berechnet. Nachfolgender Ausdruck verdeutlicht die Implementation ohne Berücksichtigung der konvektiven Effekte und Randbedingungen.

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\mathbf{T}_{i+1} - \mathbf{T}_i}{\Delta t} - G_{th} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{i+1} = \rho_{\text{El},0} \cdot (\mathbf{e} + \alpha(\mathbf{T}_i - \mathbf{e}T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot I_0^2$$

Der Vorteil ist die sehr einfache Implementierung, die jedoch mit einer vergleichsweise geringen numerischen Stabilität erkaufte wird. So sinkt die maximale Zeitschrittweite, die für die Berechnung verwendet werden kann. Dadurch steigt der Rechenaufwand an, so dass es sich empfiehlt, soweit möglich, immer die implizite Lösung zu bevorzugen.

---

### 4.2.7.3 Ableiten anderer elektrischer Größen

---

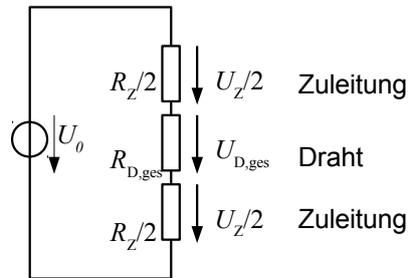
Aus dem Strom und dem Widerstand kann die über dem Drahtelement abfallende Spannung berechnet werden. Durch Aufsummieren ergibt sich die Spannung, die über dem kompletten Draht abfällt.

$$U_p = R_p \cdot I \Rightarrow U_{\text{ges}} = \sum U_p = I \sum R_p$$

Ebenfalls kann die Leistung, die im Draht erzeugt wird, berechnet werden, in dem man die in den einzelnen Drahtsegmenten umgesetzte Leistung aufsummiert.

## 4.2.8 Erwärmung durch konstante Spannung

Statt einen konstanten Strom in den Draht einzuprägen kann der Draht mit einer konstanten Spannung beaufschlagt werden. Bei der Spannungsspeisung hat der Widerstand der Zuleitung zum Draht einen signifikanten Einfluss auf das Verhalten und muss berücksichtigt werden. Für das elektrische Teilsystem gilt dabei folgendes Ersatzschaltbild.



**Abbildung 4.8:** Elektrisches Ersatzschaltbild für Konstantspannungsspeisung des Drahtes

Damit errechnet sich die Leistung, die in einem Drahtsegment erzeugt wird, folgendermaßen:

$$P_{\text{El,P}} = \frac{U_{\text{P}}^2}{R_{\text{P}}} = \frac{\left[ \frac{R_{\text{P}}}{R_{\text{Z}} + \sum R_{\text{P}}} U_0 \right]^2}{R_{\text{P}}} = \rho_{\text{e},0} (1 + \alpha (T_{\text{P}} - T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot \frac{U_0^2}{\left[ R_{\text{Z}} + \underbrace{\sum \rho_{\text{e},0} (1 + \alpha (T_{\text{P}} - T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2}}_{R_{\text{D,ges}}} \right]^2}$$

Wird die Leistung im Lastvektor durch obigen Ausdruck ersetzt entsteht ein nichtlineares Gleichungssystem bezüglich der Temperatur  $T_{\text{P}}$ . Dieses kann nur durch explizite Implementierung ohne weiteres gelöst werden, da das sonst entstehende nichtlineare System nur durch iterative Verfahren (z.B. Newton-Raphson-Verfahren) gelöst werden kann. Die explizite Implementation der Spannungsspeisung sieht folgendermaßen aus (ohne Berücksichtigung der konvektiven Effekte und Randbedingung):

$$c \cdot \rho \cdot \frac{\mathbf{T}_{i+1} - \mathbf{T}_i}{\Delta t} - G_{\text{th}} \cdot \mathbf{A} \cdot \mathbf{T}_{i+1} = \rho_{\text{El},0} (\mathbf{e} + \alpha (\mathbf{T}_i - T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2} \cdot \frac{U_0^2}{\left[ R_{\text{Z}} + \underbrace{\sum \rho_{\text{El},0} (1 + \alpha (T_i - T_0)) \cdot \frac{4\Delta x}{\pi d^2}}_{R_{\text{D,ges}}} \right]^2}$$

Auch hier werden die Werte aus dem letzten Iterationsschritt zur Berechnung des temperaturabhängigen Widerstands und damit der erzeugten Leistung herangezogen. Der Einfluss des Wärmetransports durch das Gas lässt sich durch Ergänzen der Matrix  $\mathbf{A}$  gemäß Abschnitt 4.2.4 Gleichung (4.17) berücksichtigen. Der Betrieb mit einer konstanten Spannung ist in der Praxis nicht weit verbreitet, da die Widerstände der Zuleitung das Verhalten stark beeinflussen und hier daher nur zur Vollständigkeit angegeben sind.

## 4.2.9 Berechnungsbeispiele

Im Folgenden wird an exemplarischen Beispielen das Temperaturverhalten der Drähte gezeigt. Dabei wurden für die Aufgabenstellung relevante Abmessungen und Materialparameter angenommen. Als Drahtmaterial wird in allen Beispielen Nickel angenommen, da sich die Mikro-Nano-Integration mit diesem Material gut durchführen lässt und der Elektrolyt zur Abscheidung preiswerter als Edelmetallelektrolyt ist. Als strömendes Medium wird Luft angenommen. Alle angenommenen Materialkennwerte sind in Tabelle 4.1 dargestellt.

**Tabelle 4.1: Materialparameter**

Größe	Einheit	Wert
spezifische Wärmeleitfähigkeit des Drahtes (Nickel)	$\lambda_F \left(\frac{W}{m \cdot K}\right)$	91
Dichte des Drahtes (Nickel)	$\rho \left(\frac{g}{cm^3}\right)$	8,9
spezifische Wärmekapazität	$c \left(\frac{J}{K \cdot kg}\right)$	444
konvektiver Wärmeübergangskoeffizient	$h_{L,G} \left(\frac{W}{m^2 K} \cdot \left(\frac{s}{m}\right)^{0,5}\right)$	125
konduktiver Wärmeübergangskoeffizient	$h_S \left(\frac{W}{m^2 K}\right)$	125
spezifischer Widerstand	$\rho_{El,0} (\Omega m)$	$7 \cdot 10^{-8}$
Linearer Temperaturwiderstandskoeffizient	$\alpha \left(\frac{1}{K}\right)$	$6 \cdot 10^{-3}$

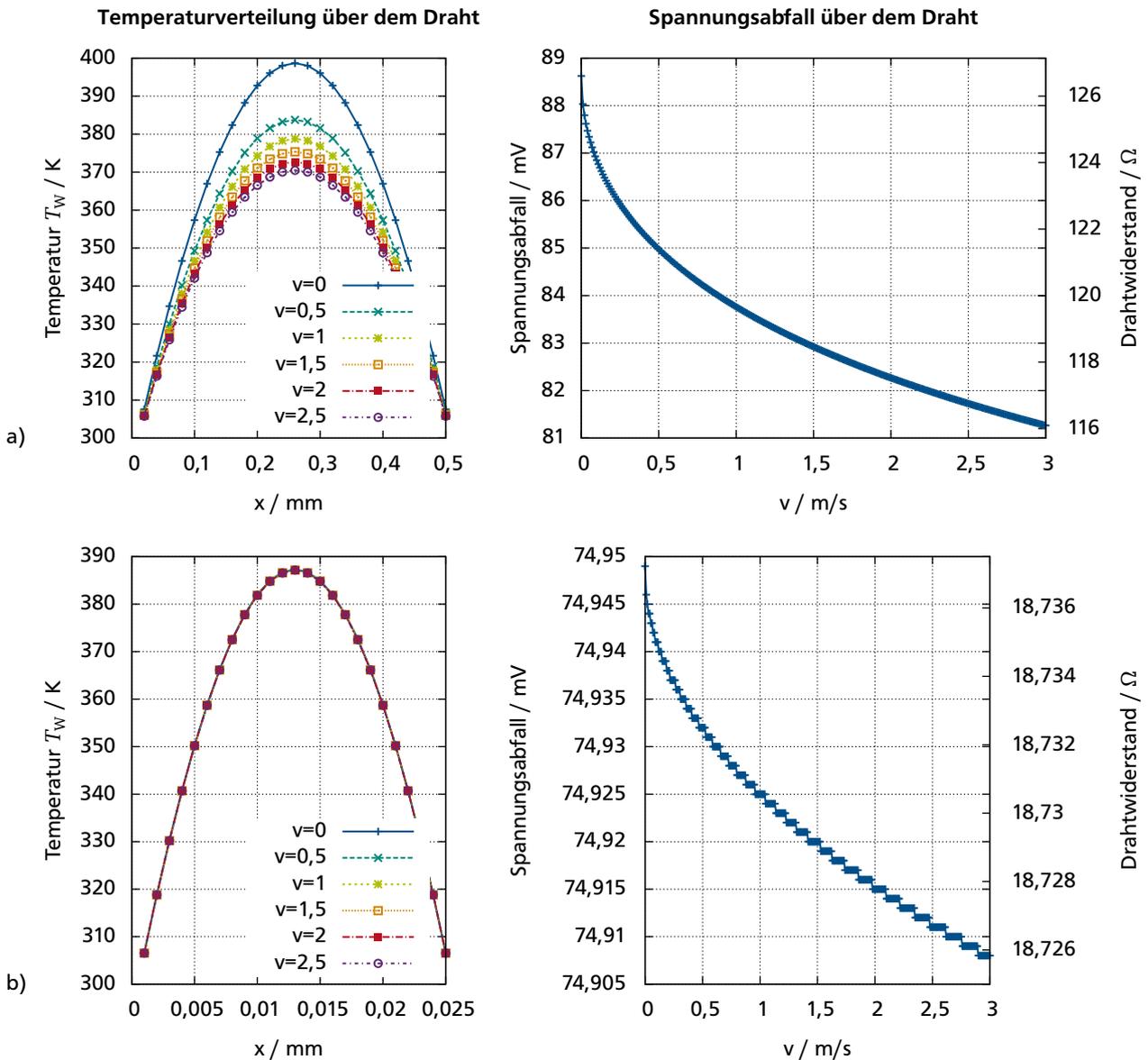
### 4.2.9.1 Abhängigkeit der Drahttemperatur von der Strömungsgeschwindigkeit

Von praktischem Interesse ist die Temperaturverteilung über dem Draht. Das Szenario ist das Folgende: Ein Draht wird mit einem Strom  $I_0$  geheizt und einer Gasströmung ausgesetzt. Die Strömung kühlt den Draht, was zu einer Verringerung des spezifischen und damit des gesamten Drahtwiderstands führt. Abbildung 4.9 zeigt die Temperaturverteilung über einen Draht sowie die Abhängigkeit des Drahtwiderstandes und der damit über dem Draht abfallenden Spannung von der Strömungsgeschwindigkeit um den Draht. Dabei wurden ein langer Draht von 500  $\mu m$  und einem Durchmesser von 700 nm, wie er mit der Ätzkantengalvanik<sup>2</sup> realisiert werden kann, sowie ein kürzerer Draht mit einer Länge von 25  $\mu m$  und einem Durchmesser von 400 nm, wie er üblicherweise mit der Ionenstrahlolithographie<sup>3</sup> realisiert werden kann, angenommen.

Zu erkennen ist, dass der 500  $\mu m$  lange Draht (Abbildung 4.9 a)) eine deutlich höhere Abhängigkeit von der Strömungsgeschwindigkeit zeigt, als der kürzere Draht. Das liegt daran, dass die Wärmeableitung in die Aufhängung (vgl. Gleichung (4.3)) dominant wird. Der Messeffekt sinkt daher mit sinkender Drahtlänge. Möglichst lange Drähte sind daher anzustreben. Die in der Ionenstrahlolithographie erreichbaren Drahtlängen sind jedoch auf Längen zwischen 20 und 100  $\mu m$  begrenzt. Bei dem 500  $\mu m$  langen Draht kann mit einem maximalen Ausgangssignal von  $\frac{\Delta U_{max}}{U} = 9\%$  bei einer Strömungsgeschwindigkeit von  $\nu = 3 \frac{m}{s}$  gerechnet werden. Bei dem 25  $\mu m$  langen Draht sinkt das maximale Ausgangssignal im gleichen Strömungsbereich auf  $\frac{\Delta U_{max}}{U} = 0,06\%$ . Damit steigt der schaltungstechnische Aufwand um das Signal zu extrahieren mit sinkender Drahtlänge deutlich an. Auf Grund der niedrigeren Grundwiderstände der kurzen Drähte ist auch die zu messende Spannung sehr gering, was den Aufwand für die Signalverarbeitung weiter erhöht.

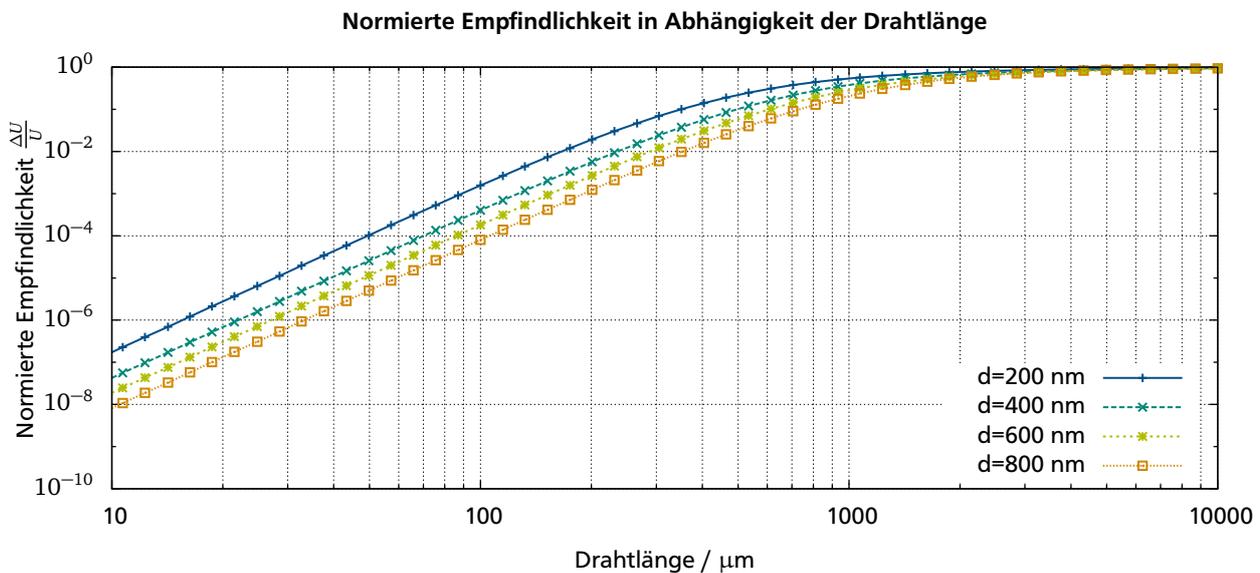
<sup>2</sup> In dieser Arbeit verwendetes Verfahren zur Erzeugung waagrecht über dem Substrat frei schwebenden Drähten mit Querschnitten im Submikrobereich

<sup>3</sup> Etabliertes Verfahren zur Erzeugung von Drähten im Submikro- und Nanometerbereich



**Abbildung 4.9:** links: Temperaturverteilung über dem Draht für verschiedene Luftströmungsgeschwindigkeiten. Der Wärmeabfluss über die Drahtaufhängung macht sich im parabelförmigen Verlauf der Temperaturverteilung bemerkbar, rechts: Spannungsabfall über dem Draht bei einer Speisung mit Konstantstrom über die Strömungsgeschwindigkeit  $v$ . Die Temperaturen für die Drahtaufhängung und Luft betragen 300 K. In a) und b) sind Drähte mit unterschiedlichen geometrischen Parametern, welche für die Fertigung relevant sind, dargestellt, a) Durchmesser: 700 nm, Länge: 500 μm, Heizstrom: 0,7 mA, b) Durchmesser: 400 nm Länge: 500 μm Heizstrom: 4 mA

Die Ergebnisse legen nahe zu untersuchen, welche Drahtlänge notwendig ist, um eine möglichst hohe Sensitivität bei einer gleichzeitig niedrigen Zeitkonstante zu erreichen. Dazu wird in Abbildung 4.10 die relative Empfindlichkeit  $\frac{\Delta U}{U}$  über die Drahtlänge für verschiedene Drahtdurchmesser dargestellt. Es ist zu erkennen, dass ab einer Drahtlänge von etwa 1000  $\mu\text{m}$  die normierte Empfindlichkeit ihr Maximum für die betrachteten, in der Arbeit relevanten, Drahtdurchmesser erreicht. Eine Erhöhung der Länge über 1000  $\mu\text{m}$  hinaus ist nicht notwendig. Es ist im Gegenzug ersichtlich dass mit dem Ionenspurätzverfahren, das maximal Drähte mit einer Länge von  $l = 100 \mu\text{m}$  ermöglicht, nur 0,3% der theoretisch möglichen Empfindlichkeit erreicht werden können. Es ist daher notwendig, ein Verfahren zu finden, dass die Herstellung von Drähten im Bereich von 1000  $\mu\text{m}$  Drahtlänge ermöglicht, um hohe stationäre Empfindlichkeiten erreichen zu können. Oder eine weitere signifikante Verringerung des Drahtdurchmessers ist von Nöten. Eine Möglichkeit geeignete Drähte herzustellen ist das in 5.9 vorgestellte Ätzkanten-Galvanik-Verfahren.

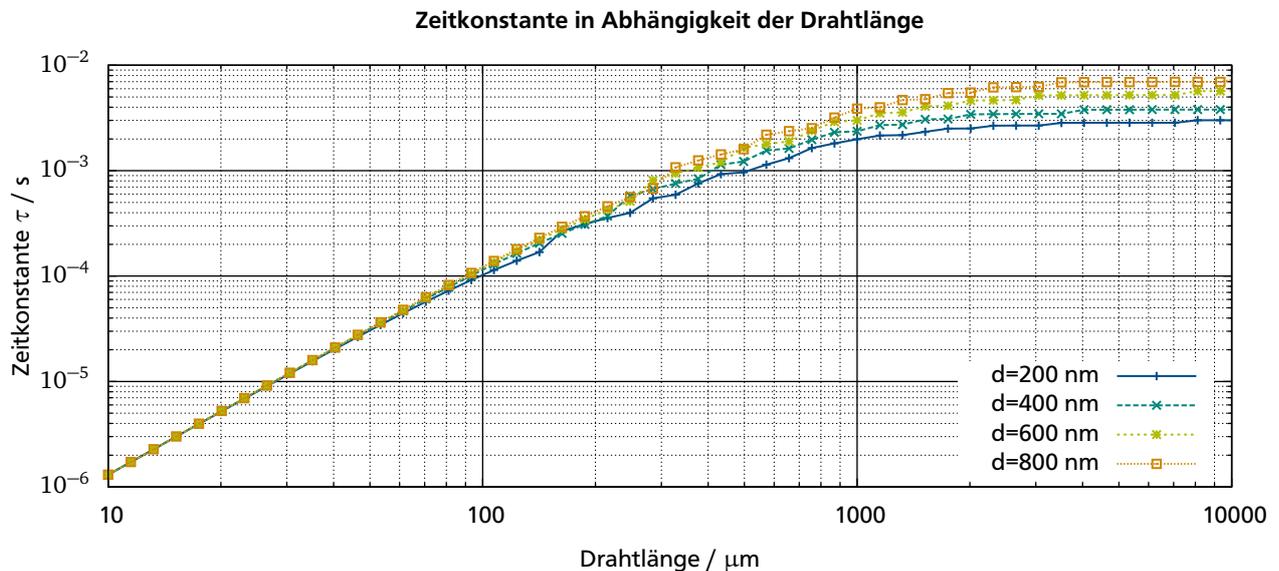


**Abbildung 4.10:** Normierte Empfindlichkeit  $\frac{\Delta U}{U}$  über die Drahtlänge  $l$  aufgetragen. Dabei wurde eine Strömungsgeschwindigkeit von  $v = 3 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  zu Grunde gelegt. Ab einer Länge von ca. 1000  $\mu\text{m}$  erreicht die Sensitivität der Drähte ihr Maximum für den betrachteten Durchmesserbereich.

#### 4.2.9.2 Transientes Verhalten von Drähten

Neben dem stationären Signal ist das Zeitverhalten der Drähte von entscheidender Bedeutung, um zu beurteilen, ob der Sensor später in der Lage ist, hochfrequente Wechselströme zu messen. Gemäß den Gleichungen (4.7) und (4.8) hängen die Zeitkonstanten für kurze Drähte nur von der Drahtlänge, nicht aber vom Drahtdurchmesser ab. Für lange Drähte hingegen spielt die Drahtlänge keine Rolle mehr, sondern nur der Durchmesser. Abbildung 4.11 zeigt die Abhängigkeit der Zeitkonstante von der Drahtlänge für verschiedene Drahtdurchmesser. Dabei wurde ein Stromsprung von 0 auf 0,5 mA auf den Draht aufgebracht. Es ist zu erkennen, dass die Zeitkonstante für steigende Drahtlängen einen Grenzwert zustrebt, der vom Durchmesser der Drähte abhängt. Die extrem niedrigen Zeitkonstanten für sehr kurze Drähte sind darauf zurückzuführen, dass der Absolutwert der Erwärmung der Drähte sehr niedrig ist. Damit ist auch die Empfindlichkeit sehr niedrig, so dass sehr kurze Drähte dennoch nicht für schnelle Strömungssensoren genutzt werden können. Die elektrische Zeitkonstante entspricht im Wesentlichen der

Zeitkonstante, die durch einen Strömungssprung ( $v$  von 0 auf einen endlichen Wert) aufgeprägt wird. Die Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit der Literatur [53].



**Abbildung 4.11:** Zeitkonstante  $\tau$  in Abhängigkeit der Drahtlänge für Drähte mit verschiedenen Durchmessern. Für Längen von mehr als 1000  $\mu\text{m}$  erreicht die Zeitkonstante einen Grenzwert, der vom Durchmesser der Drähte abhängt. Für sehr kurze Drähte wird auch die Zeitkonstante extrem klein und hängt nicht mehr vom Durchmesser der Drähte ab.

#### 4.2.10 Fazit

Eine Auswertung der Sensitivität der Drähte sowie der Zeitkonstante in Abhängigkeit der Drahtlänge führt zu folgenden Aussagen:

1. Mit sinkender Drahtlänge sinkt zwar auch die Zeitkonstante der Drähte, aber auch die Sensitivität. Um auch bei kurzen Drähten mit einer Länge von  $l < 100 \mu\text{m}$  ein messbares Signal zu generieren muss der Drahtdurchmesser in den Nanometerbereich gebracht werden. Es sind Durchmesser vom  $d < 200 \text{ nm}$  zu empfehlen.
2. Mit steigender Drahtlänge steigt auch die Zeitkonstante, gleichzeitig aber auch die Empfindlichkeit. Die Zeitkonstante strebt einem Grenzwert entgegen. Auch hier bewirkt eine Verringerung des Durchmessers eine Verbesserung des transienten Verhaltens.

Technologisch lassen sich mit dem Ionenspurätzverfahren Drähte von maximal 100  $\mu\text{m}$  Drahtlänge erreichen, mit kommerziell erhältlichen Folien ließen sich innerhalb der Arbeit nur Drähte mit 25  $\mu\text{m}$  Länge realisieren. Diese weisen zwar eine extrem niedrige Zeitkonstante im Bereich von 10  $\mu\text{s}$  auf, jedoch ist auch mit einer sehr geringen Sensitivität zu rechnen (vgl. Abbildung 4.10). Drähte mit dem Ätzkantengalvanikverfahren lassen sich prinzipiell beliebig lang erzeugen. Technologisch hat sich jedoch eine maximale Länge von 1000  $\mu\text{m}$  bei einem Durchmesser von ca. 700 nm realisieren lassen. Bei dieser Drahtlänge ist mit einer sehr guten Sensitivität zu rechnen, die Zeitkonstante liegt aber immer noch im ms-Bereich.

Die vorgestellte Modellierung bietet nur eine sehr grobe Abschätzung der erreichbaren Kenndaten. Im Design für die Sensoren ist demnach ein Kompromiss zwischen der Sensitivität und der Geschwindigkeit

der Sensoren zu finden. Daher werden beide Technologiekonzepte weiterentwickelt und gegenübergestellt.

### 4.3 Numerische Simulation mittels Finiter Volumen Methode

Bisher wurden nur einzelne Drähte modelliert und das grundsätzliche thermische Verhalten aufgezeigt. Hierbei wurde die Strömung nur durch einen Wärmetransportterm berücksichtigt. Effekte, die durch das Substrat, einen Strömungskanal etc. verursacht werden, können mit dem einfachen Modell nicht berücksichtigt werden. Des weiteren kann mit dem einfachen Modell der Wärmetransport von einem Heizelement zu einem Messelement, wie es zur Modellierung von kalorimetrischen Prinzipien nötig ist, nicht dargestellt werden. Für diesen Fall existieren zwar einfache analytische Modelle (vgl. [54]), jedoch können auch bei diesen Modellen keine Effekte, die durch Substrate und Kanal hervorgerufen werden, Berücksichtigung finden. Zudem bieten numerische Verfahren die Möglichkeit, den Wärmetransport von Strömung und Festkörper zu koppeln und die Besonderheiten bei der Strömung durch nanoskalige Strukturen zu berücksichtigen.

#### 4.3.1 Verwendete Gleichungen

Strömungen werden grundsätzlich durch fünf Erhaltungsgleichungen, die als Navier-Stokes-Gleichungen bekannt sind, beschrieben. Dabei entfallen eine Gleichung auf die Massenerhaltung, drei Gleichungen auf die Impulserhaltung und eine weitere Gleichung auf die Energierhaltung [55]. Die vollständigen Navier-Stokes-Gleichungen sind sehr aufwendig zu lösen, weshalb meist Vereinfachungen vorgenommen werden. Tabelle 4.2 zeigt die Vereinfachungsstufen für die Navier-Stokes Gleichungen in absteigender Komplexität.

**Tabelle 4.2:** Vereinfachungsmöglichkeiten für die Navier-Stokes (NS)-Gleichungen

Stufe	Gleichungstyp	Anzahl der Gleichungen	zu lösende Variablen
0	Allgemeine NS-Gleichungen	5 Differentialgleichungen, 12 Zustandsgleichungen	$\rho, v_x, v_y, v_z, p, e, h, T, \tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{yx}, \tau_{xz}, \tau_{zx}, \tau_{yz}, \tau_{zy}$
1	NS Gleichungen für Newton'sche Fluide	5 Differentialgleichungen, 3 Zustandsgleichungen	$\rho, u, v, w, p, e, h, T$
2	NS-Gleichungen für inkompressible Fluide	5 Differentialgleichungen, eine Zustandsgleichung	$v_x, v_y, v_z, p, e, T$
3	NS-Gleichungen für inkompressible Fluide unter Vernachlässigung der Reibungs- und Druckerarbeit	5 Differentialgleichungen	$v_x, v_y, v_z, p, T$
4	Reibungsfreie Strömung (Euler-Gleichungen) <sup>1</sup>	5 Differentialgleichungen, eine Zustandsgleichung	$v_x, v_y, v_z, p, e, T$
5	Potentialströmung	2 Differentialgleichungen	$v_x, v_y, v_z$

<sup>1</sup> Die Vernachlässigung der Reibung ändert die Natur der Differentialgleichungen. So treten keine Ableitungen zweiter Ordnung mehr auf, was die Lösung der Gleichungen deutlich vereinfacht [52]

$$\tau_{i,j} = \text{mech. Normal- bzw. Schubspannungen} / \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

$$v_i = \text{Geschwindigkeit in Richtung } i / \text{m}^2$$

$$\rho = \text{Dichte} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$T = \text{Temperatur} / \text{K}$$

$$\lambda_G = \text{Wärmeleitungskoeffizient im Fluid (Gas)} / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$e = \text{spezifische innere Energie} / \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$h = \text{spezifische Enthalpie} / \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

$$p = \text{Druck} / \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Da in dem Strömungssensor keine Geschwindigkeiten zu erwarten sind, die 30 % der Schallgeschwindigkeit im Fluid übersteigen, kann das Fluid als inkompressibel modelliert werden [52]. Zusätzlich werden in dieser Arbeit Reibungs- und Druckarbeit vernachlässigt, sowie eine konstante Wärmekapazität angenommen (4. Vereinfachungsstufe, siehe Tabelle 4.2. Dadurch vereinfacht sich die Energieerhaltungsgleichung zur Temperaturtransportgleichung. Das zu lösende Gleichungssystem sieht wie folgt aus:

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{Kontinuitätsgleichung}) \quad (4.22)$$

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) = \vec{f} - \nabla p + \nu \cdot \Delta \vec{v} \quad (\text{Impulserhaltungsgleichung}) \quad (4.23)$$

$$\rho c \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) T \right) - \lambda_G \cdot \Delta T = \dot{q} \quad (\text{Temperaturtransportgleichung}) \quad (4.24)$$

$$\nu = \text{kinematische Viskosität} / \frac{\text{m}^2}{\text{s}}$$

$$\vec{f} = \text{äußeres Kraftfeld (z.B. Schwerfeld)} / \frac{\text{N}}{\text{m}^3}$$

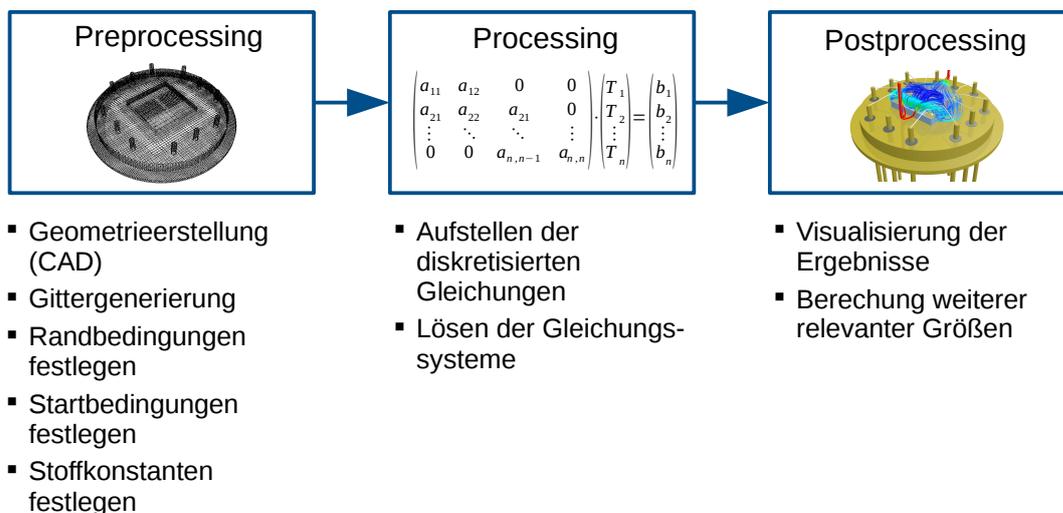
Zusätzlich zur Temperaturverteilung im Fluid muss auch das Temperaturfeld im Festkörper (Substrat, Messelement, etc.) berechnet werden. Da sich der Festkörper in Ruhe befindet, beschränkt sich der Berechnungsaufwand auf die Temperaturleitungsgleichung. Diese erhält man durch Weglassen des konvektiven Terms in Gleichung (4.24).

$$\rho c \cdot \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) - \lambda_F \cdot \Delta T = \dot{q} \quad (\text{Temperaturleitungsgleichung}) \quad (4.25)$$

Diese Gleichung entspricht der Gleichung (4.9) welche für den Draht bereits eindimensional gelöst wurde. Um Verwechslungen mit dem Druck  $p$  zu vermeiden, wird die Leistungsdichte im Folgenden mit  $\dot{q}$  bezeichnet.

### 4.3.2 Ablauf einer Strömungssimulation

Geschlossene analytische Lösungen für die Navier-Stokes-Gleichungen existieren nur für einfachste Geometrien. Daher werden Strömungsberechnungen üblicherweise numerisch durchgeführt. Grundsätzlich lässt sich eine numerische Strömungssimulation in drei Arbeitsschritte einteilen (vgl. Abbildung 4.12). Die numerische Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen wird allgemein mit *CFD - Computational Fluid Dynamics* - abgekürzt.



**Abbildung 4.12:** Ablauf einer Strömungssimulation

Im ersten Schritt wird die Geometrie mit Hilfe eines CAD<sup>4</sup> Programms erstellt. Dann wird das Rechengbiet festgelegt und in Kontrollvolumina zur Diskretisierung der Gleichungen zerlegt. Zusätzlich müssen noch Rand- und Startbedingungen sowie alle Stoffkonstanten festgelegt werden. Diese ganzen Einstellungen werden als *Preprocessing* bezeichnet. Anschließend wird aus dem diskretisierten Rechengbiet das Gleichungssystem erstellt und gelöst. Diesen Vorgang nennt man *Processing*. Das anschließende *Postprocessing* beschreibt die Visualisierung der Ergebnisse. Zusätzlich können weitere relevante Größen (z.B. Strömungswiderstand aus der Geschwindigkeit, Wärmefluss aus der Temperatur, etc.) berechnet werden. Die einzelnen Schritte werden nachfolgend erläutert und dabei auf die in dieser Arbeit verwendete Finite Volumen Methode<sup>5</sup> (FVM) bezogen.

#### Preprocessing

Im ersten Schritt wird das Rechengbiet mittels CAD festgelegt. Zur numerischen Lösung der Differentialgleichungen wird zunächst das Rechengbiet in kleine Elemente, die sog. *Kontrollvolumina* zerlegt. Um eine möglichst genaue Lösung zu gewährleisten, sollten die Seiten bei der FVM die einzelnen Kontrollvolumina möglichst orthogonal zueinander sein. Daher bieten sich hexaedrische Kontrollvolumina zur Diskretisierung der Gleichungen an. An jedem Rand des Rechengbietes müssen Randbedingungen festgelegt werden, um die Gleichungen eindeutig lösen zu können. Alle in den Gleichungen vorhande-

<sup>4</sup> Computer-Aided Design - rechnergestütztes Konstruieren

<sup>5</sup> weit verbreitetes Verfahren zur Strömungsmodellierung

---

nen Stoffkonstanten werden ebenfalls während des Preprocessing festgelegt. Das grundsätzliche mathematische Prinzip der Diskretisierung partieller Differentialgleichungen mit der FVM ist in Anhang A.1 dargestellt.

### **Processing**

Aus dem Rechnernetz werden die diskretisierten Gleichungen abgeleitet. So werden die partiellen Differentialgleichungen in ein Gleichungssystem überführt, welches zumeist iterativ gelöst wird. Die inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen erzeugen durch die Diskretisierung mittels eines FVM-Algorithmus ein lineares Gleichungssystem, für dessen Lösung leistungsfähige Solver zur Verfügung stehen. Das Ergebnis dieses Schrittes sind Werte der zu berechnenden Variablen in jedem Kontrollvolumen.

### **Postprocessing**

Als Postprocessing wird der Schritt nach dem eigentlichen Berechnen der Differentialgleichungen bezeichnet. Hierunter versteht man in allererster Linie das Visualisieren der Ergebnisse. Skalarfelder werden üblicherweise durch Einfärben der Zellen visualisiert, für Vektorfelder nutzt man Pfeile oder Stromlinien zur Visualisierung. Zusätzlich ist es manchmal auch notwendig, weitere relevante Größen aus dem berechneten Feld zu gewinnen, z.B. die resultierende Reibungskraft auf einen Körper, berechnet aus dem Geschwindigkeitsfeld.

---

#### **4.3.3 Finite Volumen Berechnung mit OpenFOAM**

---

Zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen kommt in dieser Arbeit die Software OpenFOAM [56] zum Einsatz. Das Programm besteht im Wesentlichen aus einer Sammlung von C++-Bibliotheken und -Programmen zur Lösung partieller Differential-, speziell der Navier-Stokes-Gleichungen. Die Besonderheit ist, dass der Quellcode der Bibliotheken und Programme offen zugänglich und damit modifizierbar ist. So lassen sich nötige Anpassungen an den Berechnungsalgorithmus durchführen. Zum Beispiel die Implementierung der Slip-Randbedingungen (vgl. Abschnitt 4.3.5) lässt sich leicht im Quellcode des Programms bewerkstelligen. Da hauptsächlich Bibliotheken zum Lösen der partiellen Differentialgleichungen zur Verfügung gestellt werden, findet die Strömungssimulation nicht unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche statt. Im folgenden wird kurz dargestellt, welche Programme in dieser Arbeit für die einzelnen Teile der Strömungssimulation zum Einsatz kamen.

### **Preprocessing**

Die CAD-Modelle wurden in einem externen CAD-Programm erstellt. Hauptsächlich kommen hier das Programm Inventor der Firma Autodesk oder das Programm SALOME (OPEN CASCADE SAS)<sup>6</sup> zum Einsatz. Bei letzterem handelt es sich um ein frei verfügbares Open Source Programm. Während CAD Programme nur die Geometrie für das Rechengebiet erstellen können, kann in Salome ein hexagonales Rechnernetz für einfache und ein tetraedrisches Netz für komplexere Geometrien erstellt werden. OpenFOAM liefert einen Vernetzer (snappyHexMesh) mit, der hexdominate Gitter mit einem Octree-Algorithmus erzeugen kann. Dafür muss das CAD-Modell als Surface-Tessellation-(STL) File vorliegen. Gerade für strömungsdynamische Berechnungen sind hexdominante Gitter gut geeignet. Nach der Netzerstellung werden die Randbedingungen in speziellen Textdateien festgelegt.

### **Processing**

Das Processing erfolgt mit den in OpenFOAM bereitgestellten Solvern. Dabei wird aus dem Rechnernetz, den Randbedingungen und den zu lösenden partiellen Differentialgleichungen das zu lösende

---

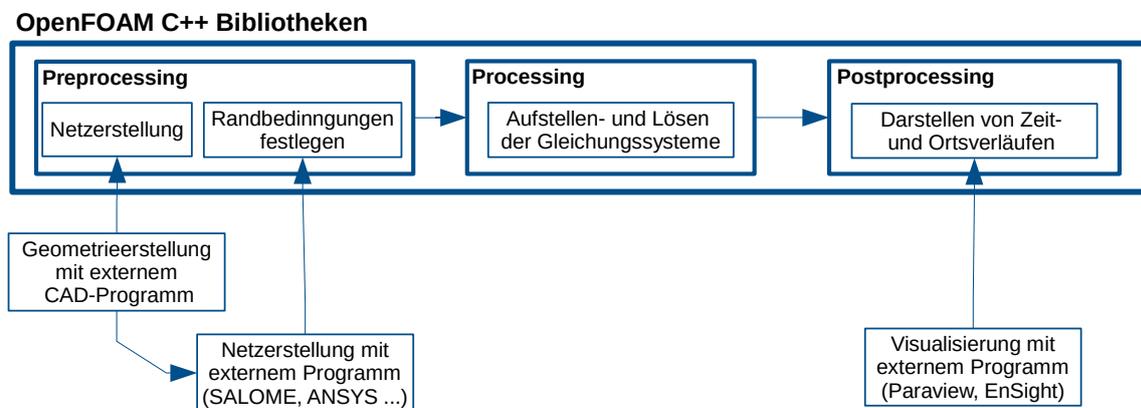
<sup>6</sup> [www.salome-platform.org](http://www.salome-platform.org)

Gleichungssystem erzeugt. Der Nutzer kann hierzu aus allen gängigen Diskretisierungsschemata wählen. Zur Lösung der so entstanden Gleichungssysteme stehen alle derzeit gängigen Lösungsalgorithmen zur Verfügung. Die Brechung kann auf beliebig vielen Prozessoren durchgeführt werden. Nach dem Processing stehen die Ergebnisse in einer Textdatei zur Verfügung. Für alle zu berechnenden Felder werden in jedem Kontrollvolumen und auf jeden Flächenmittelpunkt am Rand des Rechengebietes ein Wert berechnet und abgespeichert.

### Postprocessing

Die graphische Darstellung der mit OpenFOAM berechneten Ergebnisse wird üblicher in der Software Paraview<sup>7</sup> (KITWare) vorgenommen. Zusätzlich können zeitliche Verläufe oder Verläufe entlang einer Linie auch direkt aus den berechneten Werten gewonnen werden. OpenFOAM stellt hierfür eine Reihe einfacher Werkzeuge zur Verfügung. Zudem existieren eine Reihe von Konvertern, die die Ergebnisse in eine Reihe anderer Formate umwandeln können (ENSight, FLUENT ect.).

Das Prinzip der OpenFOAM Struktur ist in Abbildung 4.13 dargestellt.

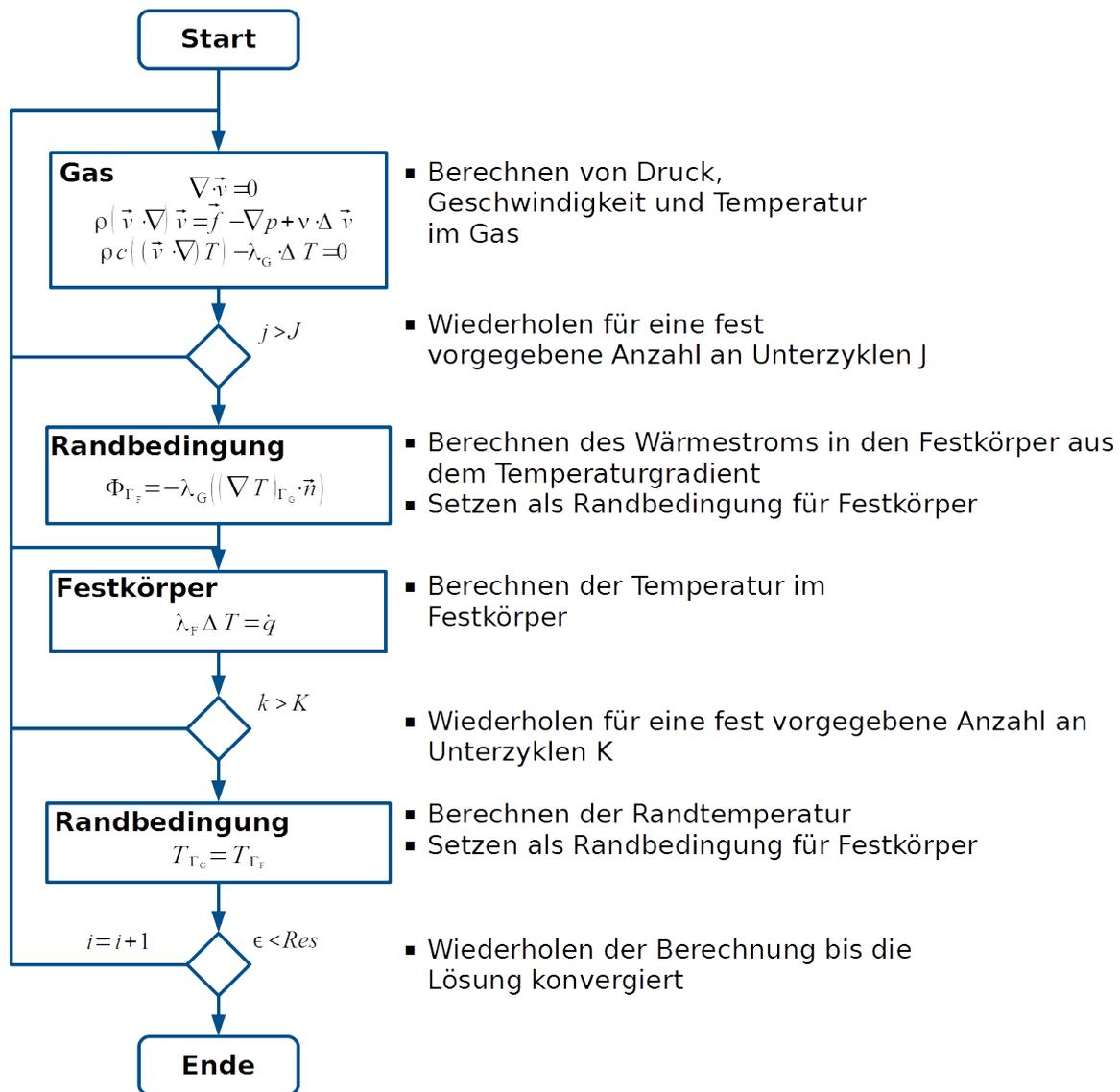


**Abbildung 4.13:** Struktur der CFD-Software OpenFOAM. Durch die Struktur als C++-Bibliotheken ist es nicht vorgesehen, alle Schritte unter einer einheitlichen Benutzeroberfläche durchzuführen.

#### 4.3.4 Kopplung zwischen Festkörper und Gas

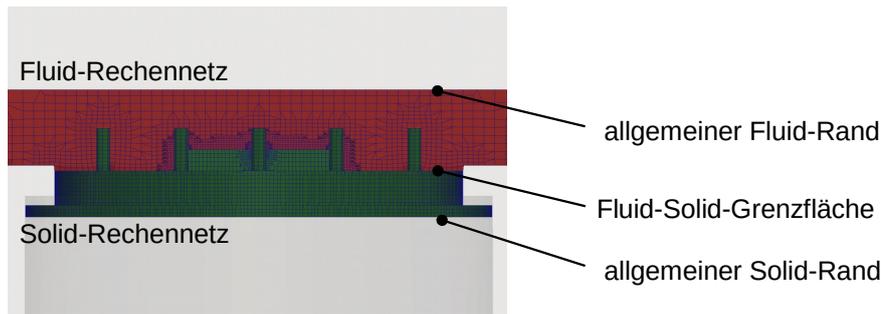
Um die Temperaturverteilung in einem Strömungssensor zu berechnen muss das Temperaturfeld in der Gasströmung (*Fluid*) und im Festkörper (*Solid*) gekoppelt berechnet werden. In dieser Arbeit wird ausschließlich eine explizite Kopplung durchgeführt. Diese findet über die Randbedingungen der sich berührenden Randflächen statt. Der Ablauf der Kopplung ist in Abbildung 4.14 dargestellt. Da die Lösung der Strömungsgleichungen iterativ erfolgt, werden nach jedem Rechenschritt die Randbedingungen an den Grenzflächen zwischen Gas- und Festkörper ausgetauscht. Nach der Berechnung des Strömungsfeldes (Druck und Geschwindigkeit) und der Temperatur im Gas wird der Wärmestrom  $\Phi_{T_F}$  aus dem Gas in den Festkörper berechnet. Dieser dient als Randbedingung für die Berechnung des Temperaturfeldes im Festkörper. Nach der Berechnung der Temperatur im Festkörper wird die Temperatur am Rand des Festkörpers als Randbedingung für die Berechnung der Temperatur im Gas im nächsten Berechnungsschritt gesetzt. Der Vorgang wird solange wiederholt, bis die Lösung konvergiert oder, bei transienten Lösungen, bis der Endzeitpunkt der Simulation erreicht ist [57]. Für transiente Lösung ist zusätzlich noch die Zeitdiskretisierung durchzuführen.

<sup>7</sup> [www.paraview.org](http://www.paraview.org)



**Abbildung 4.14:** Prinzip der Kopplung zwischen Festkörper und Gas. Die Indizes  $G$  und  $F$  bezeichnen die jeweilige Feldgröße im Gas oder Festkörper. Der Index  $T$  legt bedeutet, dass die jeweilige Feldgröße auf dem Rand des Rechengebietes betrachtet wird.

Abbildung 4.15 zeigt die Rechennetze für eine gekoppelte Fluid-Solid-Simulation. Grün dargestellt ist das Festkörper(Solid)-Rechennetz, rot dargestellt das Gas(Fluid)-Rechennetz. Die Kopplung findet über die gemeinsame Grenzfläche gemäß dem Schema aus Abbildung 4.14 statt. Die Kopplung ermöglicht eine Interpolation der Werte an der Fluid-Solid-Grenzfläche, so dass die Rechennetze nicht konform sein müssen (vgl. Abbildung 4.15). Das ermöglicht die komplett getrennte Erstellung der Rechennetze. Das Rechennetz für den Festkörper kann so einfach mittels eines tetraedrischen Vernetzungsalgorithmus erstellt werden, da es geringeren Anforderungen genügen muss als das Rechennetz für die Gasströmung. Auszüge aus dem OpenFOAM C++-Quellcode sind im Anhang dargestellt.



**Abbildung 4.15:** Beispiel für Rechennetze für eine gekoppelte Simulation von Festkörper (*Solid*, grün) und Gaströmung (*Fluid*, rot). Das Fluid repräsentiert den Strömungskanal, das grüne Rechengebiet (*Solid*) stellt den Sensor, der auf einen TO-8 Sockel platziert ist. Die Rechennetze müssen an der Grenzfläche nicht konform sein.

#### 4.3.5 Modellierung von Strömungen durch nanoskalige Strukturen

Die Navier-Stokes Gleichungen sind ein kontinuumsmechanisches Gesetz, welches nur akkurate Lösungen liefert, wenn Feldgrößen wie Dichte und Geschwindigkeiten als Mittelwerte über Volumina gebildet werden können, die klein genug zur numerischen Integration aber gleichzeitig groß im Vergleich zu den molekularen Größen sind [58]. Als Vergleichswert wird die mittlere freie Weglänge  $\bar{l}$  im Gas definiert, die folgendermaßen berechnet werden kann (Abschätzung gilt für Luft) [59]:

$$\bar{l} = \frac{k_B T}{\pi \sqrt{2} d_m^2 p} \approx \frac{7 \cdot 10^{-3} \text{ m} \cdot \frac{\text{N}}{\text{m}^2}}{p} \quad (4.26)$$

$$k_B = \text{Boltzmann-Konstante} / 1,380 \cdot 10^{-23} \frac{\text{J}}{\text{K}}$$

$$T = \text{Temperatur} / \text{K}$$

$$d_m = \text{Durchmesser der Gasmoleküle} / \text{m}$$

$$p = \text{Druck} / \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

Bei Normaldruck beträgt die mittlere freie Weglänge etwa 70 nm. Ein Maß für die Gültigkeit der Navier-Stokes Gleichungen ist das Verhältnis aus der mittleren freien Weglänge zur geometrischen Bezugslänge  $L$  (z.B: Kanalbreite oder Durchmesser des umströmten Drahtes) der Strömung, die sog. Knudsenzahl  $Kn$ .

$$Kn = \frac{\bar{l}}{L}$$

$$L = \text{Bezugslänge der Strömung} / \text{m}$$

Anhand der Knudsenzahl lassen sich mehrere Strömungsbereiche einteilen. Tabelle 4.3 zeigt die Strömungsbereiche, zusammen mit den zur Modellierung nötigen Verfahren.

**Tabelle 4.3:** Strömungsbereiche nach [59] und [58]

Strömungsbereich	Knudsenzahl	Modell
Kontinuumsströmung	$0 < Kn < 10^{-3}$	Navier-Stokes-Gleichungen
Gleitströmung (Slip-Flow)	$10^{-3} < Kn < 10^{-1}$	Navier Stokes-Gleichungen mit Slip-Randbedingungen
Nahezu freie Molekülströmung	$10^{-1} < Kn < 10$	DSMC <sup>1</sup> , MD <sup>2</sup>
freie Molekülströmung	$10 < Kn < \infty$	MD

<sup>1</sup> DSMC Diskrete Monte Carlo Simulation

<sup>2</sup> Molekulardynamische Simulation

Bis  $Kn \approx 10^{-3}$  können die konventionellen Navier-Stokes Gleichungen ohne Einschränkungen der Genauigkeit verwendet werden. Steigt die Knudsenzahl  $Kn$ , d.h. steigt die mittlere freie Weglänge oder sinkt die geometrische Abmessung des Systems, können bis zu einer Knudsenzahl  $Kn \approx 10^{-1}$  Navier-Stokes-Gleichungen mit Slip-Randbedingungen eingesetzt werden, um realistische Ergebnisse zu erhalten. Steigt die Knudsenzahl  $Kn$  weiter, müssen diskrete Methoden eingesetzt werden, die die molekulare Natur des Gases berücksichtigen. Dazu zählt die Diskrete Monte Carlo Simulation (DSMC) die etwa bis  $Kn \approx 10$  eingesetzt werden kann. Darüber hinaus müssen Molekulardynamische Simulationen eingesetzt werden, bei denen die Trajektorie jedes einzelnen Moleküls berechnet werden muss. Ab Knudsenzahlen von  $Kn > 10^{-3}$ , also dem Bereich, ab dem die konventionellen Navier-Stokes-Gleichungen versagen, spricht man von „*Verarmten Strömungen*“. Einen guten Überblick über die Modellierung verarmter Strömungen gibt [60].

In dieser Arbeit werden Drähte mit einem minimalem Durchmesser von  $d_{\min} \approx 400 \text{ nm}$  bzw. bei rechteckigen Querschnitten mit einer minimalen äußeren Abmessung von 200 nm verwendet. Dies entspricht einer maximalen Knudsenzahl von ca.  $Kn = 0,35$ . Konventionelle Navier-Stokes-Gleichungen sind daher nicht für die Modellierung geeignet.

Prinzipiell sollten in diesem Bereich diskrete Methoden zur Strömungsberechnung eingesetzt werden. Diskrete Berechnungsmethoden stellen Lösungen für die Boltzmann-Gleichung dar, d.h. es werden direkt die molekularen Bewegungen berechnet. Die makroskopischen Größen werden dann durch Integration bzw. Mittelwertbildung gewonnen. Durch die Modellierung der Moleküle sind die Berechnungen sehr aufwendig. Bei der DSMC, welche eine Clusterung einzelner Moleküle zur Verringerung des Rechenaufwandes einsetzt, wird ebenfalls ein Rechengitter verwendet, welches jedoch sehr schwierig auf komplexe Geometrien anzuwenden ist: Alle Zellen müssen etwa die gleiche Größe haben, sonst liefert der Algorithmus keine physikalisch korrekten Ergebnisse. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Geschwindigkeit der Moleküle berechnet wird, d.h. auch die thermische Geschwindigkeit  $c_0$  [59], die der Strömungsgeschwindigkeit überlagert ist.

$$c_0 = \sqrt{\frac{8RT}{\pi}} \quad (4.27)$$

$$R = \text{spezifische Gaskonstante} / 287,058 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Diese liegt in der Größenordnung der Schallgeschwindigkeit, für Luft und Raumtemperatur beträgt sie etwa  $c_{0,\text{Luft,RT}} \approx 470 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . Daher müssen für sehr langsame Strömungen extrem lange Rechenzeiten und lange Mittelungszeiten in Kauf genommen werden. Somit ist die Berechnung sehr langsamer Strömungen mit der DSMC immernoch sehr aufwendig und rechenintensiv. Für Überschallströmungen verarmter Gase (z.B. in der Raumfahrt die Strömungsberechnung bei der Modellierung des Wiedereintritts von

Raumfahrzeugen in die Erdatmosphäre) hat sich die DSMC jedoch zu einer weit verbreiteten Methode entwickelt.

Molekulardynamische Berechnungen sind per se so rechenaufwendig (Speicher- und Rechenbedarf für jedes Molekül), dass nur extrem kleine Rechengebiete untersucht werden können.

Unter Inkaufnahme von Ungenauigkeiten werden daher im Folgenden Navier-Stokes-Gleichungen mit Slip-Randbedingungen eingesetzt, um Strömungen in Wechselwirkung mit den Nanodrähten zu modellieren.

---

#### 4.3.5.1 Slip-Randbedingungen für die Navier-Stokes-Gleichungen

---

Üblicherweise werden für Geschwindigkeit und Temperatur an Festkörper-Gas-Grenzflächen (*Solid-Fluid-Grenzfläche*) sog. No-Slip-Randbedingungen festgelegt. Das bedeutet, an der Grenzfläche nimmt die Strömung die Geschwindigkeit der Grenzfläche an. Das gleiche gilt für die Temperatur, das Gas nimmt an der Grenzfläche die Temperatur des Festkörpers an.

##### Maxwell-Geschwindigkeits-Slip-Randbedingung

Bei steigender Knudsenzahl  $Kn$  ist nicht mehr sicher gestellt, dass ausreichend Moleküle mit der Oberfläche kollidieren, so dass ein vollständiges thermisches Gleichgewicht erreicht wird. D.h. die Strömung nimmt nicht die gleiche Geschwindigkeit der Oberfläche an. Dies führt zu einer Geschwindigkeitsdifferenz an der Grenzfläche, die proportional zur Scherspannung im Gas ist [58].

$$\Delta v|_W = v_{\text{Fluid}} - v_{\text{Wand}} = L_S \left. \frac{\partial v}{\partial y} \right|_W$$

$L_S$  wird als Slip-Länge bezeichnet,  $\left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_W$  bezeichnet den Geschwindigkeitsgradienten normal zur Oberfläche. Die Slip-Länge kann in Abhängigkeit der mittleren freien Weglänge  $\bar{l}$  sowie eines Impulsakkomodationskoeffizienten  $\sigma_v$  (materialabhängige Konstante) ausgedrückt werden. Nach Maxwell, der den Ausdruck 1879 aus gaskinetischen Überlegungen herleitete, wird die folgende Gleichung Maxwell-Slip Randbedingung genannt.

$$\Delta v|_W = v_{\text{Fluid}} - v_{\text{Wand}} = \frac{2 - \sigma_v}{\sigma_v} \bar{l} \left. \frac{\partial v}{\partial n} \right|_W \quad (4.28)$$

$\sigma_v$  = Impulsakkomodationskoeffizient

Sie gilt streng genommen nur für isotherme Oberflächen. Verallgemeinert man den Ausdruck auf allgemeine Oberflächen, kommt noch ein temperaturabhängiger Term hinzu. Dies wird in dieser Arbeit auf Grund des sehr geringen Einflusses nicht berücksichtigt sondern nur die in Gleichung 4.28 dargestellte Randbedingung verwendet. Die vollständige Maxwell-Slip-Randbedingung ist in [58] und [61] dargestellt.

##### Von-Smoluchowski-Geschwindigkeitsrandbedingung

Analog zum Geschwindigkeitsslip lässt sich eine Randbedingung für die Temperatur finden. Die Temperatur-Slip-Randbedingung wurde erstmalig von von Smoluchowski 1898 vorgestellt. Es gilt für die Differenz zwischen der Temperatur an der Oberfläche und der Temperatur der Strömung:

$$T_{\text{Fluid}} - T_{\text{Wand}} = \frac{2 - \sigma_T}{\sigma_T} \left[ \frac{2\gamma}{\gamma + 1} \right] \frac{\bar{l}}{Pr} \left( \frac{\partial T}{\partial n} \right)_w \quad (4.29)$$

$\sigma_T$  = thermischer Akkomodationskoeffizient

$\gamma$  = Verhältnis der spezifischen Wärmekapazitäten  $c_V$  und  $c_p$ <sup>8</sup> (für Luft ca. 1,4)

$Pr$  = Prandtl-Zahl, für Gase gilt:  $Pr \approx \frac{4\gamma}{9\gamma - 5}$

### Kopplung unter Berücksichtigung der Slip-Randbedingungen

Die in Abschnitt 4.3.4 dargestellte Kopplung muss um die Slip-Randbedingungen für die Temperatur erweitert werden. Hier zeigt sich, dass die sequentielle Kopplung eine verhältnismäßig einfache Implementierung modifizierter Randbedingungen erlaubt, da die Randbedingungen für die beiden Gebiete (Solid und Fluid) getrennt behandelt werden können. Abbildung 4.16 zeigt den Ablauf der Berechnung, der um die Slip-Randbedingung erweitert wurde.

Zunächst wird die Strömung sowie die Temperaturverteilung im Gas berechnet. Anschließend wird der Wärmestrom in den Festkörper ermittelt, der als Randbedingung für die Berechnung des Temperaturfeldes im Festkörper dient. Die Temperatur am Rand des Festkörpers wird aus diesem Feld berechnet. Die Randbedingung für die Berechnung der Temperatur im Gas berechnet sich aus der Randtemperatur des Festkörpers sowie der nach Gleichung (4.29) ermittelten Slip-Temperaturdifferenz. Anschließend wird die Temperatur und Strömung im Gas berechnet und der Vorgang wiederholt sich, bis die Lösung konvergiert oder, bei transienten Simulationen, der Endzeitpunkt erreicht ist.

Auf Grund der sequentiellen Kopplung sind viele Iterationsschritte nötig, damit das System konvergiert. Bei transienten Simulationen müssen die Zeitschrittweite entsprechend klein gewählt werden, um zu einer Lösung zu gelangen.

---

#### 4.3.6 Validierung des Lösungsalgorithmus anhand eines Pirani-Drucksensors

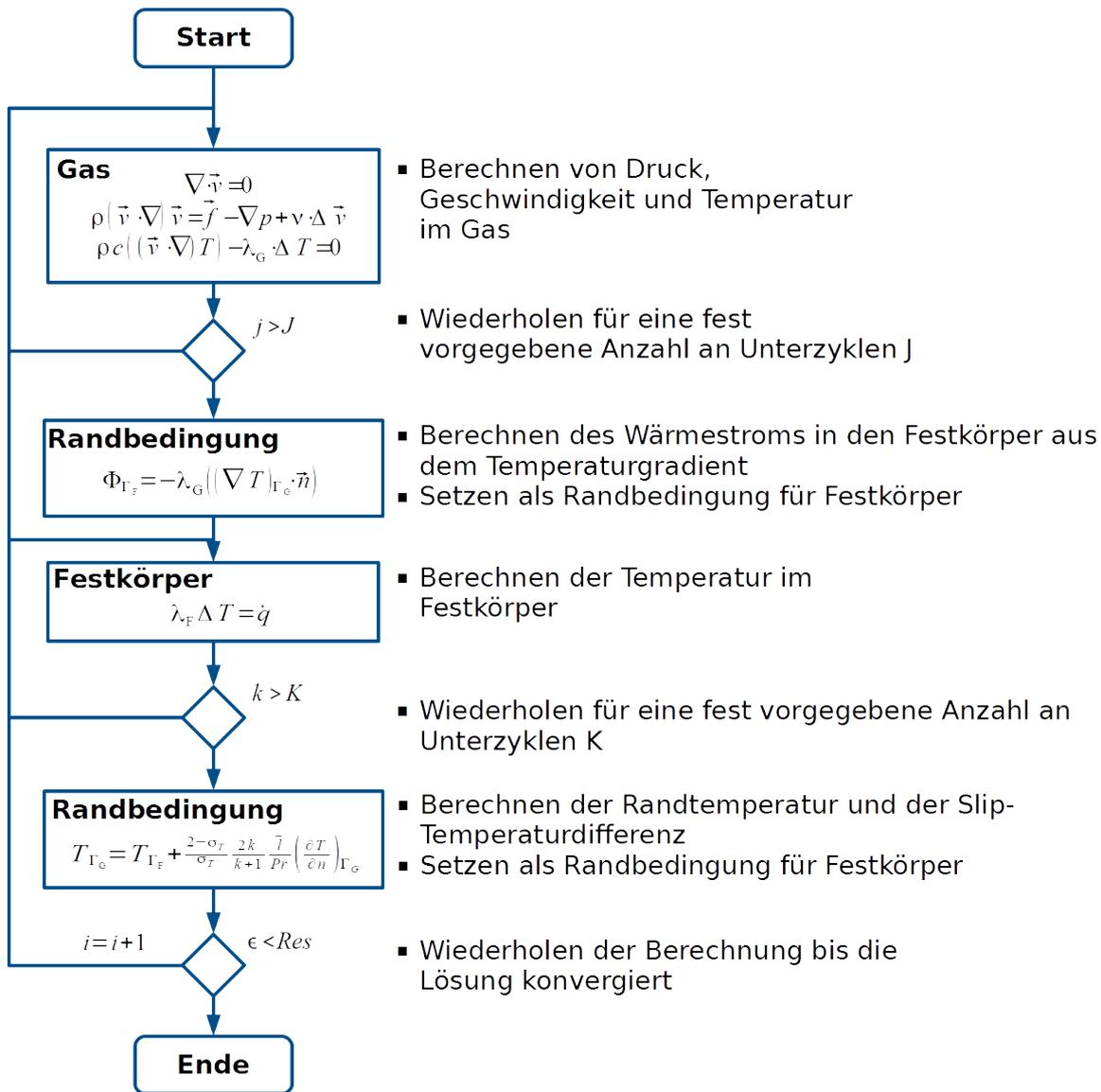
---

Da ein gekoppelter Lösungsalgorithmus mit Slip-Randbedingungen noch nicht aus der Literatur bekannt ist, muss er validiert werden. Hier kann auf die Modellierung einer Strömung verzichtet werden, da die Berechnung des Strömungsfeldes nicht mit dem Festkörper gekoppelt ist, sondern nur die des Temperaturfeldes. Als Validierungsszenario kommt ein thermischer Vakuumsensor, ein sog. Pirani-Sensor zum Einsatz [62]. Piranisensoren messen den druckabhängigen Wärmeverlust eines elektrisch beheizten Drahtes oder Dünnschichtheizers.

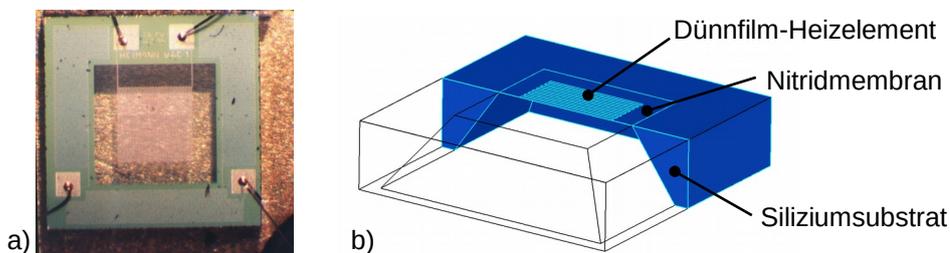
Durch eine Verringerung des Gasdrucks wird die freie Weglänge der Gasmoleküle  $\bar{l}$  erhöht, bis die Knudsenzahl soweit ansteigt, dass die konventionellen Navier-Stokes-Gleichungen ungültig werden. Abbildung 4.17 zeigt den simulierten Piranisensor, der an der Hochschule Rhein-Main in Rüsselsheim gefertigt wurde.

Auf der Oxid-Nitrid-Membran ist in Dünnschichttechnologie ein Heizelement aufgebracht, welches elektrisch erhitzt wird. Sinkt der Luftdruck, steigt damit die mittlere freie Weglänge und der Temperatur-austausch zwischen Sensor und Umgebungsgas wird verringert. Dadurch kommt es zu einer Erwärmung des Heizelementes und damit zu einer Steigerung des Widerstandes. Dies wird mit einer Viertelbrücke gemessen. Da bei sehr niedrigen Drücken die Wärmestrahlung eine große Rolle spielt, muss sie bei der

<sup>8</sup>  $c_V$  bezeichnet die spezifische Wärmekapazität bei konstantem Volumen,  $c_p$  die bei konstantem Druck

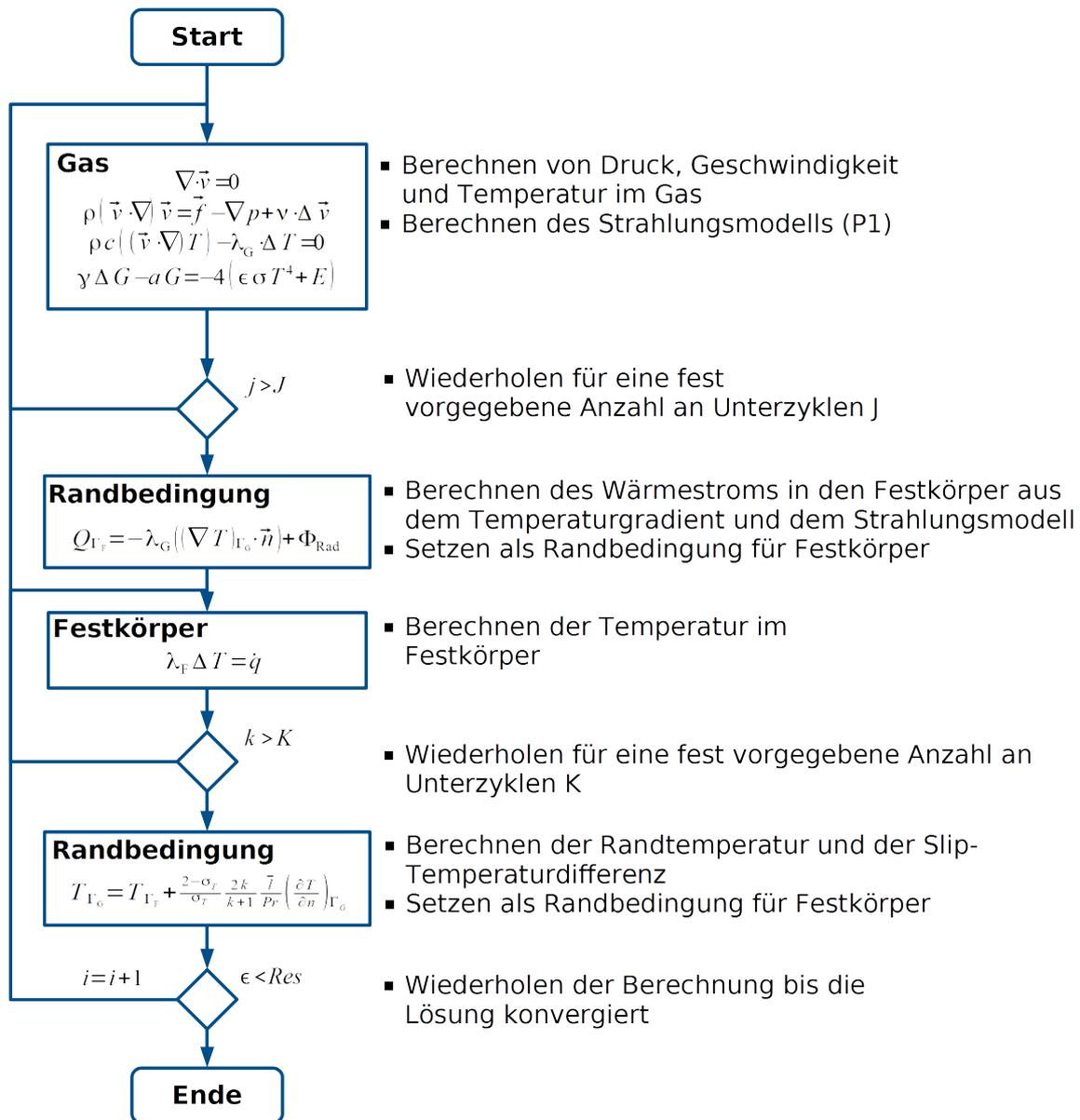


**Abbildung 4.16:** Prinzip der Kopplung zwischen Festkörper und Gas unter Berücksichtigung der v. Smoluchowski'schen Slip Randbedingung. Die Indizes  $G$  und  $F$  bezeichnen die jeweilige Feldgröße im Gas oder Festkörper. Der Index  $\Gamma$  legt bedeutet, dass die jeweilige Feldgröße auf dem Rand des Rechengebietes betrachtet wird.



**Abbildung 4.17:** a) Resistiver Piranisensor mit mäanderförmigem Heiz-/Messwiderstand [62]. Die Chipgröße beträgt 2x2 mm, die Membranfläche 1080x1080  $\mu\text{m}$ . Die Dicke der Membran beträgt 800 nm.; b) CAD-Modell des Sensors. Dieses Modell dient als Grundlage für die Berechnung der Temperaturfelder

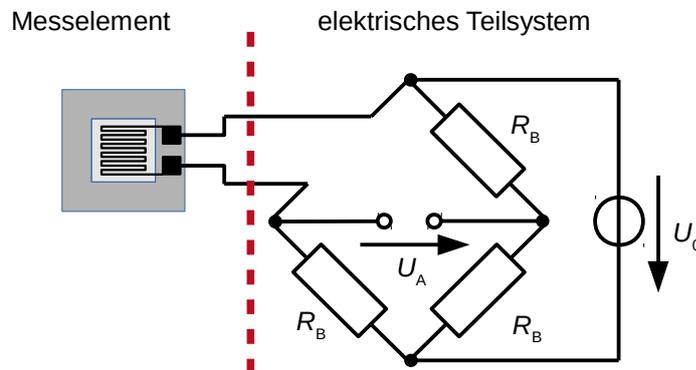
Modellierung des Piranisensors mit berücksichtigt werden. Dazu wird der in Abbildung 4.16 dargestellte Algorithmus um einen Berechnungsschritt für Wärmestrahlung erweitert. Der erweiterte Algorithmus ist in Abbildung 4.18 dargestellt.



**Abbildung 4.18:** Prinzip der Kopplung zwischen Festkörper und Gas unter Berücksichtigung der v. Smoluchowski'schen Slip Randbedingung. Zusätzlich wird ein Modell für die Strahlung gelöst. Die Indizes  $G$  und  $F$  bezeichnen die jeweilige Feldgröße im Gas oder Festkörper. Der Index  $T$  legt bedeutet, dass die jeweilige Feldgröße auf dem Rand des Rechengebietes betrachtet wird.

Zur Berechnung der Strahlung wird das P1-Modell verwendet. Dieses Modell ist vergleichsweise effektiv zu berechnen und für das betrachtete Modell ausreichend genau. Es überführt die Berechnung der Strahlung in eine partielle Differentialgleichung, die im selben Zyklus gelöst wird, wie das Strömungs- und Temperaturfeld im Gas. Da im Fall des Vakuumsensors davon ausgegangen wird, dass sich das Gas in Ruhe befindet, wird in diesem Fall nur das Temperaturfeld und das Strahlungsmodell berechnet. Um Berechnungs- und Messergebnisse zu vergleichen, muss das elektrische Teilsystem mit berücksichtigt

werden. Der Heiz-/Messwiderstand des Messelementes ist als Viertelbrücke verschaltet, die spannungsgesteuert wird. Als Messgröße zugänglich ist die Ausgangsspannung der Messbrücke.



**Abbildung 4.19:** Das Messelement ist in einer Viertelbrücke verschaltet. Die Heizleistung ergibt sich aus der Speisespannung  $U_0$ . Die Ausgangsspannung  $U_A$  hängt vom Widerstand des Messelementes sowie der Speisespannung ab.

Für die im Heizelement umgesetzte Leistung  $P_{El}$  gilt

$$P_{El} = \frac{R_{Heizer} \cdot U_0^2}{(R_{Heizer} + R_B) \cdot V_{Heizer}}$$

$R_{Heizer}$  = Widerstand des Heiz-/Messelementes auf dem Sensor /  $\Omega$

$R_B$  = Brückenwiderstand /  $\Omega$

$V_{Heizer}$  = Volumen des Heiz-/Messelementes auf dem Sensor /  $m^3$

Für die Ausgangsspannung gilt damit

$$U_A = \left( \frac{R_B}{R_B + R_{Heizer}} - \frac{1}{2} \right) U_0$$

Der Widerstand des Heiz- / Messelementes muss ebenfalls berechnet werden.

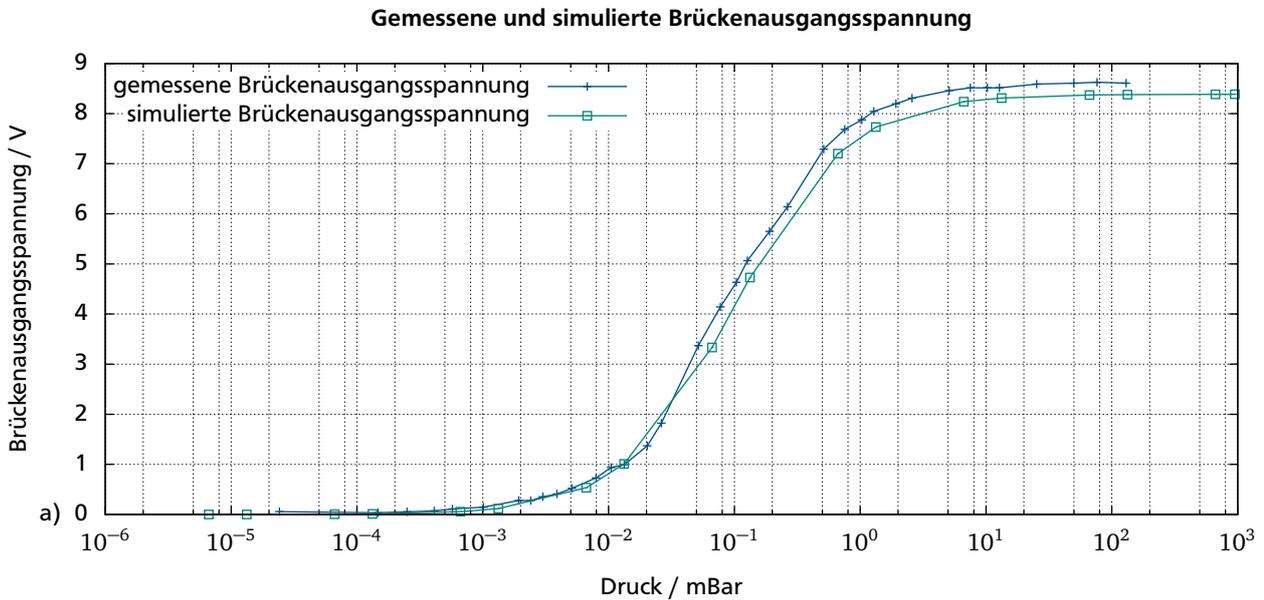
$$R_{Heizer} = R_{Heizer,0} (1 + \alpha (T - T_0))$$

Die Gleichungen für das elektrische Teilsystem werden mit in jedem Rechenschritt gelöst. Abbildung 4.20 a) zeigt die simulierte Ausgangsspannung über den Druck in Abhängigkeit des Umgebungsdruckes. Abbildung 4.20 b) zeigt die normierten Ausgangsspannungen im Vergleich. Die sehr gute Übereinstimmung zwischen Modell und Messung ist zu erkennen. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Modifikationen der Randbedingungen gut die physikalischen Gegebenheiten abbilden und der Algorithmus verwendet werden kann, um den Wärmeaustausch in Strukturen zu berechnen, deren Abmessungen im Bereich der mittleren freien Weglänge des Gases liegen.

Tabelle 4.4 zeigt die Werte, die in der Simulation angenommen wurden. Die Modellierung wurde in [63] vorgestellt.

**Tabelle 4.4:** Parameter für die Simulation des Piranisensors

Größe	Einheit	Wert
thermische Leitfähigkeit des Siliziums $\lambda_{\text{Si}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	150
thermische Leitfähigkeit der Nitridmembran $\lambda_{\text{Si}_3\text{N}_4}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	2
thermische Leitfähigkeit der Luft $\lambda_{\text{Gas}}$	$\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	0,026
thermischer Akkomodationskoeffizient $\sigma_T$		0,9
Emissionskoeffizient der Membran $\epsilon$		0,3
Membranfläche	$\mu\text{m}^2$	1080 x 1080
Membrandicke	nm	800
Brückenwiderstand $R_B$	$\Omega$	1130
Heizwiderstand bei 300 K $R_{\text{Heizer},0}$	$\Omega$	1000
Brückeneingangsspannung $U_0$	V	1
thermischer Widerstandskoeffizient $\alpha$	$\frac{1}{\text{K}}$	$3,9 \cdot 10^{-3}$



**Abbildung 4.20:** a) Simulierte und gemessene Brückenausgangsspannung des Piranisensor in Abhängigkeit des Umgebungsdruckes; b) normierte Brückenausgangsspannung in Abhängigkeit des Druckes

## 4.4 Modellierung des photoakustischen Effekts

Ein Ausgangspunkt dieser Arbeit bildet der photoakustische Effekt. Derzeit gibt es kein numerisches Programm, mit welchem dieser Effekt modelliert werden kann. Auch hier bildet das Softwarepaket OpenFOAM eine Lösungsmöglichkeit, da die zur Strömungsberechnung herangezogenen Differentialgleichungen modifiziert werden können. Der photoakustische Effekt beruht auf der Absorption von Licht in einem gasförmigen Medium. Die absorbierte Energie wird in Wärmeenergie umgewandelt. Die Erwärmung des Gases führt zu einer Ausdehnung desselben. Gemessen wird die resultierende Druckerhöhung oder Ausgleichsströmung.

Die bisher zur Modellierung von Strömungen herangezogenen Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide sind dafür allerdings nicht geeignet, da die Energieerhaltungsgleichung von der Kontinuitäts- bzw. Impulserhaltungsgleichung entkoppelt ist. Um solche Effekte zu berücksichtigen, werden für die Modellierung des photoakustischen Effektes die Navier-Stokes-Gleichungen für kompressible Newton'sche Fluide zur Simulation herangezogen [64].

die Gleichungen für die Massen- und Impulserhaltung lauten für das kompressible Modell:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \rho = 0 \quad (\text{Massenerhaltungsgleichung}) \quad (4.30)$$

$$\frac{\partial \rho \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)(\rho \vec{v}) = \vec{f} - \nabla p + \nu \cdot \Delta \vec{v} \quad (\text{Impulserhaltungsgleichung}) \quad (4.31)$$

Im Gegensatz zum inkompressiblen Modell auf Seite 49 wird in diesem Modell die Dichte als veränderliche Größe mit berücksichtigt. Von besonderem Interesse ist die Energieerhaltungsgleichung, die in OpenFOAM als Enthalpieerhaltungsgleichung für das kompressible Modell implementiert ist. Der Enthalpieerhaltungsgleichung wird ein Term hinzugefügt, der der vom Gas absorbierten Strahlungsenergie  $s$  entspricht.

$$\frac{\partial \rho h}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) h - \Delta \frac{\lambda_G}{\rho c} h = \frac{Dp}{Dt} + s \quad (4.32)$$

Der Term  $\frac{Dp}{Dt}$  bezeichnet die *substantielle Ableitung*  $\frac{Dp}{Dt} = \frac{\partial p}{\partial t} + (\nabla \cdot \vec{v})p$ . Die absorbierte Energie wird mit Hilfe des *Lambert-Beer'schen* Gesetzes berechnet. Für die absorbierte Strahlungenergiedichte gilt:

$$s = \alpha \cdot I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta x} \quad (4.33)$$

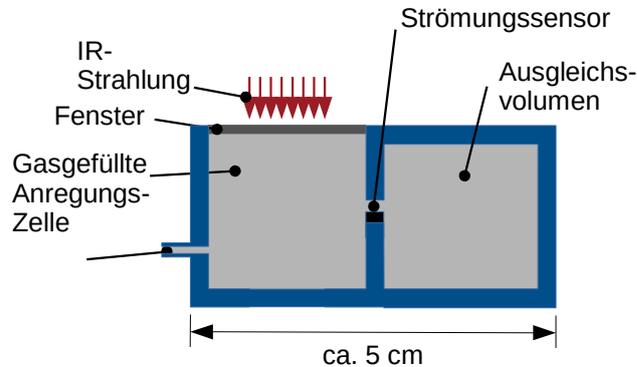
$$\alpha = \text{Absorptionskoeffizient} / \frac{1}{\text{m}}$$

$$I_0 = \text{Lichtintensität des einfallenden Lichtes} / \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$$

$$s = \text{absorbierte Energiedichte} / \frac{\text{W}}{\text{m}^3}$$

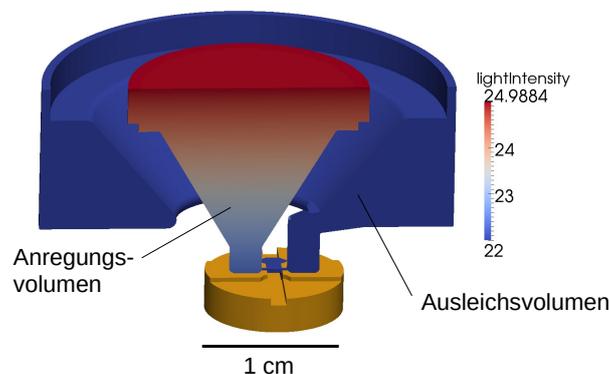
$$\Delta x = \text{durchstrahlte Länge} / \text{m}$$

Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  ist stark abhängig von der Gasart und stellt daher die Messgröße dar. Zum Test des Lösungsverfahrens wird eine photoakustische Zelle der Fa. Emerson Process verwendet [36]. Abbildung 4.21 zeigt den schematischen Aufbau einer photoakustischen Zelle.



**Abbildung 4.21:** Schema einer photoakustischen Zelle, wie sie in diesem Abschnitt modelliert wird. Im Anregungsvolumen wird mittels modulierter Infrarotstrahlung das Gas zu Schwingungen angeregt. Das sorgt für eine oszillierende Strömung im Kanal zwischen Anregungs- und Ausgleichsvolumen, die mit dem Strömungssensor gemessen wird. Die Abmessungen der Zelle liegen in der Größenordnung von 5 cm.

Für das Gasvolumen dieser Zelle wird mit snappyHexMesh ein hexdominantes Rechengitter erzeugt. Anschließend werden zunächst die absorbierte Leistungsdichte berechnet. Abbildung 4.22 zeigt die Lichtintensität, die nach dem Lambert-Beer Gesetz immer weiter abnimmt, je mehr Gas durchstrahlt wird.



**Abbildung 4.22:** Lichtintensität nach dem Lambert-Beer'schen Gesetz im kegelförmigen Anregungsvolumen (reales CAD-Modell der Zelle) berechnet. Die ursprüngliche Lichtintensität  $I_0$  beträgt  $25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  wurde mit  $\alpha = 10 \frac{1}{\text{m}}$  eingestellt. Das Ausgleichsvolumen ist ringförmig um das Anregungsvolumen angeordnet. Der Strömungskanal mit dem Sensor befindet sich um unteren Sockel.

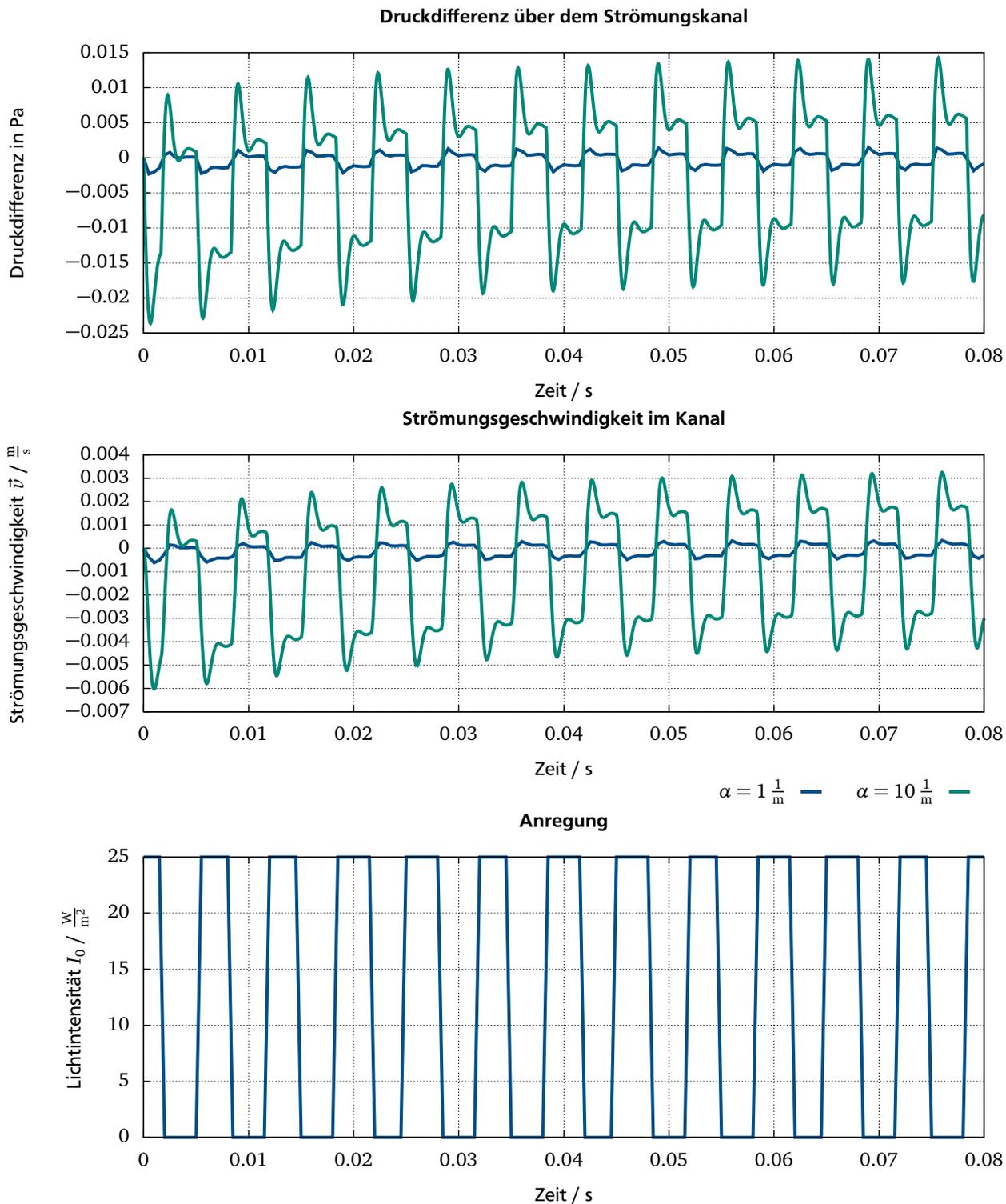
Ein Maß für die erzeugte Strömung ist die Druckdifferenz, die sich über dem Kanal einstellt, wenn die Lichtintensität und damit die absorbierte Energie in der Zelle verändert wird. Abbildung 4.23 zeigt die Druckdifferenz für verschiedene Absorptionskoeffizienten bei einer Anregung mit einer Intensität von  $I_0 = 25 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  mit einer Frequenz von 150 Hz. Für das vorliegende System ergeben sich Geschwindigkeiten im Bereich von einigen  $100 \frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$  für einen Absorptionskoeffizienten von  $1 \frac{1}{\text{m}}$ , bis zu einigen  $\frac{\text{mm}}{\text{s}}$  für einen

---

Absorptionskoeffizienten von  $10 \frac{1}{m}$ . Weiterhin ist zu erkennen, dass das System bis zu 0,1 s benötigt, bis es eingeschwungen ist. Dann schwingt sowohl die Druckdifferenz als auch die Geschwindigkeit um den Wert 0. Das liegt daran, dass das ganze System eine Erwärmung erfährt und diese erst nach ca. 0,1 s den stationären Endwert erreicht. Weiterhin ist an dem Schwingungsverhalten zu erkennen, dass die Zelle nicht bei ihrer Eigenfrequenz betrieben wird.

Die mit dieser Simulation ermittelten Werte für die resultierende Strömung können zur Auslegung eines Strömungssensors genutzt werden, der besonders in diesem Strömungsbereich sensitiv ist.

Diese Werte konnten während dieser Arbeit nicht mit einem realen photoakustischen System verglichen werden, so dass das Verfahren zur Modellierung des photoakustischen Effektes nicht validiert werden konnte.



**Abbildung 4.23:** Druckdifferenz und Strömungsgeschwindigkeit, die sich aus der photoakustischen Anregung ergeben, für verschiedene Absorptionskoeffizienten. Dargestellt ist die Druckdifferenz über dem Kanal, sowie die sich einstellende Strömungsgeschwindigkeit im Kanal. Im unteren Graph ist die Anregung dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das System bis zu 0,1 s benötigt, bis es eingeschwungen ist.

---

## 4.5 Fazit zu den Modellierungsmethoden

---

Durch das einfache Drahtmodell ist man in der Lage, grundsätzliche Aussagen über das thermische Verhalten von dünnen Drähten zu treffen. So können Tendenzen, wie sich die Drahtlängen und -durchmesser auf das Verhalten auswirken, erkannt und Konsequenzen gezogen werden. Für Drähte aus dem Ionensputzverfahren, mit einer maximalen Länge von  $100\ \mu\text{m}$ , ist mit einer sehr geringen Zeitkonstante aber auch mit einer sehr geringen Sensitivität zu rechnen. Verlängert man die Drähte durch ein alternatives Fertigungsverfahren, so erhöht sich die Sensitivität aber auch die Zeitkonstante. Ein Designziel ist es, einen Trade-Off zwischen beiden Größen zu finden. Zudem kann durch Verringerung des Durchmessers entweder die Sensitivität bei kurzen Drähten erhöht oder die Zeitkonstante bei langen Drähten verringert werden. Die technologischen Grenzen sind daher auszuloten.

Die numerischen Verfahren zur Modellierung der Sensoren stehen zur Verfügung und werden genutzt um die Sensoren auszulegen. Die Auslegung der Sensoren, mit den in diesem Kapitel beschriebenen Methoden unter Berücksichtigung der technologischen Randbedingungen, wird in Kapitel 6 dargestellt. Für die Platzierung von Heiz- und Messelementen genügt ein einfacher 2-Regionen-Solver, wie er in Abschnitt 4.3.4 dargestellt ist. Für die Berücksichtigung der Nanostrukturen sollten die Slip-Randbedingungen mit berücksichtigt werden, was eine Erweiterung der Solver darstellt. Die Richtigkeit der Implementierung dieser Randbedingungen wurde anhand eines gut zugänglichen Systems, einem Vakuum-Pirani-Sensor, überprüft. Die Ergebnisse zeigen ausgezeichnete Übereinstimmung mit den Messergebnissen. Diese Algorithmen werden genutzt, um einen vollständigen Sensor, mit Nanostrukturen zu simulieren.

Zum Schluss wurde noch eine Methode vorgestellt, mit der photoakustische Systeme modelliert und ausgelegt werden können. Die Modellierungsmethode wurde jedoch nicht an einem realen System validiert.

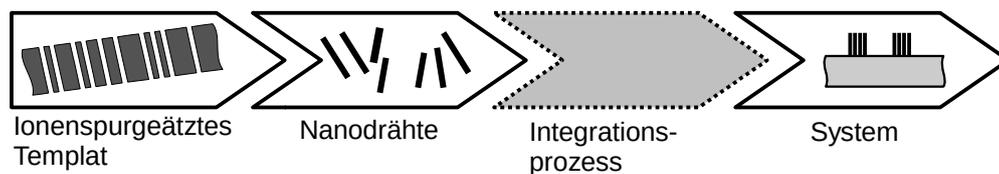


---

## 5 Vor-Ort-Synthese von Mikro- und Nanodrähten

---

In Abschnitt 1.3 wurde das Ionenspurätzverfahren vorgestellt. Dieses Verfahren stellt die Grundlage zur Herstellung der in dieser Arbeit verwendeten Nanodrähte dar. Grundsätzlich ist dieses Verfahren nicht mit den klassischen Verfahren der Mikrosystemtechnik kompatibel. Daher wird ein Verfahren entwickelt, mit welchem es möglich ist, die mittels des Ionenspurätzverfahrens hergestellten Drähte in ein Mikrosystem zu integrieren. Das Gebiet, welches die Integration nanoskaliger Objekte in Mikrosysteme untersucht, bezeichnet man als *Mikro-Nano-Integration*.



**Abbildung 5.1:** Der zu entwickelnde Integrationsprozess stellt das Bindeglied zwischen der Herstellung der Nanodrähte, die weitgehend etabliert ist, und deren Verwendung im Mikrosystem dar.

Ohne einen geeigneten Integrationsprozess werden Nanodrähte, die mittels Ionenspurätzverfahren hergestellt wurden, keine Anwendung in der Mikrosystemtechnik finden. Damit das Integrationsverfahren konkurrenzfähig zu etablierten Fertigungsverfahren der Mikrosystemtechnik wird, muss es zudem die Möglichkeit der Batchfertigung bieten. Durch die parallele Anordnung der Nanodrähte in der Templatfolie ist eine Fertigung im Nutzen nur möglich, wenn die Drähte im Mikrosystem senkrecht zum Substrat angeordnet sind. Das ist bei der Auslegung der Mikrosysteme zu berücksichtigen. Beim Ionenspurätzverfahren handelt es sich um ein sog. *Bottom-Up*-Verfahren [65]. Das bedeutet, dass Nanoobjekte durch Selbstorganisation oder -montage erzeugt werden. Im Gegensatz zu *Top-Down*-Ansätzen, bei welchen die konsequente Miniaturisierung etablierter Technologien verfolgt wird, ist der apparative Aufwand deutlich geringer. Damit ist das Verfahren auch für kleinere und mittlere Unternehmen wirtschaftlich durchführbar.

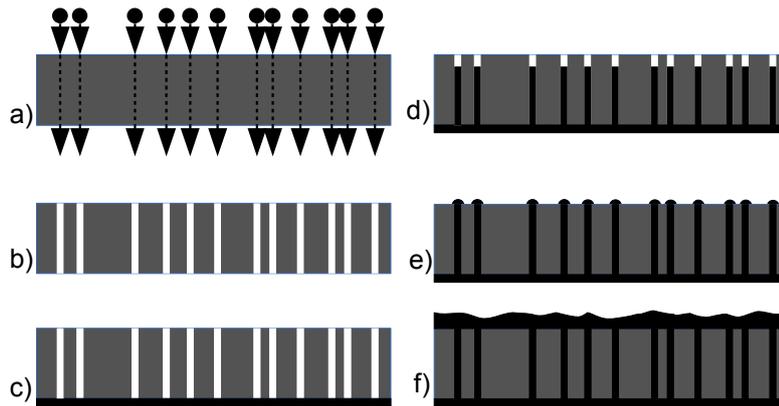
---

### 5.1 Das Ionenspurätzverfahren

---

Das Ionenspurätzverfahren basiert auf der elektrochemischen Abscheidung von Metall in Templaten. Diese Template werden durch Bestrahlung von Kunststoffolie mit beschleunigten Schwerionen und anschließendem chemischen Ätzen der Ionenspuren hergestellt [66]. Durch das Aufätzen mit einem stark alkalischen Ätzmittel entstehen zylinderförmige Poren, deren Durchmesser sich durch die Dauer des Ätzprozesses einstellen lässt. Der Durchmesser kann zwischen einigen 10 nm bis hin zu einigen  $\mu\text{m}$  variiert werden. Die Templatdicke, die die maximale Drahtlänge vorgibt, beträgt maximal  $100\ \mu\text{m}$ . Kommerzielle Template sind bis zu einer Dicke von  $30\ \mu\text{m}$  erhältlich (vgl. Tabelle 5.6). Den grundsätzlichen Ablauf des Ionenspurätzverfahrens zeigt Abbildung 5.2.

In den so erzeugten Templaten lassen sich dann durch galvanische Metallabscheidung Nanodrähte erzeugen. Je nach Prozessdauer können die Drähte pilzförmige Überwachsungen oder geschlossene Deckschichten aufweisen (Abbildung 5.2 d), e) und f)).



**Abbildung 5.2:** Schema des Ionenspurätzverfahrens; a) Bestrahlen einer Polymerfolie (meist Polycarbonat) mit beschleunigten Ionen; b) Aufätzen der durch die Ionen verursachten Spuren; c) Aufsputtern einer Metallschicht auf die Rückseite des Templates; d) galvanisches Abscheiden von Metall in den Poren zur Drahterzeugung. Je nach Prozessdauer des Abscheidungsprozesses entstehen nur Drähte (d) , Drähte mit pilzförmigen Überwachungen (e) oder Drähte mit einer geschlossenen Deckschicht (e)).

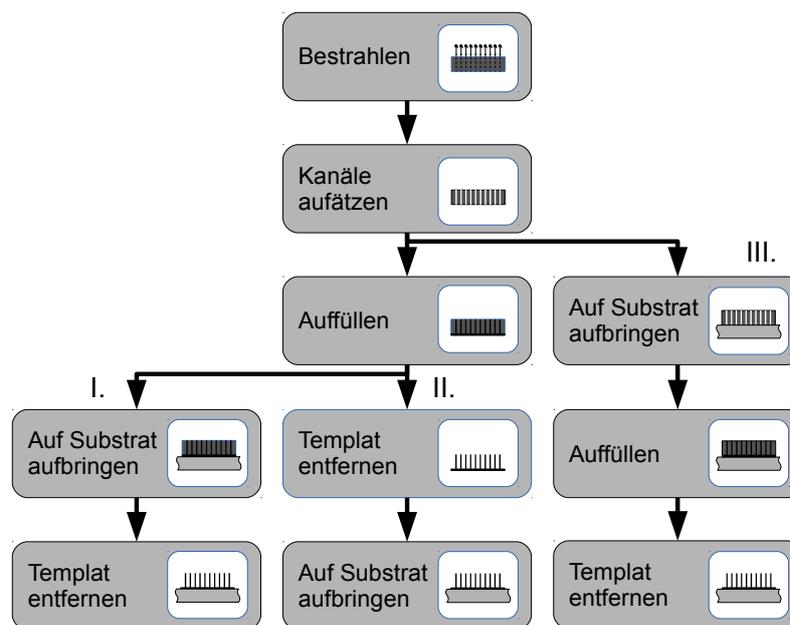
## 5.2 Anforderungen an den Integrationsprozess

Die Entwicklung eines Prozesses zur Integration metallischer Nanodrähte in Mikrosysteme stellt eine zentrale Aufgabenstellung der Arbeit dar. Damit Nanodrähte, die mittels des oben beschriebenen Ionenspurätzverfahrens hergestellt werden sollen, erfolgreich in Mikrosystemen eingesetzt werden können, muss der Integrationsprozess verschiedene Anforderungen erfüllen. Nachfolgend sind die wichtigsten Anforderungen an den Integrationsprozess dargestellt.

- *Verwendung von Templaten aus Kunststoff (Polycarbonat)* Die Template, die verwendet werden sollen, sind ionenspurgeätzte Polycarbonatfolien mit unterschiedlichen Dicken, Porendichten und -durchmessern. Diese Anforderung ergibt sich aus der Zusammenarbeit mit dem GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in vorangegangenen Forschungsprojekten. Zudem sind solche Template kommerziell verfügbar, womit sichergestellt wird, dass der Prozess auch wirtschaftlich angewendet werden kann.
- *Verzicht von Montageprozessen* Optimalerweise wird ein Prozess entwickelt, der die Integration der Nanodrähte ermöglicht, ohne dass Montageschritte nötig sind.
- *Möglichkeit zur Batchfertigung* Der Prozess wird auf Waferebene entwickelt. Um die Wirtschaftlichkeit zu erhöhen werden Mikrosysteme üblicherweise im Nutzen gefertigt. Das wird auch für Mikrosysteme mit Nanodrähten angestrebt. Nur so ist eine spätere wirtschaftliche Verwendung des Prozesses gegeben.
- *Verschiedene Metalle integrierbar* Alle Schritte sind so auszulegen, dass eine hohe Materialvielfalt gewährleistet ist. Nur dann können nach erfolgreicher Projektentwicklung auch andere Anwendungen adressiert werden.
- *zuverlässige elektrische Kontaktierung - Reihenschaltung mehrerer Nanodrahtarrays* Die Nanodrähte sollen als resistive Temperaturelemente dienen. Das kann nur funktionieren, wenn die Drähte beidseitig zuverlässig elektrisch kontaktiert sind.

## 5.3 Ausgangssituation der Integrationsverfahren

Die Ausgangssituation für die betrachteten Integrationsprozesse stellen mit Ionen bestrahlte und bereits aufgeätzte Polymerfolien dar. Ionenspurgeätzte Template aus Polycarbonat sind bereits seit den 1970er Jahren kommerziell verfügbar [67]. Wird der Integrationsprozess auf die Verwendung bereits aufgeätzter Templatefolien ausgelegt, bietet dies den besten Ansatzpunkt um kommerziell verfügbare Folien zu verwenden, welche ganzflächig bestrahlt und aufgeätzt sind. Das heißt das Template ist vollflächig mit Poren versehen. Die Verwendung kommerziell erhältlicher Template hat als direkte Konsequenz, dass keine einzelnen Nanodrähte integriert werden können. Die Drähte können immer nur in Bündeln, nachfolgend *Arrays* genannt, integriert werden.



**Abbildung 5.3:** Klassifikation der Strategien zur Integration metallischer Nanodrähte die mit dem Ionenspurätzverfahren hergestellt werden.

Grundsätzlich lassen sich die Integrationsprozesse in drei unterschiedliche Integrationsprinzipien unterteilen (Zweige I., II. und III. in Abbildung 5.3). Die Zweige I. und II. bilden Integrationsmethoden, die einen Fügenschritt der bereits erzeugten Drähte benötigen. Der Zweig III. stellt die Möglichkeit der Vor-Ort-Synthese dar. In diesem Fall müssen die Nanodrähte nicht gefügt, sondern erst auf dem Substrat erzeugt werden. Elektroden bzw. Leiterbahnen auf dem Substrat dienen dabei als Startschicht.

### I. Zweig - Fügen der aufgefüllten Folie

Im ersten Zweig werden die Folien, wie etabliert, mit einer Metallstartschicht versehen und die Kanäle durch galvanische Abscheidung aufgefüllt. Danach wird die Folie auf ein Substrat aufgebracht bzw. in das Mikrosystem integriert und die Folie anschließend entfernt. Dafür ist ein Verfahren nötig, mit dem die Nanodrahtarrays sowohl mechanisch auf dem Substrat befestigt, als auch elektrisch kontaktiert werden. Das Fügeverfahren darf dabei keine Temperatur benötigen, die oberhalb der Schmelz- bzw. Zersetzungstemperatur des Polymertemplates liegt. Gleichzeitig muss die Verbindung jedoch stabil genug sein, um die anschließende Entfernung des Templates zu überstehen. Beim Fügen auf das Substrat ist die genaue Ausrichtung der Folie zum Substrat zu gewährleisten, damit die in der Templatefolie erzeugten Arrays an den festgelegten Stellen platziert werden. Untersuchungen innerhalb des BMBF-geförderten Projek-

---

tes 3-DOING (3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasflusssensorik, FKZ 16SV5476) haben ergeben, dass dieser Weg wenig erfolgversprechend ist [36].

## II. Zweig - Fügen der Nanodrahtarrays

Der zweite Zweig stellt die Montage der bereits freigestellten Nanodrahtarrays dar. Hierbei muss wieder ein Fügeverfahren genutzt werden, welches sowohl die mechanische Fixierung als auch die elektrische Kontaktierung sicher stellt. Auf Grund der geringen Größe der Arrays kann dieser Zweig als Mikro-montage angesehen werden. Batchfertigung ist mit diesem Prozess nicht möglich. Zudem können die Nanodrahtarrays beim Handling-Prozess leicht beschädigt werden. Daher wird dieser Weg nicht weiter verfolgt.

## III. Zweig - Vor-Ort-Synthese der Nanodrahtarrays

Bei diesem Prozess wird die aufgeätzte Folie direkt auf das Substrat aufgebracht und die Drähte galvanisch erzeugt. Die metallisierte Oberfläche des Substrates dient dabei als Startschicht. Die Formgebung der Arrays kann dabei durch die Formgebung der Startelektroden erfolgen und erfordert keine Vorstrukturierung der Templatfolie. Deshalb eignet sich dieses Verfahren besonders gut um kommerzielle Folien zu verarbeiten und trotzdem beliebig geformte Nanodrahtarrays herzustellen.

Prinzipiell erfüllt nur der III. Zweig in Abbildung 5.3 die in Abschnitt 5.2 dargestellten Anforderungen an den Integrationsprozess. Daher wird im Folgenden nur die direkte Synthese der Nanodrähte im Mikrosystem verfolgt.

---

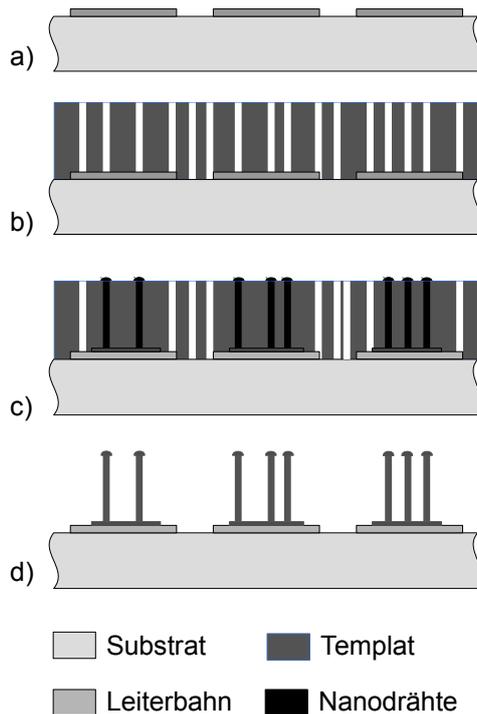
### 5.4 Prozessablauf zur Vor-Ort-Erzeugung der Nanodrahtarrays

---

Die Vor-Ort-Synthese der Nanodrähte wird Montageschritte, Fügeschritte und Kontaktierungsprozesse einsparen. Ziel ist es, dass kommerzielle, ganzflächig bestrahlte Template verwendet werden können, um Nanodrähte im Mikrosystem zu erzeugen. Daher kann der in [44] beschriebene Weg nicht verfolgt werden: Auf ein vorstrukturiertes Substrat wird flüssiges Polyimid aufgeschleudert. Dieses wird anschließend bei hoher Temperatur ausgehärtet. Die Polyimidschicht wird mit Schwerionen bestrahlt und die Poren geätzt. Die Poren werden galvanisch gefüllt und letztlich wird das Polymer entfernt um die Drähte frei zu stellen. Dazu muss jedoch jede Probe in den Ionenbeschleuniger eingebracht werden, was den Prozess sehr teuer und damit unwirtschaftlich macht.

Um einen Prozess zu entwickeln, der auch die Verwendung kommerziell erhältlicher Template ermöglicht, wird das in Abbildung 5.4 dargestellte Konzept betrachtet. Der große Vorteil dabei ist, dass kommerziell erhältliche Template mittels eines Rollenverfahrens meterweise bestrahlt werden können, und damit vergleichsweise preiswert sind. Der zentrale Prozessschritt ist das Aufbringen des ionenspurgeätzten Templates auf das Substrat (Prozessschritt b)). Weiterhin ergeben sich folgende Teilprozesse, die innerhalb der Entwicklung bearbeitet werden müssen (siehe Abbildung 5.4).

1. Strukturieren der Leiterbahnen und Startelektroden
2. Aufbringen der Folie auf das Substrat
3. Synthese der Nanodrähte durch Auffüllen der Poren
4. Entfernen der Templatfolie
5. Vereinzeln der Sensoren



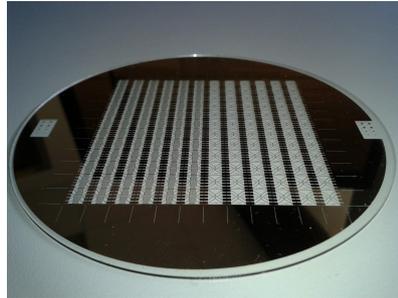
**Abbildung 5.4:** Prinzip der Vor-Ort-Erzeugung der Nanodrähte; a) Strukturieren des Substrates, b) Integrieren der Templatfolie, c) galvanisches Erzeugen der Drähte durch Auffüllen der Poren, d) Entfernen des Templates

#### 5.4.1 Herstellung der Startelektroden und Leiterbahnen

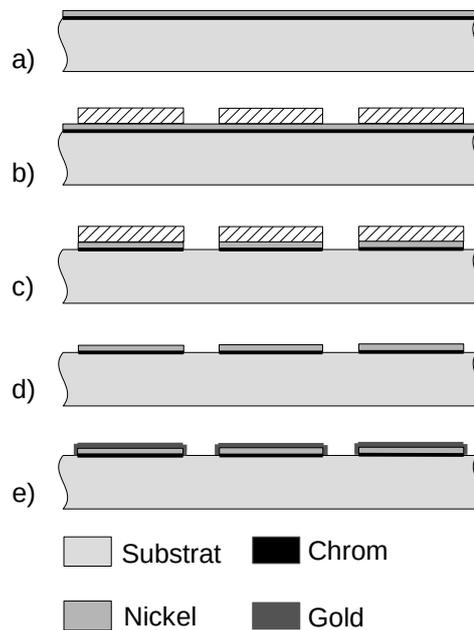
Im ersten Schritt müssen die Leiterbahnen auf das Substrat und gleichzeitig die Startelektroden für die galvanische Abscheidung der Nanodrähte erzeugt werden. Um die Bildung einer Oxidschicht zu vermeiden wird Gold als Leiterbahnmaterial verwendet. Gold ist eine zuverlässige Galvanostartschicht und erleichtert zudem das Bonden, um das fertige Sensorelement später elektrisch zu kontaktieren. Um den Galvanikprozess zu etablieren und dabei einen möglichst preiswerten Prozess zur Herstellung der Leiterbahnen zu verwenden wurde Gold nicht direkt auf den Wafer aufgedampft, sondern ein Schichtverbund aus Chrom als Haftvermittler und Nickel. Das Nickel kann entweder mittels Lift-Off oder durch nasschemisches Ätzen strukturiert werden. Nach der Strukturierung werden die Leiterbahnen, Startelektroden und Kontaktpads mittels eines Immersionsgold Tauchbades vergoldet. Im gleichen Schritt kann auch das Heizelement mit strukturiert werden, sofern das System einen Dünnschichtheizer aufweisen soll. Abbildung 5.5 zeigt ein strukturiertes 4" Glassubstrat mit Leiterbahnen aus vergoldetem Nickel.

##### 5.4.1.1 Strukturierung durch Ätzen eines Chrom-Nickel-Schichtverbundes

Eine Möglichkeit die Metallstrukturen herzustellen ist zunächst die Strukturierung einer nicht edlen Metallschicht mit anschließender Vergoldung der Strukturen (Abbildung 5.6). Zur Herstellung der Leiterstrukturen auf dem Substrat wird dieses zunächst mit 20 nm Chrom als Haftvermittler und 150 nm Nickel bedampft. Als Substrat wird in dieser Arbeit ein 4" Borosilikatwafer (Borofloat, Schott AG) verwendet. Anschließend wird das Schichtsystem mit Hilfe eines photolithographischen Prozesses strukturiert. Zum Schluss wird Gold additiv in einem Tauchbad aufgebracht. Da Nickel eine höhere Elektronennegativität aufweist als Gold scheidet sich das Edelmetall auf den Nickelstrukturen ab. Den genauen Prozessablauf



**Abbildung 5.5:** Strukturierter Glaswafer. Im ersten Prozessschritt werden alle Metallstrukturen auf dem Wafer hergestellt. Dazu zählen neben den Zuleitungen und Startelektroden auch die Heizelemente für die kalorimetrischen Sensorelemente.



**Abbildung 5.6:** Prozessschritte zur Herstellung der strukturierten Startschicht. a) Aufdampfen von 20 nm Chrom und 150 nm Nickel, b) Aufbringen und Strukturieren von ma-P 1215 Positiv-Resist, c) Übertragen der Struktur durch Schichtätzung d) Entfernen des Photoresistes, e) Vergolden mit Immersionsgold

sowie die angewendeten Prozessparameter zeigt Tabelle 5.1. Die Vorteile dieses Verfahrens liegen auf der Hand: Das Beschichten von Glaswafern mit Nickel ist deutlich preisgünstiger als das Aufdampfen von Gold, da sich beim Aufdampfen auch Metall in den nicht genutzten Bereichen der Aufdampfkammer niederschlägt. Beim nachträglichen nasschemischen Vergolden ist der Verbrauch des Edelmetalls deutlich niedriger.

**Tabelle 5.1:** Prozessablauf und -parameter zur Strukturierung von Nickelstrukturen auf einem Wafer mit anschließender Vergoldung.

Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Aufdampfen der Metallschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 nm Chrom, 150 nm Nickel auf 0,7 mm dicken 4" Borofloatwafer aufdampfen</li> </ul>
Photolithographie mit Photoresist ma-P 1215	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 30 s bei 1500 <math>\frac{U}{min}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, 2 min bei 100°C</li> <li>• Belichten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: 55 <math>\frac{mJ}{cm^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler ma-D 331 (micro resist technology GmbH, Berlin)</li> <li>• Reinigen: O<sub>2</sub>-Plasma im Parallelplattenreaktor oder RIE</li> </ul>
Strukturieren der Metallschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ätzen der Nickelschicht: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub> : HNO<sub>3</sub> : CH<sub>3</sub>COOH : H<sub>2</sub>O 3:3:1:1<sup>1</sup> Dabei muss das Substrat ca. alle 15 s dem Luftsauerstoff ausgesetzt werden. Ätzrate ca. 60 <math>\frac{nm}{min}</math></li> <li>• Ätzen der Chromschicht: Chrome-Etch No. 1<sup>2</sup>; Cerammoniumnitrat, Perchlorsäure und Wasser 10,9% : 4,25% : 84,85% , Ätzrate ca. 60 <math>\frac{nm}{min}</math></li> </ul>
Entfernen des Photoresistes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strippen mit Aceton und anschließendes Spülen mit Isopropanol</li> </ul>
Vergolden des Schichtsystems	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivieren: 10 % Salzsäure (HCl) für 30 s bei Raumtemperatur</li> <li>• Vergolden: im Tauchbad, Enthone Immersionsgold II <sup>3</sup>, 10-12 min bei 65-75 °C</li> </ul>

<sup>1</sup> Hierbei liegen die industriell verfügbaren Konzentrationen zu Grunde: H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>: 85 %, HNO<sub>3</sub>: 65 %, CH<sub>3</sub>COOH: 100 %

<sup>2</sup> Handelsname, MicroChemicals GmbH

<sup>3</sup> Kalium-Gold-Cyanid-Komplex

Das Ergebnis ist ein Wafer, auf den Goldleiterbahnen strukturiert sind. Im Fall des Gasflusssensors handelt es sich hierbei um die Zuleitungen, die Kontaktpads und um das Heizelement, welches zwischen den Messelementen platziert ist. Der Einsatz von Immersionsgold sorgt dafür, dass die Goldstrukturen vergleichsweise preiswert hergestellt werden können. Zudem ist der Prozess erprobt und sehr zuverlässig durchführbar. Die Kontaktpads der Strukturen erweisen sich als stabil genug um neben dem Bonden auch durch Löten elektrisch kontaktiert werden zu können, was die Aufbau- und Verbindungstechnik der so hergestellten Sensorelemente robuster gestaltet. Da das Gold nicht oxidiert, kann die Kontaktierung auch durch Klemmkontakte hergestellt werden.

### 5.4.1.2 Direktes Aufdampfen und Strukturieren einer Goldschicht

Statt der nachträglichen Vergoldung eines Chrom-Nickel-Schichtverbundes ist es auch möglich, direkt einen Schichtverbund aus Chrom und Gold aufzudampfen. Die Strukturierung kann hierbei sowohl mittels Lift-Off-Verfahren als auch durch nachträgliches Ätzen der Schicht durchgeführt werden.

#### Lift-Off Verfahren

Ein gut geeignetes Verfahren zur Erzeugung sehr feiner Strukturen aus dünnen Metallschichten auf glatten Wafern ist das Lift-Off-Verfahren [68]. Hierbei wird zumeist auf einen Negativ-Resist zurückgegriffen, damit der gleiche Maskensatz für die Belichtung wie beim Strukturieren durch Ätzen verwendet werden kann. Zudem sollte das Resistprofil unterschnittene (negative) Flanken besitzen. Zur Beschichtung wird ein möglichst gerichtetes Verfahren verwendet (z.B. Aufdampfen) das die Lackkanten nicht beschichtet [69]. Damit vermeidet man unsaubere Abrisskanten beim *Liften*. Durch Strippen des Resistes werden die nicht benötigten Bereiche der Goldbeschichtung entfernt. Üblicherweise wird Ultraschall angewendet, um das Ablösen des Photoresistes von der Metallschicht zu beschleunigen. Das Lift-Off Verfahren wird in dieser Arbeit auf Grund der hohen Kosten für die PVD-Goldbeschichtung nur vereinzelt angewendet. In Tabelle 5.2 sind die Prozessparameter für diesen Prozess dargestellt.

**Tabelle 5.2:** Prozessablauf und -parameter zur Strukturierung von Goldstrukturen auf einem Wafer mittels LiftOff.

Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Photolithographie mit Photoresist AZ 2070 nLOF	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 60 s bei 3000 <math>\frac{\text{U}}{\text{min}}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, 7min bei 100°C</li> <li>• Belichten:               <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: 450 <math>\frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: i-Linie</li> </ul> </li> <li>• Postbake: auf einer Hotplate, 4 min bei 110°C</li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 826 MIF (MicroChemicals GmbH)</li> <li>• Spülen in DI-Wasser</li> <li>• Reinigen: O<sub>2</sub>-Plasma im Parallelplattenreaktor oder RIE</li> </ul>
Aufdampfen der Metallschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 20 nm Chrom, 150 nm Nickel auf 0,7 mm dicken 4" Borofloatwafer aufdampfen</li> </ul>
Entfernen des Photoresistes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 3-6 min Strippen mit mr-dev 600 (micro resist technology GmbH)</li> <li>• Spülen mit Aceton und Isopropanol</li> </ul>

#### Ätzen einer Chrom-Gold-Schicht

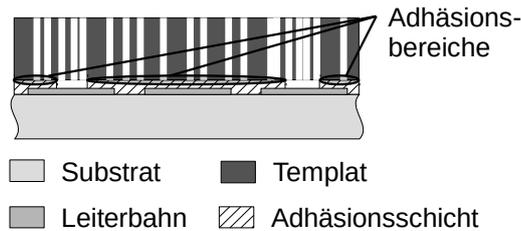
Eine weitere Möglichkeit zur Erzeugung von Gold-Leiterbahnen und -strukturen auf dem Substrat ist das direkte Aufdampfen und Strukturieren einer Chrom-Gold-Schicht. Der Prozess entspricht in allen Punkten der Strukturierung von Chrom-Nickel-Schichten, lediglich das Ätzmedium muss angepasst werden. Zum Ätzen dünner Goldschichten kommt üblicherweise Iod-Kaliumiodid zum Einsatz.

---

## 5.4.2 Aufbringen der Folie auf das Substrat

---

Damit die Nanodrähte direkt auf dem Substrat erzeugt werden können, muss die Templatfolie auf das Substrat aufgebracht werden. Dies stellt den grundsätzlich neu zu entwickelnden Prozessschritt dar. Insbesondere die zuverlässige Haftung der Templatfolie auf dem Substrat während des Prozesses ist eine zentrale Anforderung. Als Adhäsionsschicht kommen dünne polymere Filme zum Einsatz. Sie haben neben der Bereitstellung von Adhäsionskräften noch den Zweck, dass Bereiche, die nicht mit Nanodrähten versehen werden sollen, maskiert werden können. Das grundsätzliche Konzept zeigt Abbildung 5.7.



**Abbildung 5.7:** Konzept der Verwendung einer zusätzlichen Adhäsionsschicht. Bei der Schicht handelt es sich um ein Polymer welches zwei Aufgaben übernimmt. Zum einen sorgt es für die Haftung der Templatfolie auf dem Substrat, zum anderen isoliert es die Bereiche, auf denen keine Nanodrähte erzeugt werden sollen.

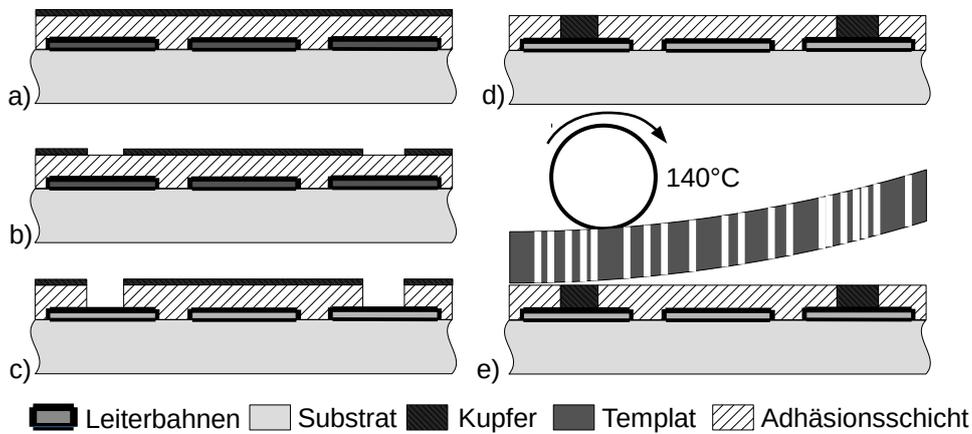
---

### 5.4.2.1 Thermische Lamination mit Schmelzklebefolie

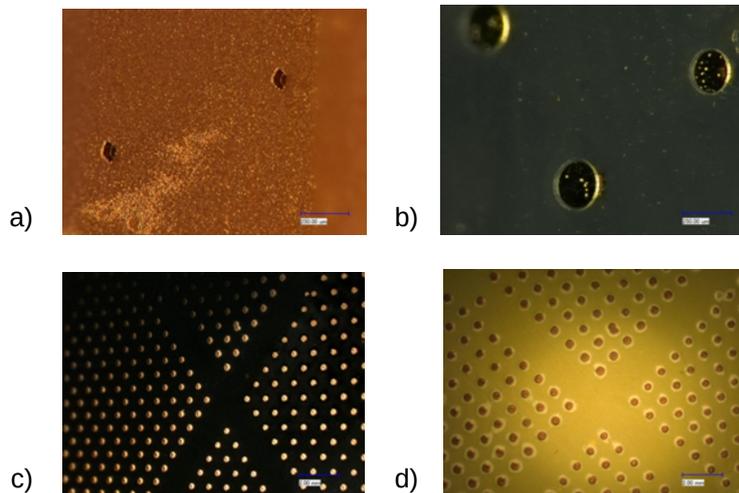
---

Ähnlich wie bei der Lamination im Bürobereich kommen zunächst thermoplastische Adhäsionsfilme zum Einsatz. Der thermoplastische Film wird auf das vorbereitete Substrat aufgebracht und strukturiert. Das ionenspurgeätzte Templat wird dann durch Druck- und Temperatureintrag auflaminiert. Der Adhäsionsfilm wird dabei auf über Glastemperatur erwärmt. Zunächst wird die Folie Epurex Platilon H5 (Bayer) verwendet. Hierbei handelt es sich um eine Schmelzklebefolie mit einer empfohlenen Klebetemperatur von 150°C (Datenblatt siehe Anhang). Die Dicke der Adhäsionsschicht ist dabei durch die Standardfoliendicke von 20-25 µm festgelegt. Die Folie wird möglichst blasenfrei (mit Flüssigkeitsunterstützung) auf dem vorstrukturierten Substrat aufgebracht und auf einer Hotplate bei 150°C aufgeschmolzen. Danach wird das Material im Sauerstoffplasma strukturiert. Hierfür wird auf die Folie eine Metallschicht aufgebracht und strukturiert. Mittels Sauerstoffplasma wird die Struktur dann in die Adhäsionsschicht übertragen. In dieser Arbeit wurde eine Kupferschicht aufgesputtert (Dicke 100 nm), strukturiert und galvanisch verstärkt (Dicke 1 µm). Dieser Vorgang ist notwendig, da für eine zuverlässige Maskierung eine Mindestdicke eingehalten werden muss, die auf Grund des thermischen Eintrags nicht durch Sputtern allein erreicht werden kann. Die Plasmastrukturierung des Adhäsionsfilms wird in einem Parallelplattenreaktor bei einer Leistung von 200 W und reiner Sauerstoffatmosphäre durchgeführt. Die Ätzdauer beträgt ca. 60 min. Prinzipbedingt werden die Löcher isotrop geätzt. Das lässt sich verbessern, wenn ein Plasmareaktor in RIE Anordnung verwendet wird, da die entstehende Bias-Spannung die Sauerstoffionen zum Substrat hin beschleunigt, und damit für einen anisotropen Abtrag sorgt [70]. Zum Zeitpunkt der Durchführung der Arbeiten stand ein solches Gerät jedoch nicht zur Verfügung.

Anschließend wird die Lamination der Templatfolie durchgeführt. Hierbei kann ein handelsübliches Rollenlaminierring verwendet werden. Die Temperatur sollte zwischen 135°C und 150°C gewählt werden. Da die Schichtdicke des Laminierringfilms 20-25 µm beträgt, werden die Öffnungen vor der Lamination des Templates bereits galvanisch aufgefüllt um ein gleichmäßiges Höhenwachstum der Drähte zum späteren Zeitpunkt zu gewährleisten.

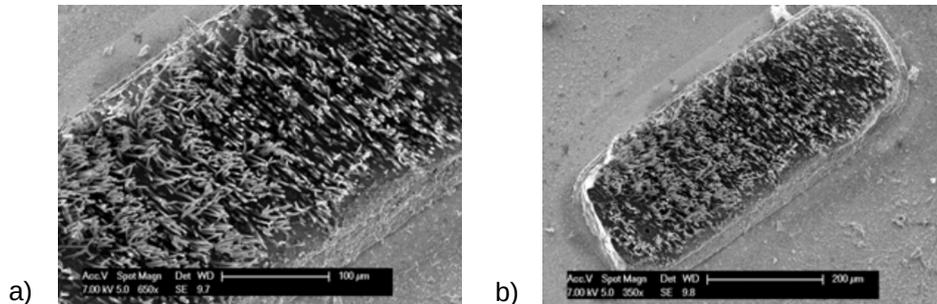


**Abbildung 5.8:** Prozess zur Plasmastrukturierung des Plation H5 Adhäsionsfilms; a) Aufbringen des Adhäsionsfilms auf das vorstrukturierte Substrat und Beschichten mit ca. 1  $\mu\text{m}$  Kupfer b) Strukturieren des Kupferfilms, c) Übertragen der Struktur in die Adhäsionsschicht mit Sauerstoffplasma, galvanisches Auffüllen der Löcher mit Kupfer d) Entfernen der Kupferschicht



**Abbildung 5.9:** Verwendung von Schmelzklebefolie Plation H5 als Adhäsionsschicht; a) Metallmaske zur Plasmastrukturierung des Adhäsionsfilms, b) Öffnungen die in die Adhäsionsschicht mittels Sauerstoffplasma geätzt wurden, c) mit Kupfer gefüllte Löcher in der Adhäsionsschicht d) auflaminierte Templatfolie

Nach dem Auflaminieren der Folie werden die Drähte galvanisch in den Poren erzeugt. Die genauen Galvanik-Prozesse sind in Abschnitt 5.5 dargestellt. Abbildung 5.10 zeigt ein Array aus Kupfer-Mikrodrähten mit einem Drahtdurchmesser von  $2\ \mu\text{m}$  und einer Länge von  $60\ \mu\text{m}$  auf einem Glaswafer. Die genauen Prozessparameter, die zur Durchführung des Prozesses notwendig sind, sind in Tabelle 5.3 dargestellt.



**Abbildung 5.10:** a) und b) Mit dem beschriebenen Prozess auf einem Glaswafer erzeugtes Array aus Mikrodrähten. Verwendet wurde ein Templat der Firma micryon. Die Templatdicke beträgt  $60\ \mu\text{m}$ , der Drahtdurchmesser ca.  $2\ \mu\text{m}$ . Das Drahtmaterial ist Kupfer.

**Tabelle 5.3:** Prozessablauf und -parameter zur Templatintegration mittels Schmelzklebefolie Platilon H5.

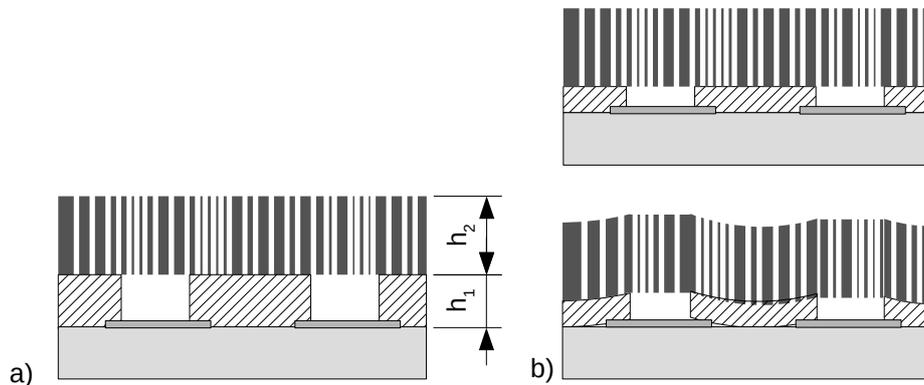
Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Aufbringen der Schmelzklebefolie auf den vorstrukturierten Wafer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufbringen eines Tropfens entionisierten Wassers auf das vorstrukturierte Substrat</li> <li>• Auflegen und Andrücken der Schmelzklebefolie, herausdrücken der dazwischen befindlichen Luftblasen. Die Folie muss blasenfrei auf dem Substrat aufliegen.</li> <li>• Erhitzen des Wafer-Folien-Verbundes auf einer Hotplate auf <math>150^\circ\text{C}</math>. Die Folie wird aufgeschmolzen und klebt auf dem Substrat fest.</li> </ul>
Aufdampfen und Verstärken der Metallschicht zur Plasmastrukturierung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 nm Chrom auf die Schmelzklebefolie aufspalten</li> <li>• galvanisches Verstärken der Kupferschicht auf ca. <math>2\ \mu\text{m}</math> (Abscheidezeit <math>\approx 10\ \text{min}</math>): <ul style="list-style-type: none"> <li>• galvanostatische Anordnung, Gleichstromabscheidung, Stromdichte: <math>J = 10\ \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Gegenelektrode: Kupferblech</li> <li>• Elektrolyt: <math>250\ \frac{\text{g}}{\text{l}}\ \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}</math>, <math>30\ \frac{\text{g}}{\text{l}}\ \text{H}_2\text{SO}_4</math></li> </ul> </li> </ul>

Photolithographie mit AZ 9260	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 8 s bei <math>500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, 50 s bei <math>3500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, Sollsichtdicke <math>\approx 8 \mu\text{m}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, 8 min bei <math>100^\circ\text{C}</math></li> <li>• Rehydration: ca. 30 min</li> <li>• Belichten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>680 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 400 K (verdünnt mit Wasser, 1:3)</li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> </ul>
Strukturieren der Metallschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nassätzen der Schicht mit Natriumpersulfat (<math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math>), Ätzrate <math>1 \mu\text{m} / \text{s}</math></li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> </ul>
Entfernen des Photoresistes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strippen mit AZ 100 Remove</li> <li>• Spülen mit DI-Wasser</li> </ul>
Übertragen der Struktur in die Schmelzklebefolie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Plasmaätzen im Parallelplattenreaktor (Plasma Technology) <ul style="list-style-type: none"> <li>• Ätzgas: Sauerstoff</li> <li>• Druck: 180 mTorr</li> <li>• Leistung: 300 W</li> <li>• Ätzdauer: 60 min</li> </ul> </li> </ul>
Entfernen der Plasmaätzmaske	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nassätzen der Schicht mit Natriumpersulfat (<math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math>), Ätzrate <math>1 \mu\text{m} / \text{s}</math></li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> </ul>
Galvanisches Auffüllen der geätzten Öffnungen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Höhe der abzuscheidenden Strukturen: <math>25 \mu\text{m}</math> (Abscheidezeit <math>\approx 120 \text{ min}</math>)</li> <li>• galvanostatische Anordnung, Gleichstromabscheidung, Stromdichte: <math>J = 10 \frac{\text{mA}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Gegenelektrode: Kupferblech</li> <li>• Elektrolyt: <math>250 \frac{\text{g}}{\text{l}} \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}</math>, <math>30 \frac{\text{g}}{\text{l}} \text{H}_2\text{SO}_4</math></li> </ul>
Auflaminieren der Templatfolie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erwärmen des Wafer/Folienverbundes auf <math>250^\circ\text{C}</math></li> <li>• manuelles Aufdrücken der Templatfolie</li> </ul>

### Probleme bei der Prozessierung

Der Prozess konnte mehrfach erfolgreich durchgeführt werden, jedoch traten einige Probleme auf. Zum einen ist die Dicke der Adhäsionsschicht mit  $20\text{-}25 \mu\text{m}$  vergleichsweise hoch. Dadurch stehen die Drähte nicht direkt auf dem Wafer sondern auf einem dementsprechend hohen Sockel (vgl. Abbildung 5.11 a)). Das muss bei der Auslegung des Mikrosystems berücksichtigt werden. Weit schwerwiegender ist jedoch das Problem der schlechten Haftung der Schmelzklebefolie auf dem Substrat (vgl. Abbildung 5.11 b)). Die schlechte Haftung hat zwei Gründe: Durch die lange Verweilzeit des Verbundes im Elektrolyt kommt es zur Hydrolyse (Aufspalten von Bindungen innerhalb des Laminationsfilms) und Quellen des Laminierfilms, sowie dem damit verbundenen Eindringen von Elektrolyt zwischen Substrat und Laminierfilm.

Das Risiko der Ablösung steigt weiter an, wenn die galvanische Abscheidung der Drähte bei erhöhter Temperatur durchgeführt wird.



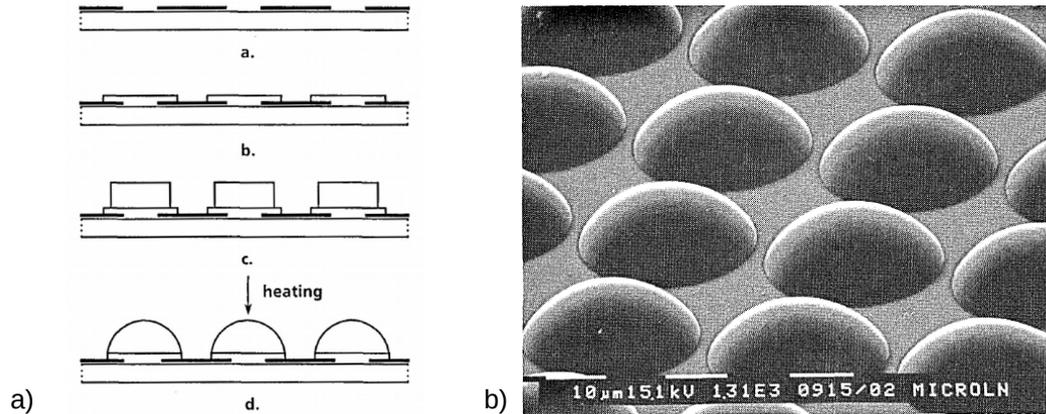
**Abbildung 5.11:** Fehler, die bei der Folienlaminierung mit der Schmelzklebefolie Platilon H5 auftreten. a) Die Dicke der Adhäsionsschicht ist mit 20-25  $\mu\text{m}$  vergleichsweise hoch. Dadurch stehen die Drähte später auf Sockeln in eben dieser Höhe, b) durch Eindringen von Wasser löst sich die Verbindung zwischen Wafer und Folie. Die Wahrscheinlichkeit dafür steigt mit längerer Verweildauer im Galvanikbad bei der Abscheidung der Drähte.

Vor allem die Haftung des Adhäsionsfilms auf dem Substrat sorgt dafür, dass der Prozess nicht zuverlässig durchgeführt werden kann. Zudem ließ sich die Vor-Ort-Erzeugung von Nanodrähten auf einem Substrat nur mit Kupfer als Drahtmaterial durchführen, da die Abscheidung bei Raumtemperatur durchgeführt werden kann. Trotzdem konnte erstmalig gezeigt werden, dass eine Vor-Ort-Erzeugung von Nanodrähten mit ionenspurgeätzten Polycarbonattemplateln durchführbar ist. Der Prozess ist durch die nötige Plasmastrukturierung der Adhäsionsschicht vergleichsweise aufwändig, so dass weitere Materialien für die Adhäsionsschicht gefunden werden müssen. Dabei wird weiterhin auf Polymere zurückgegriffen.

#### 5.4.2.2 Thermische Lamination mit Positiv-Photoresist

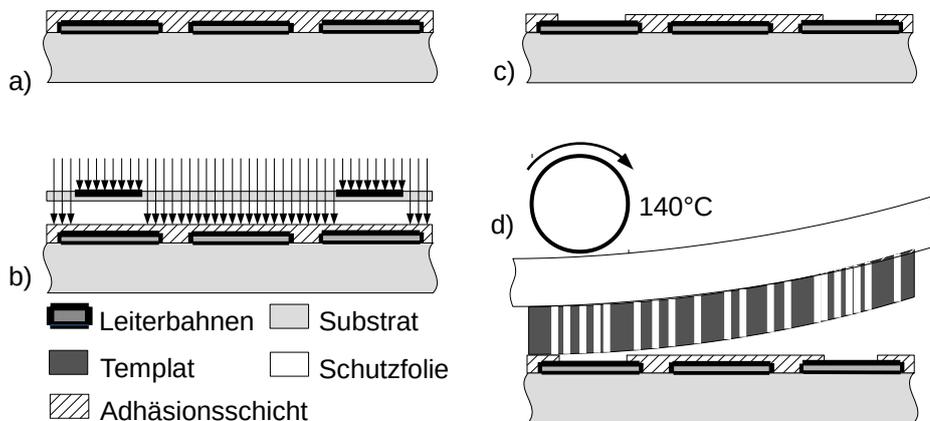
Die beiden im vorherigen Abschnitt dargestellten Probleme geben Anlass, weitere Materialien für den Adhäsionsfilm zu untersuchen. Zwecks einfacher Prozessierung wird zunächst der Fokus auf photostrukturierbare Materialien gelegt. Dabei fallen Photoresiste ins Auge, die mittels eines Reflow-Verfahrens zur Linsenherstellung genutzt werden [71]. Dazu werden flache Zylinder aus Photoresist strukturiert, und anschließend auf 140°C erhitzt. Dadurch zerfließen die Zylinder zu Tropfen, die sich je nach Zylinderhöhe und Oberflächenspannung ausbilden [72]. Photoresiste werden üblicherweise flüssig auf ein Substrat aufgeschleudert. So lassen sich Schichtdicken von weniger als 1  $\mu\text{m}$  realisieren.

Die Fließeigenschaften der Positivresiste legen nahe, dass solche Lacke auch als Adhäsionsschicht verwendbar sind. Für die Untersuchungen wird nach Rücksprache mit der Firma *micro resist technology GmbH* ein Photoresist aus der ma-P Serie (siehe Anhang). Mit diesen Resisten lassen sich Mikrolinsen fertigen. Für den Einsatz der Photoresiste als Adhäsionsschicht wird der ma-P 1215 verwendet, der 1,5  $\mu\text{m}$  dick prozessiert wird. Anschließend werden, wie bei der Strukturierung der Schmelzklebefolie Löcher in die Adhäsionsschicht strukturiert. Dies geschieht, vereinfacht durch die Verwendung des photostrukturierbaren Materials, mittels Photolithographie. Zum Schluss folgt die Lamination der Templatfolie. Dazu wird sie zunächst mit einem Klebefilmstreifen auf dem Wafer vorfixiert. Es ist darauf zu achten, dass die glatte Seite der Folie nach unten zeigt. Um ein Zerschneiden des Wafers während des Laminationsprozesses zu vermeiden, wird der Wafer auf ein Blech (ca. 1,5 mm Dicke, ungefähr DIN A5 Größe) gelegt. Die Walzen des Laminiergerätes werden vor Verschmutzung geschützt, indem eine



**Abbildung 5.12:** a) Prozessschritte zur Produktion von Mikrolinsen a) Abscheidung einer Aluminiumschicht auf ein Glassubstrat b) Herstellung von 30 µm Sockel zur Formgebung der Linzen, c) 25 µm breite und 12 µm hohe Zylinder aus Photoresist, d) Heizen auf 140°C zur Herstellung der Linzen, b) REM-Aufnahme eines Mikrolinsen-Arrays, das mit dem beschriebenen Prozessen hergestellt wird [71]

Schutzfolie auf den gesamten Verbund aufgelegt wird. Den Prozessablauf zeigt Abbildung 5.13. Die zur Durchführung des Prozesses notwendigen Prozessparameter sind in Tabelle 5.4 dargestellt. Den Aufbau zur Lamination der Folie auf das Substrat zeigt Abbildung 5.14.



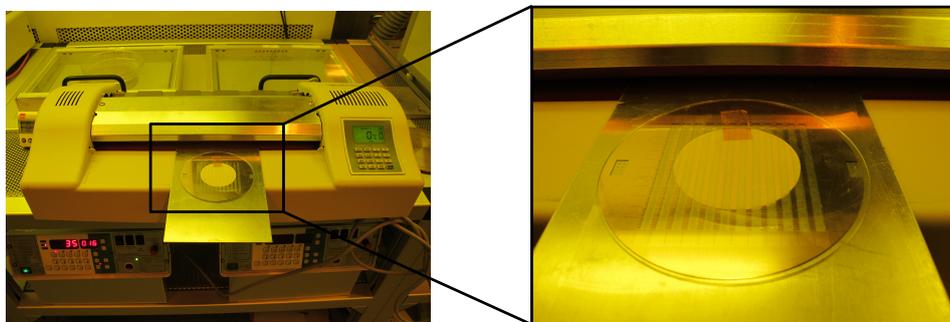
**Abbildung 5.13:** Prozessablauf zur Lamination mit einer thermoplastischen Adhäsionsschicht aus Positiv-Photoresist; a) Vorstrukturiertes Substrat mit 1,5 µm ma-P 1215 beschichten, b) Belichten, c) Entwickeln, d) Auflaminieren der Templatfolie

**Tabelle 5.4:** Prozessablauf und -parameter zur Templatintegration mittels thermischer Lamination auf dem Photoresist ma-P 1215

Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Aufbringen von Haftvermittler auf den Wafer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufschleudern des Haftvermittlers TI-Prime, 30 s bei <math>3000 \frac{U}{min}</math></li> <li>Aktivieren des Haftvermittlers, 1 min bei 120°C auf einer Hotplate</li> </ul>

Photolithographie mit Photoresist ma-P 1215 (der Photoresist fungiert als Adhäsionsschicht)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 30 s bei <math>1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, 2min bei <math>100^{\circ}\text{C}</math></li> <li>• Belichten :             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>55 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler ma-D 331 (micro resist technology GmbH, Berlin)</li> <li>• Gründliches Reinigen mit DI-Wasser und anschließendes Trocknen</li> </ul>
Auflaminieren der Templatfolie	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Auflegen der Templatfolie auf das Substrat (glatte Seite nach unten)</li> <li>• Vorfixieren des Templates mit Klebeband</li> <li>• Laminieren der Folie mittels eines Bürolaminationsgerätes             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laminationsgeschwindigkeit: Stufe 1</li> <li>• Laminationstemperatur: <math>135^{\circ}\text{C}</math></li> </ul> </li> </ul>

Nach der Durchführung des Prozesses ist die Folie fest auf den Wafer laminiert und die galvanische Erzeugung der Nanodrähte kann durchgeführt werden. Auf Grund der geringen Dicke der Adhäsionsschicht von  $1,5 \mu\text{m}$  ist es nicht notwendig, die Kavitäten unterhalb der Folie mit Metall aufzufüllen. Abbildung 5.15 zeigt ein auf einen vorstrukturierten Wafer auflaminierte, ionenspurgätzte Templatfolie aus Polycarbonat der Firma Whatman.

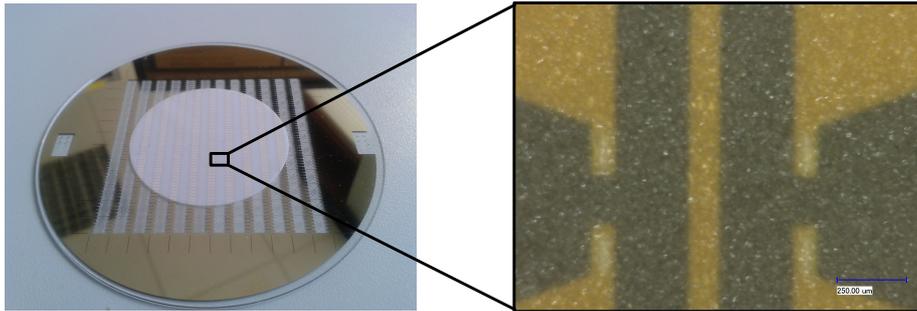


**Abbildung 5.14:** Aufbau zur Durchführung der Lamination der Templatfolie. Die Templatfolie wird auf dem Wafer mit der Adhäsionsschicht platziert. Dann wird der Wafer auf einem Blech zwecks besserem Handling gelegt und mit einer Folie abgedeckt, bevor er in das Laminationsgerät eingeführt wird.

### Ergebnisse bei der Prozessierung

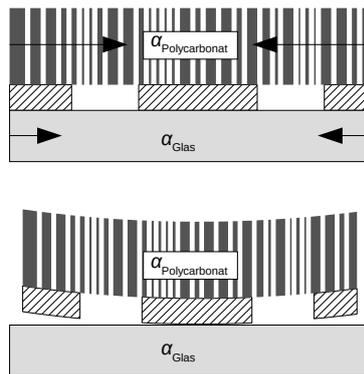
Die Verwendung des Positiv-Resistes ma-P 1215 hat die Dicke der Adhäsionsschicht um mehr als 80% reduziert. Der Photoresist ist zudem für die Verwendung in Galvanikbädern ausgelegt und somit deutlich hydrolysebeständiger als die Schmelzklebefolie. Nicht zuletzt konnte auch der Prozessaufwand durch die Photostrukturierbarkeit des Resistes drastisch reduziert werden.

Die niedrige Schichtdicke in Verbindung mit den hohen Laminationsstemperaturen haben jedoch ein neues Problem aufgeworfen: Nach dem Laminationsprozess kühlt sich der Wafer-Templatverbund wieder ab.



**Abbildung 5.15:** Auf einen Wafer mit Hilfe von thermischer Lamination auf ma-P 1215 auflaminiertes ionenspurgeätzte Templatolie aus Polycarbonat (Whatman). Zu erkennen sind die hellen, frei entwickelten Bereiche, in denen später die Nanodrähte aufwachsen.

Die Templatfolie hat einen deutlich höheren Temperaturausdehnungskoeffizienten als das Glassubstrat. Bei der Abkühlung steigen die dadurch induzierten Eigenspannungen derart an, dass sich die Templatfolie vom Substrat ablöst. (siehe Abbildung 5.16). Das Risiko dafür steigt mit zunehmender Dicke des Templates bzw. mit sinkender Porendichte. Daher konnten nur dünne Template mit einer vergleichsweise hohen Porendichte zuverlässig mit diesem Prozess auf das Substrat integriert werden.



**Abbildung 5.16:** Unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten zwischen Folie und Substrat führen zum Ablösen der Templatfolie beim Abkühlen des Substrates.

Für dieses Problem gibt es im Prinzip zwei unterschiedliche Lösungsmöglichkeiten:

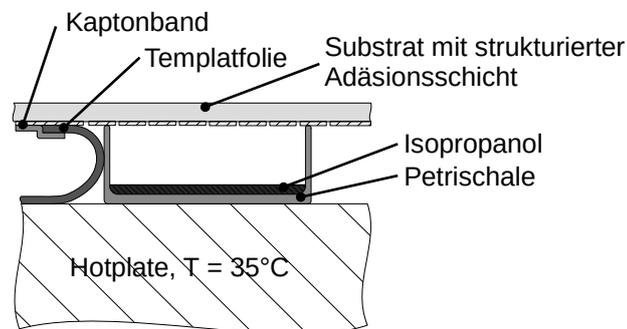
1. *Erhöhen der Schichtdicke der Adhäsionsschicht:* Wenn die Dicke der Adhäsionsschicht erhöht wird, dann ist diese in der Lage die unterschiedlichen Längenausdehnung auszugleichen.
2. *Verringern der Laminationstemperatur:* Wird die Laminationsstemperatur verringert, verringert sich die Neigung zur Ablösung.

Im Folgenden wird das Konzept der Verringerung der Laminationstemperatur verfolgt, da selbst eine Erhöhung der Lackschichtdicke auf mehr als 15 µm kaum signifikante Verbesserungen der Haftung bringt.

#### 5.4.2.3 Lamination mit Lösungsmittelunterstützung

Soll die Laminationstemperatur verringert werden, muss der Lack auf andere Art und Weise erweicht werden. Hierfür bietet sich das Anlösen des Lackes in einem Lösungsmittel an. Dabei muss beachtet

werden, dass das Lösungsmittel zwar die Laminierschicht anlöst, jedoch nicht die Templatfolie. Bei der Verwendung handelsüblicher Photoresiste kann zum Anlösen Isopropanol ( $C_3H_8O$ ) genutzt werden. Damit die Form der bereits strukturierten Adhäsionsschicht und die Schicht selbst nicht beschädigt wird, wird das Lösungsmittel nicht in flüssiger Form appliziert, sondern dampfförmig. Dazu wird eine gesättigte Isopropanoldampfatosphäre erzeugt. Dies geschieht in einer Petrischale, die mit 1-2 mm Füllhöhe Isopropanol gefüllt und auf einer Hotplate (temperiert auf  $35^\circ C$ ) platziert wird. Der Aufbau ist in Abbildung 5.17 dargestellt. Der Wafer wird mit der Adhäsionsschicht nach unten auf der Petrischale platziert, so dass diese luftdicht abgeschlossen wird. Durch die erhöhte Temperatur und den Verschluss wird eine Lösungsmitteldampfatosphäre erzeugt, die die Adhäsionsschicht anlöst. Dabei ist die Temperatur und die Prozessdauer so gewählt, dass keine Tröpfchen auf dem Wafer kondensieren und die Schicht zerstören. Nach 20 s wird der Wafer von der Petrischale genommen und die bereits mit Kaptonband vorfixierte Folie auf die angelöste Fläche angedrückt. Nach dem Andrücken wird die Templatfolie nochmals mit einem Rollenlaminiergerät auf den Wafer aufgepresst. Dabei wird das Laminiergerät auf Raumtemperatur gehalten. Der Aufbau während der Lamination entspricht dem in Abbildung 5.14 dargestellten.



**Abbildung 5.17:** Versuchsaufbau zur lösungsmittelunterstützten Erweichung der Adhäsionsschicht. Die Erweichung der Adhäsionsschicht ist ein zusätzlicher Prozessschritt der vor der Lamination der Templatfolie durchgeführt werden muss.

Der Prozessablauf entspricht genau dem in Abbildung 5.13 dargestellten. Vor Prozessschritt d) ist das Erweichen des Lackes (Abbildung 5.17) mittels Isopropanol durchzuführen. Außerdem ist in Prozessschritt d) die Temperatur von  $140^\circ C$  auf Raumtemperatur zu setzen. Um den Prozess robuster zu machen wird statt einer  $1,5 \mu m$  dicken Schicht ma-P 1215 eine ca.  $7 \mu m$  dicke Schicht AZ-9260 als Adhäsionsschicht appliziert. Die dickere Schicht ist etwas toleranter gegenüber Prozessschwankungen beim Anlösen des Lackes. Dadurch kommt es weniger zu Löchern in der Schicht, die auf Grund der ungewollten Kondensation des Isopropanols entstehen. Diese Löcher führen später zu *parasitärem Drahtwachstum*, d.h. es wachsen Drähte an Stellen, an denen keine vorgesehen sind. Die verwendeten Prozessparameter sind in Tabelle 5.5 dargestellt. Abbildung 5.18 a) zeigt die strukturierte Adhäsionsschicht aus dem Positiv-Photoresist AZ9620. In den frei entwickelten Bereichen wachsen im späteren Prozessschritt die Nanodrähte. Abbildung 5.18 b) zeigt ein auf die strukturierte Adhäsionsschicht auflaminiertes, fast transparentes, Polycarbonattemplat der Firma it4ip.

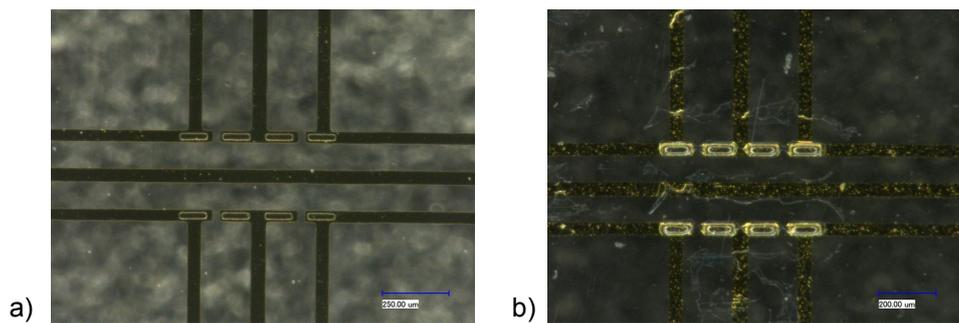
**Tabelle 5.5:** Prozessablauf und -parameter zur mittels Phoptolack und Lösungsmittelunterstützung.

Schritt	Prozessschritte und -parameter
Aufbringen von Haftvermittler auf den Wafer	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aufschleudern des Haftvermittlers TI-Prime, 30 s bei <math>3000 \frac{U}{min}</math></li> <li>Aktivieren des Haftvermittlers, 1 min bei <math>120^\circ C</math> auf einer Hotplate</li> </ul>

<p>Photolithographie mit Photoresist (der Photoresist fungiert als Adhäsionsschicht)</p>	<p><b>ma-P 1215, 1,5 µm Schichtdicke</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 30 s bei <math>1500 \frac{U}{min}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, 2min bei 100°C</li> <li>• Belichten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>55 \frac{mJ}{cm^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler ma-D 331 (micro resist technology GmbH, Berlin)</li> <li>• Gründliches Reinigen mit DI-Wasser und anschließendes Trocknen mit Stickstoff</li> </ul> <p><b>AZ 9260, 7 µm Schichtdicke</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 8 s bei <math>500 \frac{U}{min}</math>, 50 s bei <math>3500 \frac{U}{min}</math>, Sollschichtdicke <math>\approx 8 \mu m</math></li> <li>• Softbake auf einer Hotplate: 8 min bei 100°C</li> <li>• Rehydration: ca. 30 min <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>680 \frac{mJ}{cm^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 400 K (verdünnt mit Wasser, 1:3)</li> <li>• Gründliches Reinigen mit DI-Wasser und anschließendes Trocknen mit Stickstoff</li> </ul>
<p>Erweichen der Adhäsionsschicht</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erwärmen von Isopropanol in einer Petrischale auf 35°C</li> <li>• Vorfixieren der Templatfolie auf den Wafer mit Kaptonband</li> <li>• Wafer für 20-22 s kopfüber auf die Petrischale legen. Der in der Petrischale erzeugte Isopropanoldampf erweicht die Photolackschicht</li> <li>• leichtes Andrücken der Templatfolie</li> </ul>
<p>Auflaminieren der Templatfolie</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Laminiere die Folie mittels eines Bürolaminationsgerätes <ul style="list-style-type: none"> <li>• Laminationsgeschwindigkeit: Stufe 1</li> <li>• Laminationstemperatur: Raumtemperatur</li> </ul> </li> </ul>

#### 5.4.2.4 Zusammenfassung der Prozesse zur Folienintegration

Das Aufbringen der Folie mit Hilfe der Schmelzklebefolie wurde auf Grund der in Abschnitt 5.4.2.1 dargestellten Nachteile relativ schnell verworfen. Die thermische, sowie die lösungsmittelunterstützte Lamination mit Photoresist als Adhäsionsschicht haben sich als leistungsfähige Verfahren zum Aufbringen der Folie auf ein planares Substrat erwiesen. Grundsätzlich können mit der lösungsmittelunterstützten Lamination alle Template laminiert werden. Aufgrund des Erweichens der Adhäsionsschicht mit Lösungsmitteldampf ist dieser Prozess jedoch fehleranfälliger und aufwändiger als die thermische Lamination. Daher wird empfohlen, die thermische Lamination bei Templates bei denen dieser Prozess funktioniert,



**Abbildung 5.18:** a) Strukturierte Adhäsionsschicht aus 7 µm dick aufgeschleudertem AZ9260. In den frei entwickelten Bereichen in der Mitte wachsen im späteren Prozessschritt die Nanodrähte; b) auf die Adhäsionsschicht auflaminertes Polycarbonattemplat der Fa. it4ip (Dicke: 25 µm, Porendurchmesser: 200 nm, Porendichte:  $10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ )

durchzuführen. Tabelle 5.6 listet alle in der Arbeit verwendeten Template mit dem jeweils empfohlenen Integrationsprozess auf.

**Tabelle 5.6:** Auflistung der in der Arbeit verarbeiteten Template und der dazu verwendeten Integrationsprozesse. Die lösungsmitteldampfgestützte Lamination ist für alle Template anwendbar, wird jedoch nur bei unbedingter Notwendigkeit empfohlen.

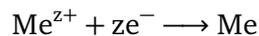
Templat				Thermische Lamination	Lösungsmitteldampfgestützte Lamination
Hersteller	Dicke [µm]	Porendichte [ $\frac{1}{\text{cm}^2}$ ]	Porendurchmesser [nm]		
Whatman	10-15	$3 \cdot 10^8$	100	X	
Whatman	10-15	$3 \cdot 10^8$	200	X	
Whatman	10-15	$2 \cdot 10^7$	1	X	
it4ip	25	$10^6$	400		X
it4it	25	$10^6$	200		X
GSI <sup>1</sup>	30	$10^8$	200-300		X
GSI <sup>1</sup>	100	$10^8$	200-400		X
micryon	60	$10^6$	1,5-2		X

<sup>1</sup> Nicht kommerziell erhältlich

Insgesamt lässt sich ein weites Spektrum an verschiedenen Templaten mit dem Prozess verarbeiten. Durch die Verwendung von Photoresisten als Adhäsionsschicht ist ein einfacher Prozess entwickelt worden, der sehr gut kompatibel mit in der Mikrosystemtechnik etablierten Prozessen ist. Zudem sind die Positiv-Photoresiste sehr beständig gegen anorganische Chemikalien, wie z.B. die Elektrolyte in den nachfolgenden Galvanikprozessen.

## 5.5 Galvanische Erzeugung der Nanodrähte

Nach dem Auflaminieren der Templatfolie werden Nanodrähte in den Poren des Polycarbonattemplates erzeugt. Dazu werden die Poren des Templates galvanisch aufgefüllt (siehe Abbildung 5.4 c)). Bei der galvanischen Abscheidung von Metallen handelt es sich um eine elektrochemische Abscheidung aus der flüssigen Phase, dem Elektrolyt. Die in dieser Arbeit zur Abscheidung verwendeten Metalle liegen als gelöstes Salz (z.B. bei Nickel- oder Kupferabscheidung) oder als gelöster Komplex (z.B. bei Goldabscheidung) in einer wässrigen Lösung vor. Die Abscheidung des Metalls auf dem Substrat erfolgt durch Reduktion der in Lösung befindlichen Metallionen [73]. Dies lässt sich mit folgender Reaktionsgleichung beschreiben:



Bei der galvanischen Abscheidung werden die für die Reaktion notwendigen Elektronen durch eine äußere Strom- bzw. Spannungsquelle bereitgestellt. Den prinzipiellen Aufbau einer einfachen Zelle zur galvanischen Abscheidung von Metallen zeigt Abbildung 5.19.

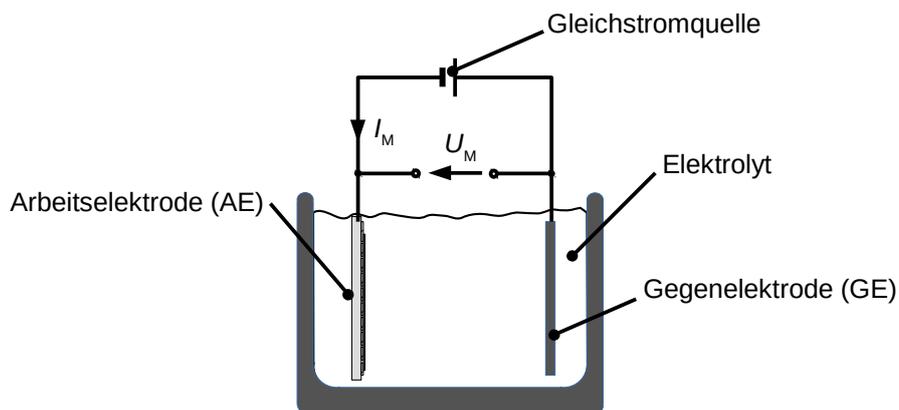


Abbildung 5.19: Einfache Zelle zur Metallabscheidung

### 5.5.1 Grundlagen der galvanischen Abscheidung

Wird eine metallische Elektrode in eine Elektrolytlösung getaucht, bildet sich auf Grund einer Gleichgewichtsreaktion zwischen Metallabscheidung und -auflösung entlang der Grenzfläche Metallelektrode/Elektrolyt eine Potentialdifferenz  $\Delta\varphi = \varphi_{\text{Me/Me}^{z+}} - \varphi_{\text{Elektrolyt}}$  zwischen der Elektrode und dem Elektrolyt aus, die als *Gleichgewichtspotential* bezeichnet wird [74].

Diese Potentialdifferenz kann nicht experimentell bestimmt werden [75]. Aus diesem Grund wird das Gleichgewichtspotential immer gegen eine willkürlich gewählte Bezugselektrode angegeben. Wird als Bezugspotential das der Normalwasserstoffelektrode (NHE), welches definitionsgemäß zu  $\varphi_{\text{H}} = 0$  gesetzt wird, gewählt, spricht man vom *Standardpotential*  $\varphi_{00,\text{Me/Me}^{z+}} = \varphi_{\text{Me/Me}^{z+}} - \varphi_{\text{H}}$ <sup>1</sup>. Nachfolgend werden alle angegebenen Potentiale auf die Normalwasserstoffelektrode bezogen.

<sup>1</sup> Hinweise zur Indizierung: Eine „0“ bedeutet Potential bezogen auf die Normalwasserstoffelektrode. „00“ bedeutet Gleichgewichtspotential bezogen auf die Normalwasserstoffelektrode

**Tabelle 5.7:** Standardpotentiale der in der Arbeit verwendeten Metalle bei 25°C nach [75].

Elektrode	Elektrodenvorgang	$\varphi_{00,Me/Me^{z+}} / V$
Cu/Cu <sup>2+</sup>	Cu <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Cu	0,3402
Ni/Ni <sup>2+</sup>	Ni <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Ni	-0,23
Au/Au <sup>+</sup>	Au <sup>+</sup> + e <sup>-</sup> ⇌ Au	1,42
Fe/Fe <sup>2+</sup>	Fe <sup>2+</sup> + 2e <sup>-</sup> ⇌ Fe	-0,409
Fe <sup>3+</sup> /Fe <sup>2+</sup>   <sup>1</sup>	Fe <sup>3+</sup> + e <sup>-</sup> ⇌ Fe <sup>2+</sup>	0,77

<sup>1</sup> Wird oft als Red-Ox Mediator verwendet [65] um bei der Kupfergalvanik ein gleichmäßigeres Wachstum zu erzielen

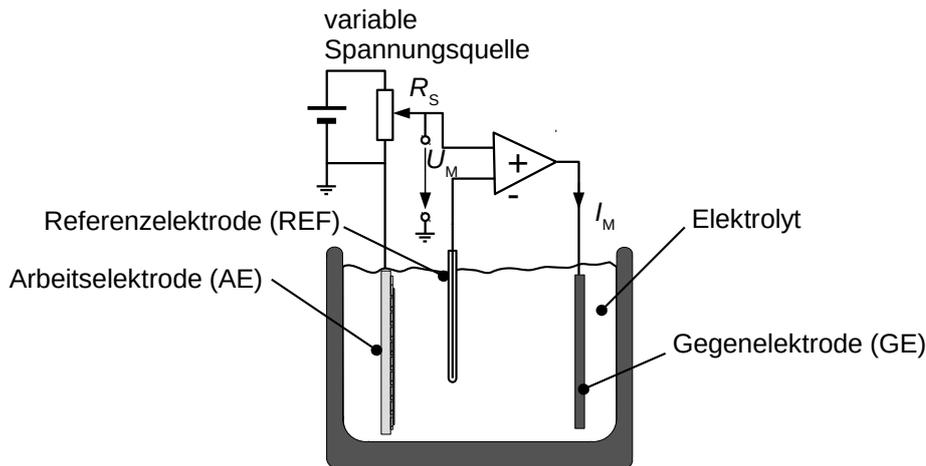
Um die galvanische Abscheidung des Metalls zu ermöglichen, muss das Gleichgewichtspotential in *anodischer* Richtung überschritten werden [74]. Dies geschieht durch Anlegen einer äußeren Spannung zwischen zwei im Elektrolyt befindlichen Elektroden (Abbildung 5.19). Dadurch stellt sich an der Elektrode ein vom Gleichgewichtspotential unterschiedliches Potential ein  $\varphi \neq \varphi_{00,Me/Me^{z+}}$ . Die Differenz  $\eta = |\varphi - \varphi_{00,Me/Me^{z+}}|$  nennt man *Überspannung*. Durch die Überspannung entsteht ein Elektronenfluss von der Anode (Gegenelektrode) über die äußere Verbindung zur Kathode (Arbeitslektrode). In der Lösung vorhandene Kationen (positiv geladene Metallionen) wandern zur Kathode, absorbieren an ihrer Oberfläche und werden reduziert. Dabei ist sicherzustellen, dass genug Metallionen nachgeliefert werden um den Prozess aufrecht zu erhalten. Der einfachste Aufbau zur Durchführung einer galvanischen Metallabscheidung ist der in Abbildung 5.19 dargestellte. Über eine äußere Stromquelle wird ein fester Strom in das System eingeprägt und auf der Kathode scheidet sich das Metall ab. Als Kathode dient demnach das zu galvanisierende Werkstück, also der Wafer. Zur Steuerung und Überwachung sind der Strom  $I_M$  sowie die Spannung  $U_M = \varphi_{\text{Gegenelektrode}} - \varphi_{\text{Arbeitslektrode}}$  als Messwerte bestimmbar. Der Nachteil dieses Aufbaus ist, dass Widerstandsänderungen im äußeren Aufbau Auswirkungen auf das sich einstellende Potential und damit auf die Materialcharakteristik haben. Im ungünstigsten Fall wird die Wasserstoffüberspannung überschritten und es bildet sich Wasserstoff an der Kathode. Das kann zur Versprödung des abgeschiedenen Metalls führen [76]. Im Fall der Drahtabscheidung in sehr dünnen Poren sorgt die Wasserstoffbildung sogar dafür, dass die Poren mit Gas gefüllt werden und die Abscheidung stoppt. Daher ist dieser Aufbau für die galvanische Herstellung von Nanodrähten in Templaten ungeeignet. In dieser Arbeit wird die sog. 3-Elektroden-Anordnung mit einer zusätzlichen stromlosen Referenzelektrode, die über ein konstantes Potential verfügt, verwendet. Das Potential der Arbeitslektrode wird immer in Bezug auf diese Referenzelektrode eingestellt. Den schematischen Aufbau einer solchen Zelle zeigt Abbildung 5.20.

Über den Widerstand  $R_S$  wird die Sollspannung  $U_M$  zwischen Referenz- und Arbeitslektrode eingestellt. Da die Referenzelektrode ein konstantes Standardpotential aufweist, kann mit  $U_M$  das Standardpotential der Arbeitslektrode bestimmt werden. Als Referenzelektroden kommen üblicherweise Metallionenelektroden, sog. Elektroden „zweiter Art“ zum Einsatz. Tabelle 5.8 stellt verschiedene Referenzelektroden mit ihren Standardpotentialen dar. Das Standardpotential  $\varphi_{0,AE}$  der Arbeitslektrode kann dann durch Differenzbildung der Sollspannung mit dem Standardnormalpotential der Referenzelektrode  $\varphi_{00,REF}$  berechnet werden.

$$\varphi_{0,AE} = U_M + \varphi_{00,REF}$$

Das Potential der Arbeitslektrode lässt sich somit genau einstellen. Die Differenz zwischen dem eingestellten Potential und dem Standardgleichgewichtspotential nennt man *Überspannung*  $\eta$ .

$$\eta = \varphi_{00,AE} - \varphi_{0,AE}$$



**Abbildung 5.20:** Potentiostatisch geregelte Zelle zur Metallabscheidung nach [77]. Über den Widerstand  $R_S$  wird die Sollspannung zwischen Referenz- und Arbeitselektrode eingestellt.

**Tabelle 5.8:** Standardpotentiale ausgewählter Referenzelektroden bei 25°C nach [75].

Elektrode	Lösung	Elektrodenvorgang	$\varphi_{00} / \text{V}$
Silber-	gesättigt KCl	$\text{AgCl} + \text{e}^- \rightleftharpoons \text{Ag} + \text{Cl}^-$	0,1976
Silberchloridelektrode	$\text{KCl} (c = 1 \frac{\text{mol}}{\text{l}})$		0,2368
$\text{Ag}/\text{AgCl}/\text{Cl}^-$	$\text{KCl} (c = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{l}})$		0,2894
Kalomelektrode	gesättigt KCl	$\text{Hg}_2\text{Cl}_2 + 2\text{e}^- \rightleftharpoons 2\text{Hg} + 2\text{Cl}^-$	0,2415
$\text{Hg}/\text{Hg}_2\text{Cl}_2/\text{Cl}^-$	$\text{KCl} (c = 0,1 \frac{\text{mol}}{\text{l}})$		0,2807
	$\text{KCl} (c = 1 \frac{\text{mol}}{\text{l}})$		0,3337

Damit eine Metallabscheidung beginnen kann, muss für die Überspannung gelten:  $\eta < 0$ , das heißt das eingestellte Potential muss negativer sein als das Standardgleichgewichtspotential. Damit muss für die Spannung  $U_M$ , die am Potentiostat eingestellt wird gelten:

$$U_M < \varphi_{00,AE} - \varphi_{00,REF}$$

Um beispielsweise Kupfer aus einer Kupfersulfatlösung abzuscheiden muss, bei Verwendung einer gesättigten Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode eine Spannung von  $U_M < 0,1426 \text{ V}$  am Potentiostat eingestellt werden.

Mit Hilfe eines Potentiostats lässt sich also gezielt eine Überspannung an der Arbeitselektrode einstellen und damit die Abscheidung des Metalles steuern. Die Abscheidung der Nanodrähte in dieser Arbeit erfolgt immer potentiostatisch mit Hilfe der 3-Elektroden-Anordnung. Durch Messung des Abscheidestroms kann die abgeschiedene Metallmenge mit Hilfe des Faraday'schen Gesetzes (Gleichung (5.1)) bestimmt werden.

$$m = \frac{M}{zF} \int_0^T i(t) dt \quad (5.1)$$

mit

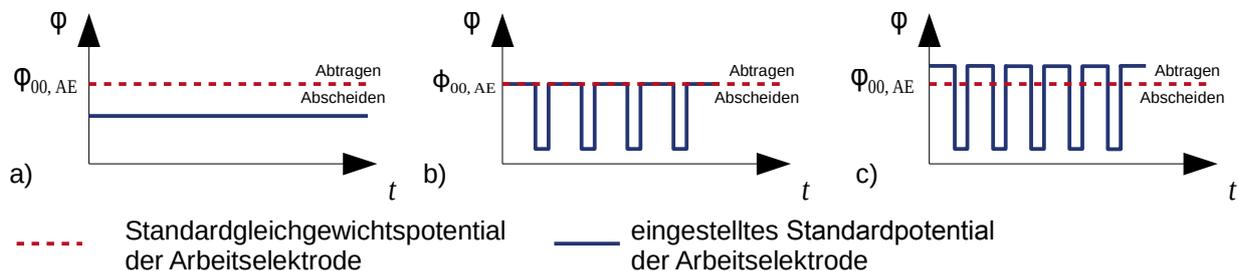
$M$  = Molare Masse des abgeschiedenen Metalls /  $\frac{\text{kg}}{\text{mol}}$

$z$  = Wertigkeit des Elektrolyten

$F$  = Faradaykonstante =  $96485 \frac{\text{C}}{\text{mol}}$

## 5.5.2 Puls- und Umkehrpulsabscheidung

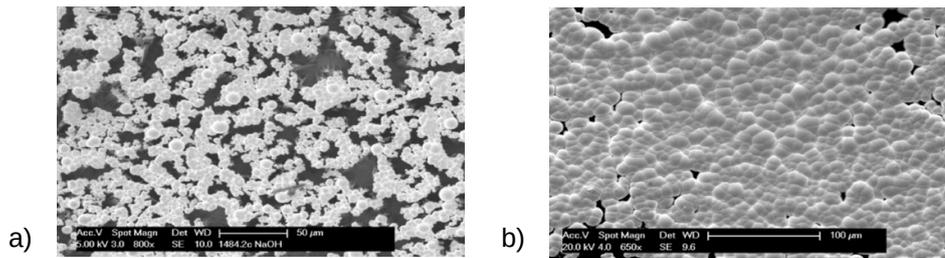
Bei der Puls- bzw. Umkehrpulsabscheidung wird das Potential der Arbeitselektrode nicht konstant gehalten, sondern zeitlich verändert. Bei der Pulsabscheidung wird das Potential der Arbeitselektrode zwischenzeitlich auf das Standardgleichgewichtspotential eingestellt, bei der Umkehrpulsabscheidung überschreitet das eingestellte Potential das Standardgleichgewichtspotential, so dass zwischenzeitlich wieder Material abgetragen wird. Die Pulse werden in periodisch aufeinanderfolgenden Zyklen wiederholt.



**Abbildung 5.21:** Vergleich der Abscheidungsverfahren; a) Gleichspannungsabscheidung, b) Pulsabscheidung, c) Umkehrpulsabscheidung

Während des Abscheidezyklus sinkt die Konzentration an Metallionen im Elektrolyt an der Arbeitselektrode, da diese auf der Elektrode abgeschieden werden. Es bildet sich eine *Diffusionsschicht* mit der Dicke  $\delta_s$  aus [74]. Je dicker diese Schicht ist, desto ungleichmäßiger ist die Metallabscheidung in den Poren. Wird nun die Abscheidung unterbrochen, indem die Elektrode auf Standardgleichgewichtspotential gesetzt wird, können Metallionen nachdiffundieren und die Konzentration steigt in unmittelbarer Nähe der Elektrode wieder an. Die Dicke  $\delta_s$  der Diffusionsschicht sinkt. Wird nun die Abscheidung periodisch geführt, entsteht eine pulsierende Diffusionsschicht, die im Mittel kleiner ist. Die Abscheidung wird konformer. Der Effekt ist deutlich in Abbildung 5.22 zu erkennen.

Bei der Umkehrpulsabscheidung wird ein Abtragspuls eingeführt, bei dem das Standardgleichgewichtspotential überschritten wird. Während dieses Pulses werden vor allem locker gebundene Atome von der Oberfläche der Arbeitselektrode gelöst. Dadurch stehen weniger Nukleationskeime für die Abscheidung während des nachfolgenden Abscheidezyklus zur Verfügung. Damit steigt die Kristallitgröße und der Texturkoeffizient des abgeschiedenen Metalls an, da der Abstand zwischen den Nukleationskeimen höher ist [36, 78].



**Abbildung 5.22:** Überwachungen auf Platin-Nanodrahtarrays; a) Mit Gleichstrom abgeschiedenes Platin-Nanodrahtarray, b) mit gepulster Spannung abgeschiedenes Platin-Nanodrahtarray; Es ist zu erkennen, dass die Überwachungen bei der gepulsten Abscheidung mit gepulstem Strom deutlich gleichmäßiger sind [36].

Da in dieser Arbeit besonders die Konformität der Abscheidung wichtig ist, wird ein potentialgesteuertes Pulsabscheidungsverfahren verwendet.

### 5.5.3 Anlage zur Durchführung der Abscheidung

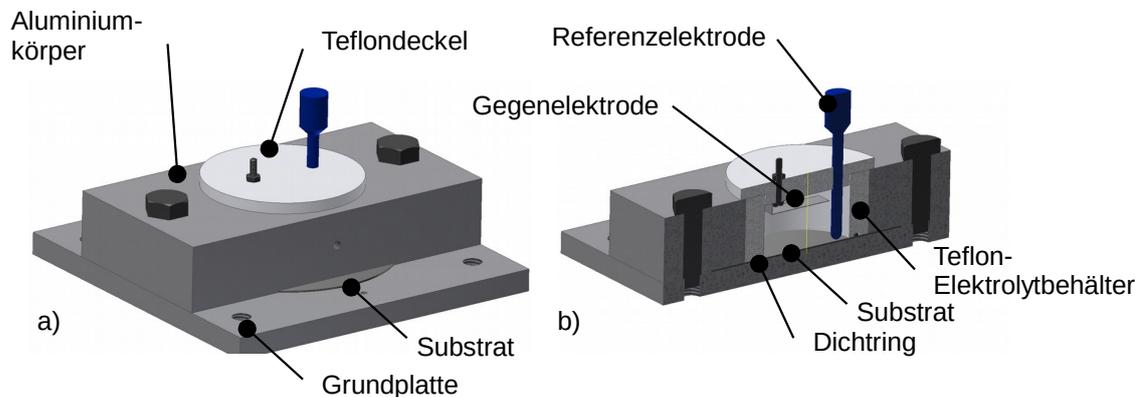
Im vorherigen Abschnitt wurde dargelegt, dass zur Abscheidung der Nanodrähte in den Poren eine 3-Elektroden-Anordnung zum Einsatz kommt. Da die verfügbare Galvanikanlage (MOT  $\mu$ Galv) nicht erweitert werden kann, wird eine eigene Zelle konstruiert. Dabei werden folgende Randbedingungen berücksichtigt:

- *einfache Einspannung von 4“-Wafern* Am Institut EMK sind alle Anlagen für die Verwendung von 4“-Wafern ausgelegt. Daher muss auch die Galvanik-Zelle für solche Wafer ausgelegt werden, um eine komplikationslose Prozessierung zu ermöglichen.
- *Verwendung der 3-Elektroden-Anordnung* Wie beschrieben werden die Nanodrähte mit einer 3-Elektroden-Anordnung abgeschieden. Die Montage einer Referenzelektrode muss bei der Konstruktion der Zelle benötigt werden.
- *Puls- und Umkehrpulsabscheidung* Zur Abdeckung einer breiten Palette an Prozessen werden sowohl Puls- als auch Umkehrpulsabscheidung realisiert.
- *potentio- und galvanostatischer Betrieb* Neben der spannungsgesteuerten (potentiostatischen) Abscheidung ist es zweckmäßig auch eine stromgesteuerte (galvanostatische) Abscheidung zu realisieren. Dann können auch herkömmliche Abscheidungen durchgeführt werden.
- *Steuerung und Überwachung per PC* Zur Überwachung des Wachstums der Drähte werden die Daten durch einen PC aufgezeichnet. Das ist zur Auswertung von Versuchsreihen zur Parametervariation notwendig.

Da in den Poren Diffusion der weitaus dominante Transportprozess für die Metallionen ist, wird keine Konvektion zur Nachlieferung der Ionen benötigt. Aus diesem Grund kann auf eine Bewegung des Elektrolyts verzichtet werden. Zur Vereinfachung ist es zweckmäßig, das Elektrolytvolumen so klein zu bemessen, dass der Elektrolyt nach einer begrenzten Anzahl von Abscheidungen ausgetauscht werden kann. Dann ist es möglich auf eine aufwendige Umwälzung, Filterung und Aufbereitung des Elektrolyts zu verzichten, ohne dass die Reproduzierbarkeit der Abscheidung darunter leidet.

### 5.5.3.1 Galvanikzelle zur Erzeugung von Nanodrähten auf 4"-Substraten

Innerhalb der Arbeit wurde eine einfache Zelle konzipiert, die die galvanische Abscheidung der Nanodrähte auf einem 4"-Substrat ermöglicht. Die Zelle kann zur Temperierung auf einer Hotplate platziert werden, um eine Abscheidung bei erhöhter Temperatur zu ermöglichen. Das Konzept der Zelle zeigt Abbildung 5.23.



**Abbildung 5.23:** Konzept der Galvanikzelle zur Abscheidung der Nanodrähte; a) Komplettansicht, b) Schnittansicht. Der Wafer wird zwischen dem Aluminiumkörper und der Grundplatte mit 2 Schrauben eingeklemmt. Der Deckel nimmt die Gegen- sowie die Referenzelektrode auf. Zur Temperierung kann der komplette Aufbau auf einer Hotplate platziert werden.

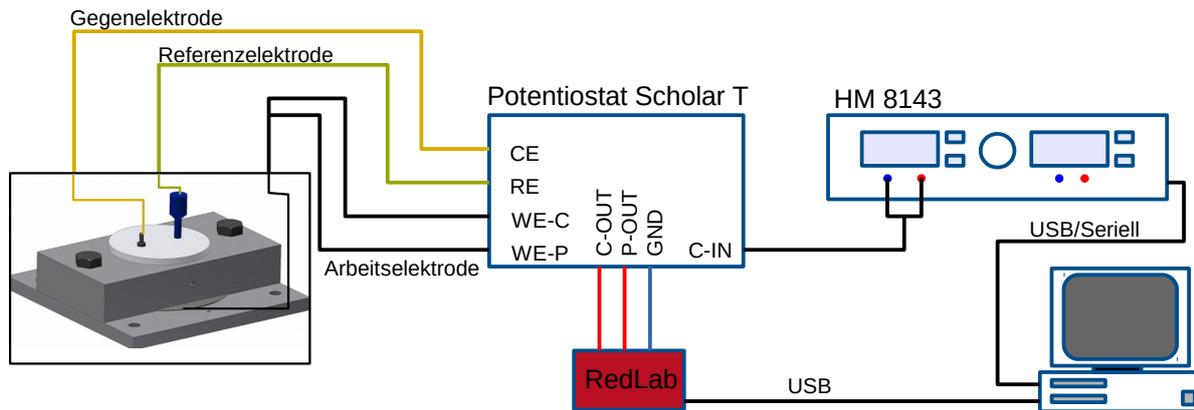
Das Substrat wird dabei zwischen dem Aluminiumkörper und der Grundplatte eingeklemmt. Damit der Elektrolyt nicht mit dem Aluminium in Berührung kommt, ist ein Teflonbehälter in den Aluminiumkörper eingepresst. Zur Abdichtung wird ein Gummidichtring verwendet. Der Ein- und Ausbau des Substrates erfolgt über zwei Schrauben, die die Grundplatte und den Aluminiumkörper verbinden. Zur Temperierung wird der komplette Aufbau auf einer Hotplate platziert. Durch Verwendung von Aluminium ist gewährleistet, dass die Wärmeverteilung im Elektrolyt sehr gleichmäßig ist. Der Innendurchmesser des Elektrolytbehälters ist mit 50 mm so gewählt, dass kommerzielle Template genau abgedeckt werden. Durch die Höhe von 3 cm ergibt sich ein Elektrolytvolumen von knapp 60 ml. Auf eine Umwälzung des Elektrolyten wird verzichtet, da dies bei der Abscheidung von Drähten in den Poren nicht nötig ist, da die Strömung nicht in die Poren gelangt.

### 5.5.3.2 Anlage zur Steuerung der Abscheidung

Um geeignete Abscheideparameter zu evaluieren ist es zweckmäßig, die Abscheidung mittels eines PCs zu steuern und zu überwachen. Daneben ist es sinnvoll, den Strom und das Potential während der Abscheidung aufzuzeichnen um es später auszuwerten. Die während der Arbeit aufgebaute Anlage besteht aus folgenden Komponenten:

1. Galvanikzelle nach Abschnitt 5.5.3.1
2. Potentiostat, *Bank IC Scholar D*
3. Netzteil mit arbiträrer Spannungserzeugung, *Hameg HM8143*
4. Messkarte mit analogen Eingängen zur Erfassung des Abscheidestroms und -potentials, „Meilhaus RedLab 1208 LS“

## 5. PC mit Labview zur Steuerung der Anlage und Aufzeichnung der Messdaten



**Abbildung 5.24:** Aufbau der während der Arbeit entwickelten Galvanikanlage

Am PC kann mittels eines Labview-Programms eine Pulsfolge oder konstante Abscheidenspannung eingestellt werden. Diese wird an das Netzteil HM8143 übermittelt, welches diese Spannung oder Spannungsfolge als Sollspannung für die Potentialregelung ausgibt. Der Potentiostat regelt die Sollspannung, die am Eingang „C-IN“ des Potentiostaten anliegt, zwischen Arbeits- und Referenzelektrode ein.

$$U_{\text{soll}} = \varphi_{0,AE} - \varphi_{0,REF}$$

Nach der Übermittlung der Sollspannung an das Netzteil HM8143 arbeitet dieses autark, d.h. ein eventuelles Abstürzen des PCs beeinflusst die Abscheidung nicht. Am Potential- und Stromausgang des Potentiostaten ist die Messkarte „RedLab“ angeschlossen. Dadurch können die Messwerte am PC abgespeichert und ausgewertet werden. Tabelle 5.9 listet die Eigenschaften sowie Randbedingungen der Galvanikanlage zur Abscheidung der Nanodrähte auf.

Durch die Software ist es möglich eine Spannungspulsfolge mit drei unterschiedlichen Spannungshöhen festzulegen. Diese haben eine minimale Zeitauflösung von 100  $\mu\text{s}$ . Das aktuelle Potential wird mit der Messkarte über die Messausgänge des Potentiostaten gemessen. Durch die Messbereichsanpassung des Potentiostaten und die Auflösung der Messkarte von 8 bit wird eine Auflösung des Abscheidestroms im nA-Bereich ermöglicht. Die Spannungsauflösung ist deutlich besser als 1 mV, was zur Steuerung der Abscheidung mehr als ausreicht. Mit maximal 8 kHz Abtastrate ist die Messkarte ausreichend dimensioniert, um die Messwerte während der Abscheidung an den PC zu übertragen. Abbildung 5.25 zeigt ein Foto der Galvanik-Zelle im Reinraum des Institut EMK.

### 2-Elektroden-Anordnung

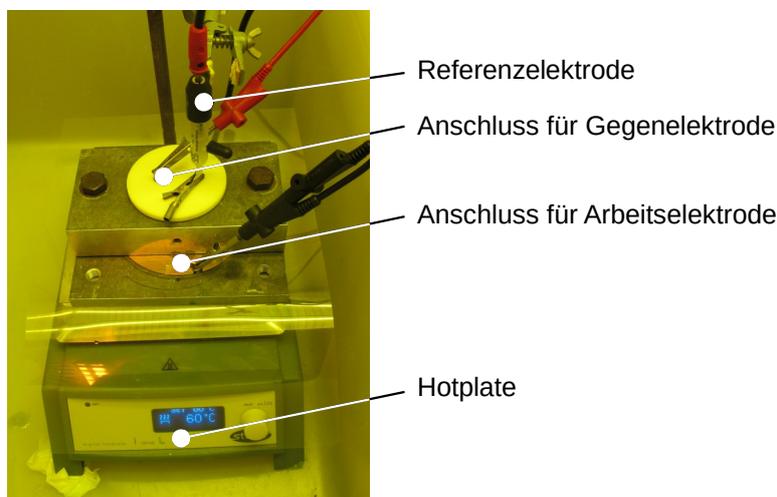
Mit dem Aufbau kann auch leicht eine 2-Elektroden-Anordnung realisiert werden. Dazu legt man den Eingang der Referenzelektrode auf dasselbe Potential wie die Gegenelektrode. Dann wird das Potential zwischen Arbeits- und Gegenelektrode geregelt. Dieses Vorgehen wird bei Gold-Abscheidungen angewendet, deren Elektrolyt zur Vergiftung der Referenzelektrode führen würde.

### Galvanostatische Abscheidung

Der Potentiostat Scholar T besitzt neben dem potentiostatischen auch einen galvanostatischen Betriebsmodus. Daher kann auch eine stromgesteuerte Abscheidung realisiert werden. Das Potential zwischen Referenz- und Arbeitslektrode dient dann nur zur Überwachung der Prozessparameter.

**Tabelle 5.9:** Eigenschaften der Galvanikanlage zur Abscheidung der Nanodrähte

Eigenschaft	Parameter
Signalerzeugung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Spannung: 0..10V</li> <li>• Zeitauflösung: 100 <math>\mu</math>s</li> <li>• 3 unterschiedliche aufeinanderfolgende Spannungspulse einstellbar</li> </ul>
Strom- und Spannungsmessung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abtastrate: <math>f_{\text{Abtast}} = 8 \text{ kHz}</math></li> <li>• Stromauflösung im nA-Bereich</li> <li>• Spannungsaflösung &lt; 1mV</li> </ul>
maximaler Abscheidestrom	$I_{\text{max}} = 150 \text{ mA}$
maximal einstellbare Potentialdifferenz	$U_{\text{max}} = 10 \text{ V}$



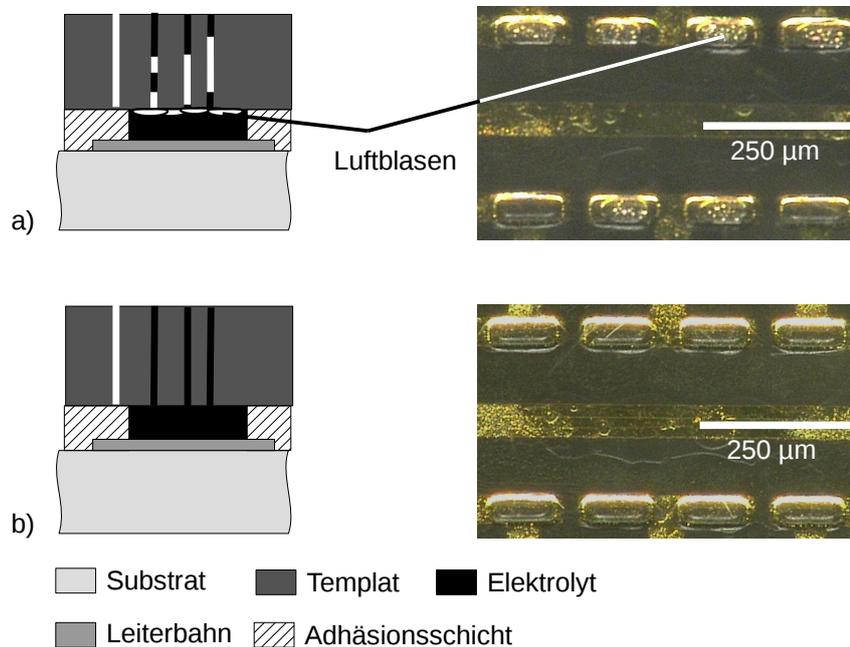
**Abbildung 5.25:** Galvanikzelle während der Abscheidung der Drähte auf einer Hotplate

#### 5.5.4 Benetzung der Template

Damit die Abscheidung in den Poren stattfinden kann, müssen die Poren sowie die Startschicht benetzt sein. Je nach Templatfabrikat ist das Templat hydrophil oder hydrophob. Bei Templaten, die als Filter eingesetzt werden (z.B. der Fa. Whatman) handelt es sich um hydrophilisiertes Polycarbonat. Hier reicht es zur Benetzung aus, den Wafer-Templatverbund einige Minuten in ein Wasserbad zu lagern. Danach sind die Poren als auch die Kavitäten, die durch die Öffnungen in der Adhäsionsschicht gebildet werden, mit Wasser gefüllt. Schwieriger ist dies bei Templaten mit sehr niedrigen Drahtdichten, und Templaten, bei denen das Polycarbonat nicht hydrophilisiert wurde.

Für diese Template wird ein zweistufiger Prozess zur Benetzung erarbeitet. Der erste Schritt ist die Benetzung mit Wasserdampf. Dieser kann durch die Poren dringen, kondensiert aber auf Grund des hydrophoben Charakters der Templatfolie nicht in den Poren aus, sondern erst auf der Metallstartschicht. Im zweiten Benetzungsschritt wird der Wafer-Templat-Verbund mit einer Tensidlösung behandelt. Bei dem verwendeten Tensid handelt es sich um eine 0,006 molare Natriumlaurylsulfat-Lösung. Diese weist eine Oberflächenspannung von weniger als  $30 \frac{\text{mN}}{\text{m}}$  auf, was die niedrigstmögliche Oberflächenspannung, die mit dem Tensid erreicht werden kann, darstellt [79]. Die Benetzung kann mittels eines Mikroskops überwacht werden. Abbildung 5.26 a) zeigt eine Probe bei denen Kavitäten und Poren noch nicht vollständig

benetzt wurden. Man sieht deutlich die Blasen in der rechten Mikroskopaufnahme. Abbildung 5.26 b) zeigt die gleiche Probe nach ca. 90 min Einwirkzeit der Tensidlösung. Zu erkennen ist, dass die Luftblasen verschwunden sind. Das ist ein Zeichen für eine gute Benetzung der Poren und Kavitäten. Tabelle 5.10 zeigt die notwendigen Prozessschritte und Parameter zur Templatbenetzung.



**Abbildung 5.26:** Benetzung des Wafer-Templat-Verbunds; a) keine vollständige Benetzung, es befinden sich noch Luftblasen unterhalb des Templates sowie in den Poren, b) vollständige Benetzung

**Tabelle 5.10:** Prozessablauf und -parameter zur Benetzung der Template

Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Wasserdampfbenetzung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erwärmen von Wasser auf 60°C in einer Petrischale</li> <li>• Den Wafer-Templatverbund 5 min kopfüber auf der Petrischale platzieren, so dass das Templat dem Wasserdampf ausgesetzt ist</li> <li>• Kühlen der Waferrückseite (z.B. durch Betropfen mit Aceton oder Anblasen mit Stickstoff)</li> </ul>
Benetzung mit Natriumlaurylsulfat-Lösung	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wafer-Templat-Verbund in eine Petrischale mit 0,006 molarer<sup>1</sup> Lösung Natriumlaurylsulfatlösung tauchen</li> <li>• Mit einem Mikroskop den Benetzungszustand überwachen; Dauer ca. 90 min</li> </ul>

<sup>1</sup> entspricht 2 g / l Natriumlaurylsulfat

Nach erfolgreich durchgeführter Benetzung kann der Wafer-Templat-Verbund direkt in die Galvanizelle gespannt und diese mit Elektrolyt gefüllt werden.

---

## 5.5.5 Abscheidung der Nanodrähte in den Templaten

---

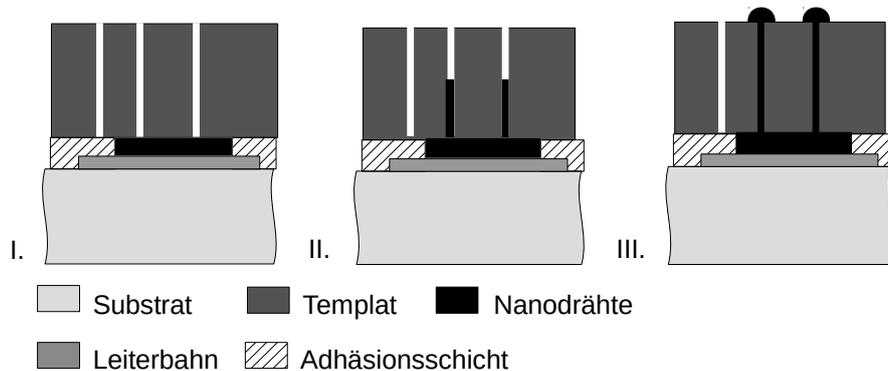
Die galvanische Abscheidung der Drähte in den Poren der Template wurde mit den Metallen Kupfer, Nickel und Gold durchgeführt. Die Abscheidung von Kupfer diente nur zur Prozessentwicklung da die Abscheidung aus Kupferelektrolyt besonders einfach ist. Auf Grund des niedrigen Temperaturkoeffizienten (TK) des elektrischen Widerstandes ist das Metall zur Verwendung als Temperatursensitives Material nicht sinnvoll einsetzbar. Nickel ist wegen des hohen TK besser geeignet, Gold ist für eine Vielzahl von Anwendungen außerhalb der Gasflusssensorik interessant, da es an Luftsauerstoff nicht oxidiert.

---

### 5.5.5.1 Phasen bei der Abscheidung

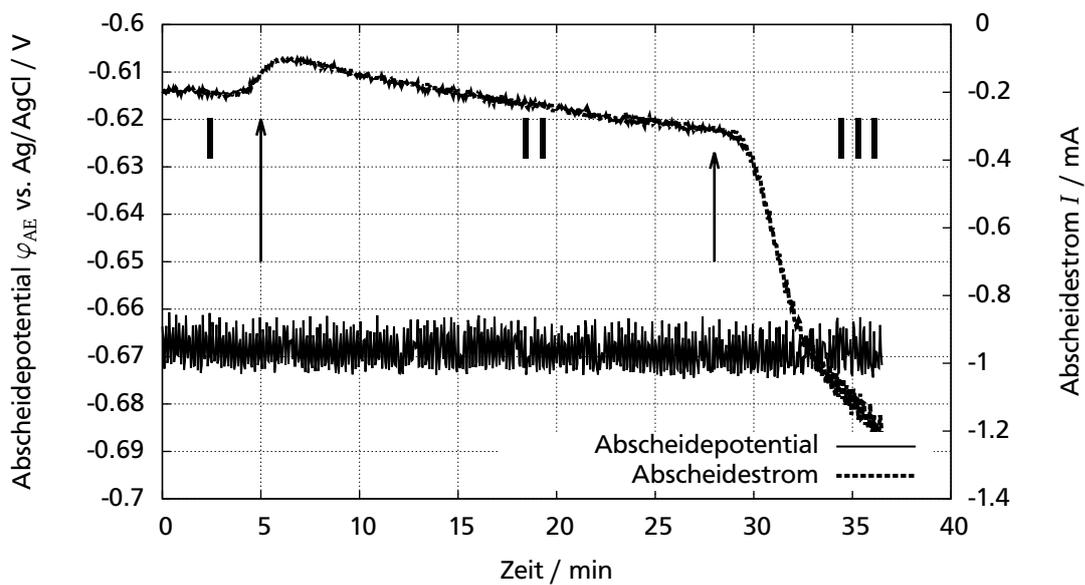
---

Die Abscheidung der Drähte lässt sich grundsätzlich in drei Phasen unterteilen. In der ersten Phase (I) wird die Kavität, die durch die Adhäsionsschicht gebildet wird, aufgefüllt. Die zweite Phase (II) stellt das Wachstum der Drähte in den Poren dar. Die Dritte Phase (III) ist durch den Beginn der Überwachungen gekennzeichnet. Die drei Phasen sind in Abbildung 5.27 illustriert.



**Abbildung 5.27:** Die drei Phasen während der Abscheidung; I. Das Auffüllen der Kavität, die durch die Öffnungen der Adhäsionsschicht gebildet wird, II. Wachsen der Drähte in den Poren, III. Wenn die Poren komplett gefüllt sind, beginnen die Drähte pilzförmig zu überwachsen

Die Abscheidung beginnt auf den Startelektroden am Boden der Öffnungen in der Adhäsionsschicht. Während die Kavitäten gefüllt werden, bleibt die Abscheidefläche konstant. Erreicht die Höhe der Metallschicht die Unterkante des Templates (Phase II) sinkt die aktive Fläche, auf der sich weiteres Metall abscheiden kann, deutlich. Sie bleibt solange konstant, bis die Oberseite des Templates erreicht ist. Für die weitere Abscheidung ist nun keine begrenzende Form mehr vorhanden, wodurch auf den Drähten pilzförmige Überwachungen entstehen. Diese dritte Phase ist dadurch gekennzeichnet, dass die zur Abscheidung verfügbare Fläche stetig steigt. Führt man die Abscheidung weiter durch, wachsen die pilzförmigen Überwachungen zusammen und bilden eine geschlossene Deckschicht (vgl. Abbildung 5.2). Die Phasen können auch bei der Überwachung des Abscheidestroms beobachtet werden (siehe Abbildung 5.28). Während der ersten Phase bleibt der Abscheidestrom weitgehend konstant. Werden dann die Poren erreicht, sinkt der Abscheidestrom aufgrund der sich verringernden Fläche. Dieser Punkt ist durch den ersten Pfeil im Graph in der Abbildung 5.28 dargestellt. Wenn die Poren gefüllt sind steigt die Abscheidefläche durch die Überwachungen wieder an (rechter Pfeil in Abbildung 5.28). Dies macht sich in einer starken Steigerung des Abscheidestroms bemerkbar. Dargestellt sind in dem Graph der mittlere Abscheidestrom und das mittlere Abscheidopotential gegen eine Silber-Silberchlorid-Referenzelektrode, da die Abscheidung als Pulsabscheidung von Nickel durchgeführt wurde.



**Abbildung 5.28:** Potential- und Stromverlauf während der Abscheidung. Dargestellt sind hier nur die Mittelwerte. Anhand der Stromkurve lassen sich 3 unterschiedliche Wachstumsphasen unterscheiden; I. Auffüllen der Kavität zwischen Wafer und Templat, II. Auffüllen der Poren und III. Überwachsen der Drähte. Grundlage war eine Probe mit einer Adhäsionsschichtdicke von 7  $\mu\text{m}$ , einer Templatdicke von 30  $\mu\text{m}$  sowie 300 nm Porendurchmesser. Das Drahtmaterial ist Nickel.

### 5.5.5.2 Parameter für die Abscheidung

Für unterschiedliche Metalle werden unterschiedliche Parameter zur Abscheidung benötigt. Untersucht werden Abscheidungen mit Gleichspannung und pulsformiger Spannung. Zudem hat die Wahl des Templates einen erheblichen Einfluss auf die Abscheidung und die Wahl der Abscheideparameter.

#### Abscheidung von Kupferdrähten

Kupferdrähte werden in der Arbeit nur zu Testzwecken erzeugt. Da sich Kupfer vergleichsweise einfach bei Gleichspannung abscheiden lässt, ist zur Herstellung von Kupferdrähten nur wenig Prozessentwicklungsarbeit notwendig. Das liegt daran, dass Kupfer ein edles Metall ist (Standardgleichgewichtspotential  $> 0$ ) und damit während der Abscheidung keine Gefahr der Wasserstoffabscheidung besteht. Zudem ist Kupferelektrolyt mit hoher Kupferkonzentration sehr preiswert. Tabelle 5.11 zeigt die Zusammensetzung des Kupferelektrolyts, sowie die Abscheideparameter.

**Tabelle 5.11:** Elektrolytzusammensetzung sowie Abscheideparameter für unterschiedliche Template bei der Kupferabscheidung

Elektrolyt-zusammensetzung [80]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 250 <math>\frac{g}{l}</math> Kupfersulfat-Pentahydrat</li> <li>• 23,52 <math>\frac{g}{l}</math> Schwefelsäure</li> <li>• Elektrolyttemperatur: Raumtemperatur</li> </ul>	
	Templat	Parameter
Abscheideparameter	Alle Template (vgl. Tabelle 5.6)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abscheidepotential: <math>\varphi = 0.. - 200 \text{ mV}</math> vs. ges. Ag/AgCl</li> </ul>

#### Abscheidung von Nickeldrähten

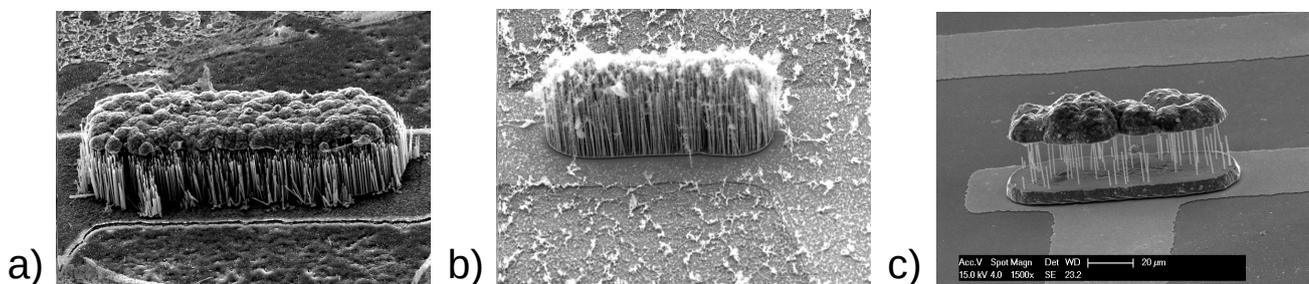
Nickeldrähte sind die meisten in dieser Arbeit hergestellten Drähte. Das liegt an dem hohen TK des Metalls und der damit verbundenen guten Eignung zur Verwendung als thermoresistive Elemente. Die Parameter für Nickel sind sorgfältig zu evaluieren, da auf Grund des unedlen Charakters des Nickels die Neigung zur Wasserstoffentwicklung besteht. In der Arbeit wurde der in der Mikrosystemtechnik übliche Nickelsulfamatelektrolyt eingesetzt. Für die Abscheidung von Nickel wurde in dieser Arbeit ein Pulsabscheidungsverfahren verwendet. Je nach Drahtdicke erweisen sich unterschiedliche Werte für den Abscheide- und Ruhepuls als geeignet. Hauptsächlich die Drahtdicke ist der entscheidende Parameter für die Wahl der Abscheidepotentiale. So weist der Abscheidepuls ein Potential zwischen  $\varphi = -0,9 \text{ V} \dots - 1 \text{ V}$  gegen eine Ag/AgCl-Elektrode auf, der Ruhepuls ein Potential zwischen  $\varphi = -0,4 \text{ V} \dots - 0,5 \text{ V}$ . Tabelle 5.12 gibt die Zusammensetzung des Elektrolyten, sowie die verwendeten Prozessparameter für unterschiedliche Template wieder. Die Daten wurden in langen Versuchsreihen von mehr als 100 Proben gewonnen. Der entscheidende Auswahlparameter ist die Drahtdicke. So muss bei niedrigen Drahtdichten im Bereich von  $10^6 \frac{\text{Drähten}}{\text{cm}^2}$  die Abscheidung langsamer, d.h. bei etwas höheren Potentialen durchgeführt werden. Dieser Effekt relativiert sich etwas, wenn die Drahtdurchmesser deutlich größer als  $1 \mu\text{m}$  gewählt werden können.

**Tabelle 5.12:** Elektrolytzusammensetzung sowie Abscheideparameter für unterschiedliche Template bei der Nickelabscheidung

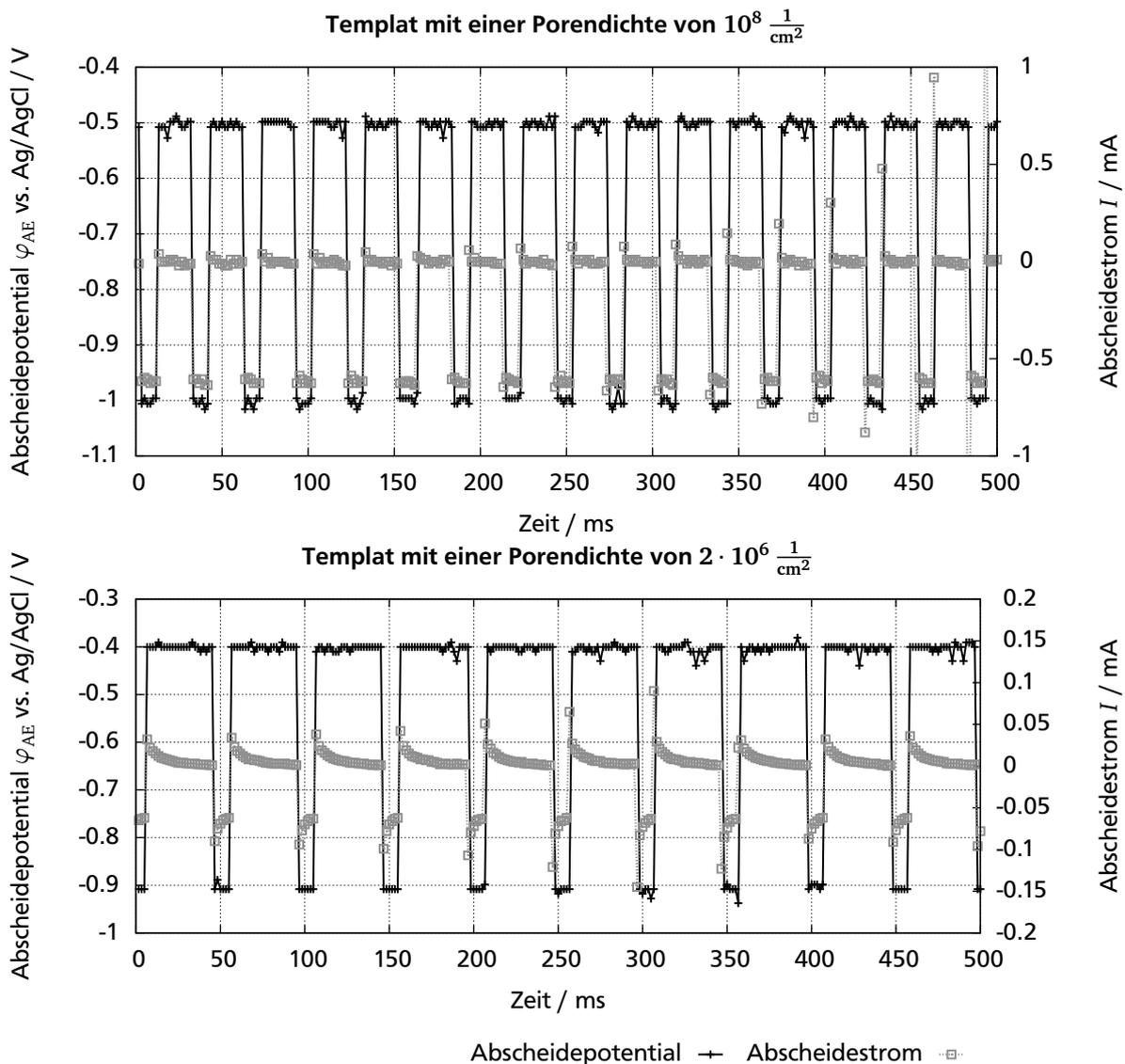
Elektrolyt-zusammensetzung [81]	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 250 <math>\frac{g}{l}</math> Nickelsulfamat-Tetrahydrat</li> <li>• 35 <math>\frac{g}{l}</math> Borsäure</li> <li>• Elektrolyttemperatur 35-45°C</li> </ul>	
---------------------------------	---	--

	Templat	Parameter
Abscheideparameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke: 20,30,100 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Drahtdichte: <math>\geq 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Porendurchmesser: 350 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abscheidepuls: <math>\varphi = -1\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 10\text{ms}</math></li> <li>• Ruhepuls: <math>\varphi = -0,5\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 20\text{ms}</math></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke: 25 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Drahtdichte: <math>2 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Porendurchmesser: 400 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abscheidepuls: <math>\varphi = -0,9\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 10\text{ms}</math></li> <li>• Ruhepuls: <math>\varphi = -0,4\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 40\text{ms}</math></li> </ul>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke: 60 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Drahtdichte: <math>5 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Porendurchmesser: 1500-2000 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abscheidepuls: <math>\varphi = 1\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 10\text{ms}</math></li> <li>• Ruhepuls: <math>\varphi = 0,5\text{V}</math> vs. ges. Ag/AgCl, <math>t = 20\text{ms}</math></li> </ul>

Abbildung 5.30 zeigt die Pulsfolgen für die Abscheidung von Nickeldrähten in unterschiedlichen Templaten. Gleichzeitig sind die dazugehörigen Verläufe des Abscheidestroms dargestellt. Für sehr niedrige Drahtdichten sind deutlich mehr kapazitive Einflüsse bei den Strompulsen zu beobachten, was sich in Stromüberhöhungen bei Potentialwechseln zeigt (unterer Graph in Abbildung 5.30). Daher muss eine längere Ruhepulsphase gewählt werden als bei der Verarbeitung von Templaten mit höherer Drahtdichte, damit alle Umladevorgänge abgeschlossen werden können. Bei der Drahtabscheidung in das Templat mit sehr hoher Drahtdichte ist das unkritisch, so dass die Ruhepausen kürzer gewählt werden können. Darüberhinaus kann das Abscheidopotential niedriger gewählt werden, so dass sich insgesamt eine kürzere Abscheidedauer einstellt. Beispielhaft sind drei unterschiedliche Nanodrahtarrays in Abbildung 5.29 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass sich Drahtarrays mit unterschiedlichen Eigenschaften mit Hilfe des entwickelten Prozesses auf einem Substrat erzeugen lassen. Abbildung 5.29 a) zeigt ein Nanodrahtarray auf einem Glaswafer mit einem Drahtdurchmesser von 300 nm, sowie einer Drahtlänge von 30  $\mu\text{m}$ , b) zeigt ein Array mit dem gleichen Drahtdurchmesser aber einer Drahtlänge von 100  $\mu\text{m}$ . Für beide Arrays wurden Template der GSI verwendet. Die Drahtdichte beträgt in beiden Fällen  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ . Abbildung 5.29 c) zeigt ein Drahtarray mit einer sehr geringen Drahtdichte von  $1,6 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ . Zur Integration der zur Herstellung dieses Arrays notwendigen Templatfolie wurde eine 7  $\mu\text{m}$  dicke Adhäsionsschicht aus AZ9260 verwendet (vgl. Tabelle 5.5). Daher stehen die Drähte auf einen 7  $\mu\text{m}$  hohen Sockel. In



**Abbildung 5.29:** Beispiele für auf einem strukturierten Glaswafer erzeugten Nanodrahtarrays aus Nickel; a) Drahtlänge 30  $\mu\text{m}$ , Drahtdichte  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , mit geschlossener Überwachung; b) Drahtlänge 100  $\mu\text{m}$ , Drahtdichte  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , ohne Überwachung; Drahtlänge 25  $\mu\text{m}$ , Drahtdichte  $1,6 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , mit geschlossener Überwachung



**Abbildung 5.30:** Potential- und Stromverlauf während der Abscheidung für die 3 Phasen aus Abbildung 5.28. Grundlage war eine Probe mit einer Adhäsionsschichtdicke von  $7 \mu\text{m}$ , einer Templatdicke von  $30 \mu\text{m}$  sowie  $300 \text{ nm}$  Porendurchmesser. Das Drahtmaterial ist Nickel.

Abbildung 5.29 lässt sich gut erkennen, dass Drahtarrays mit einer Drahtdicke von  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$  nicht zur Verwendung in Strömungssensoren geeignet sind, da die Drähte zu dicht stehen. Drahtarrays mit einer sehr geringen Drahtdicke können hingegen in thermischen Strömungssensoren eingesetzt werden. Alle in diesem Abschnitt gezeigten Arrays wurden auf Borofloat-Wafern erzeugt.

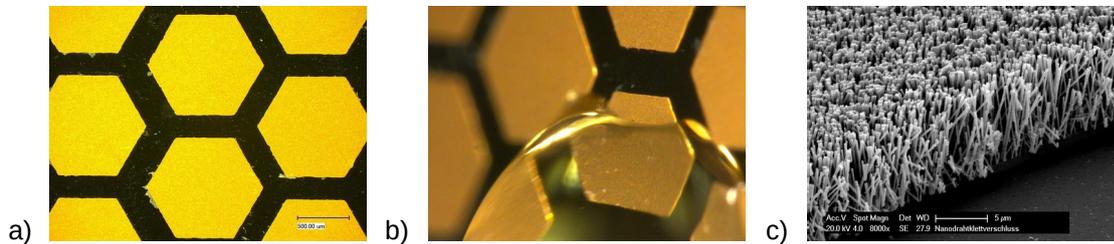
### Abscheidung von Golddrähten

Gold-Nanodrähte werden in dieser Arbeit nicht als sensitive Elemente in Strömungssensoren verwendet. Sie können aber für eine Reihe andere Systeme eingesetzt werden (siehe Kapitel 8). Innerhalb des Zeitraums, in dem diese Arbeit entstand, wurden die in Tabelle 5.13 dargestellten Parameter zur Erzeugung von Gold-Nanodrähten auf vorstrukturierten Glaswafern verwendet. Es wurden nur kommerzielle Template der Fa. Whatman mit Drahtdurchmessern von  $100$  und  $200 \text{ nm}$  und einer Drahtdicke von  $< 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$  eingesetzt. Für diese Templatart erweist sich die Gleichspannungsabscheidung als ausreichend. Zudem wurde eine 2-Elektroden-Anordnung genutzt, mit einem Golddraht als Gegenelektrode. Abbildung

5.31 zeigt wabenförmige Arrays aus Goldnanodrähten, die als metallische „Nano-Klettverschlüsse“ zum Einsatz kommen können.

**Tabelle 5.13:** Elektrolytzusammensetzung sowie Abscheideparameter bei der Goldabscheidung

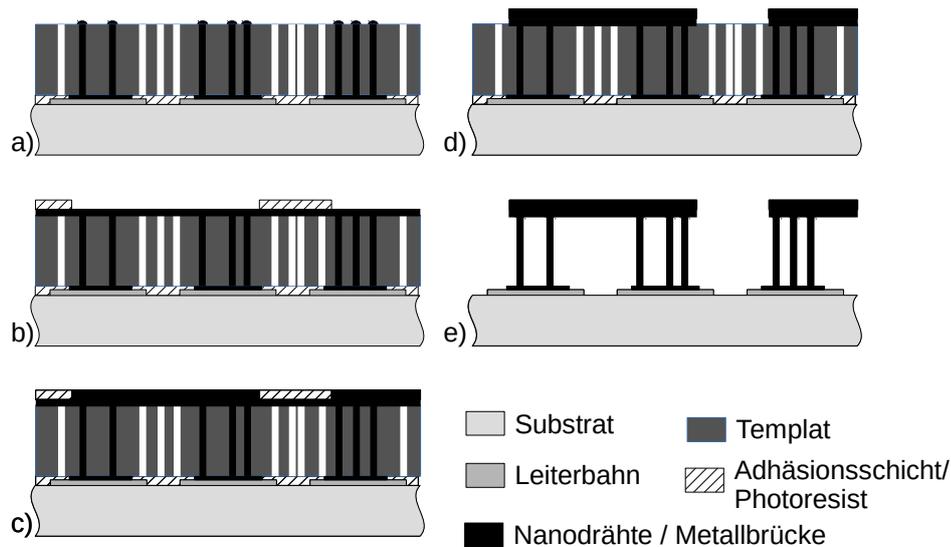
Elektrolyt	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Metakem Gold SF, 15 g Gold pro Liter</li> <li>• Elektrolyttemperatur 45°C</li> </ul>	
Abscheideparameter	Templat	Parameter
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dicke: 10-20 <math>\mu\text{m}</math></li> <li>• Drahtdichte: <math>\geq 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Porendurchmesser: 100-200 nm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Abscheidepotential <math>\varphi = 0,45 \text{ V vs. Gold-draht}</math></li> </ul>



**Abbildung 5.31:** Großflächige, wabenförmige Arrays aus Gold-Nanodrähten; a) Draufsicht, die hellen Bereiche sind die Nanodrähte, b) Wassertropfen auf den Nanodrahtarrays. Man erkennt deutlich die veränderten Benetzungseigenschaften der Nanodrahtarrays gegenüber der planen Goldoberfläche, c) REM-Aufnahme eines Gold-Nanodrahtarrays. Die Drahtdichte beträgt ca.  $3 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , die Drahtlänge ca.  $10 \mu\text{m}$ , der Drahtdurchmesser  $100 \text{ nm}$ .

## 5.6 Reihenschaltung mehrerer Nanodrahtarrays

Um Nanodrähte als temperatursensitive Elemente verwenden zu können, ist es notwendig, die Nanodrähte beidseitig zu kontaktieren. Dann kann der temperaturabhängige Widerstand der Nanodrähte gemessen werden. Die einfachste Möglichkeit, eine beidseitige Kontaktierung für die Drahtarrays zu erreichen, ist die Verbindung zweier Arrays durch eine Verbindungsbrücke. Dadurch können zusätzliche Strukturen zur Kontaktierung gespart werden. Es werden immer zwei Nanodrahtarrays in Reihe geschaltet. Eine solche Brücke ist direkt nach der Erzeugung der Drähte auf dem Templat herstellbar. Dazu kann von Fertigungsschritt c) in Abbildung 5.4 ausgegangen werden. Direkt auf dem Templat wird eine dünne Metallschicht als Startschicht für den nachfolgenden Galvanikschritt aufgebracht. Anschließend wird ein Photoresist (AZ9260) aufgebracht und strukturiert. Der Photolack ist dickflüssig genug um das Templat nicht aufzuweichen. Beim Softbake ist zu beachten, dass dieser bei niedrigen Temperaturen stattfinden sollte, um ein Zerstören des Wafer-Templatverbundes (vgl. Abschnitt 5.4.2.2) zu vermeiden. Daher wird das Austreiben des Lösungsmittels bei  $35^\circ\text{C}$  für mindestens 8 h durchgeführt. Der Photoresist dient als Galvanoform zur Herstellung der Verbindungsbrücke zwischen zwei Nanodrahtarrays. Die Brücke wird anschließend durch galvanische Abscheidung eines Metalls erzeugt. In dieser Arbeit wurde Nickel als Material für die Verbindungsbrücke verwendet. Abbildung 5.32 verdeutlicht den Herstellungsprozess für die Verbindungsbrücke, Tabelle 5.14 listet die Prozessparameter für die Herstellung der Verbindungs-



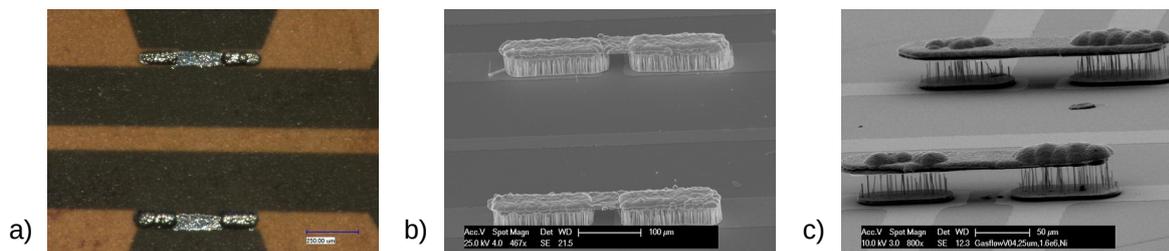
**Abbildung 5.32:** Prozessablauf zur Herstellung der Verbindungsbrücken zwischen zwei Nanodrahtarrays; a) Der Prozess geht von leicht überwachsenen Nanodrahtarrays aus, b) Aufspalten einer Metallschicht auf die Oberseite des Templates, Aufbringen und Strukturieren von Photoresist auf die Metallschicht, c) galvanisches Abscheiden der Verbindungsbrücke, d) Entfernen des Resistes und der nicht bedeckten Startschicht, e) Entfernen des Templates und der Adhäsionsschicht

brücken auf. Abbildung 5.33 zeigt Beispiele für Verbindungsbrücken aus galvanisch abgeschiedenem Nickel zwischen je zwei Nanodrahtarrays.

**Tabelle 5.14:** Prozessablauf und -parameter zur Herstellung von Verbindungsbrücken auf dem Templat

Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Aufspalten einer Metallschicht auf der Oberseite des gefüllten Templates	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 100 nm Kupfer auf die Oberseite des Templates sputtern</li> </ul>
Photolithographie mit Photoresist AZ9260	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 8 s bei <math>500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, 50 s bei <math>3500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, Sollschichtdicke <math>\approx 8 \mu\text{m}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, min. 8 h bei <math>35^\circ\text{C}</math></li> <li>• Belichten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>680 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwicklung: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 400 K (verdünnt mit Wasser, 1:3)</li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> </ul>
Galvanisches Erzeugen der Verbindungsbrücke	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Elektrolyt nach Tabelle 5.12</li> <li>• Parameterwahl beliebig nach Tabelle 5.12, Anpassen der Abscheidendauer</li> </ul>

Strippen des Photoresistes und Entfernen der Startschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strippen mit AZ100 Remover</li> <li>• Spülen mit DI Wasser</li> <li>• Ätzen der Kupferschicht mit Natriumpersulfat (<math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math>), Ätzrate: ca. 1 <math>\mu\text{m}/\text{min}</math></li> <li>• Spülen mit DI-Wasser</li> </ul>
Entfernen des Templates und der Adhäsionsschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernen des Templates mit Sauerstoffplasma oder Dichlormethan (vgl. Abschnitt)</li> <li>• Entfernen der Adhäsionsschicht mit Aceton und anschließend Spülen mit Isopropanol</li> </ul>



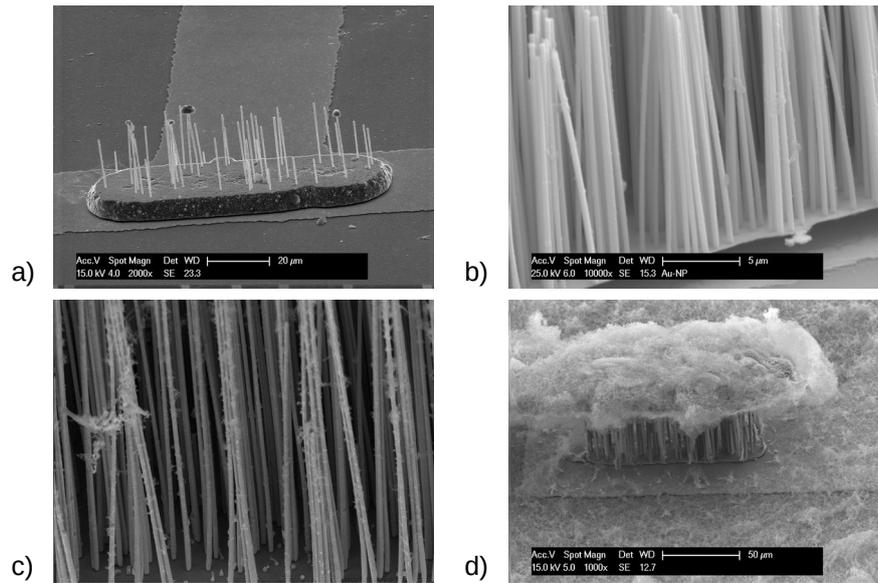
**Abbildung 5.33:** Beispiele für Verbindungsbrücken zwischen zwei Nanodrahtarrays; a) Verbindungsbrücke nach Entfernen des Photoresistes und der Startschicht auf dem Templat, b) jeweils zwei verbundene Arrays mit hoher Drahtdichte, c) jeweils zwei verbundene Arrays mit sehr niedriger Drahtdichte

## 5.7 Entfernen des Templates

Nach dem Erzeugen der Drähte müssen diese freigestellt werden. Dazu wird das Templat entfernt. Die in dieser Arbeit verwendeten Template sind durchgängig aus Polycarbonat. Grundsätzlich sind zwei unterschiedliche Verfahren üblich. Der einfachste Weg ist die Verwendung eines organischen Lösungsmittels zum Auflösen des Polycarbonattemplates. Hierfür wird üblicherweise Dichlormethan ( $\text{CH}_2\text{Cl}_2$ ) [82] verwendet. Damit lässt sich das Polycarbonattemplat rückstandsfrei entfernen (vgl. Abbildung 5.34 a)). Bei sehr hohen Drahtdichten neigen die Drähte jedoch dazu, an der Oberseite zusammenzukleben (sog. *Sticking*) (vgl. Abbildung 5.34b)). Das liegt an der Oberflächenspannung der eingesetzten Lösungsmittel.

Eine Alternative stellt hier die Entfernung des Templates mittels Sauerstoffplasma dar. Hierfür wird die Remote-Plasma-Anlage STP2020 der Fa. R3T muegge benutzt. Die Prozessparameter sind in Tabelle 5.15 dargestellt. Der Prozess besteht aus dem eigentlichen Ätzprozess, bei dem zusätzlich zum Sauerstoff noch Tetrafluormethan  $\text{CF}_4$  als Ätzgas beigemischt wird, um die Ätzrate zu erhöhen. Anschließend folgt ein Spülschritt, um Fluorrückstände zu entfernen. Wird die  $\text{CF}_4$ -Konzentration zu hoch gewählt, kommt es zu Rückständen aus fluoriniertem Kunststoff, die sich nicht mehr entfernen lassen (siehe Abbildung 5.34).

Auf Grund des geringeren Aufwandes und der guten Ergebnisse wird die nasschemische Entfernung des Templates in dieser Arbeit bevorzugt. Dem kommt zu Gute, dass für die Strömungssensorik niedrige Drahtdichten interessant sind, die ohnehin ein geringes Risiko zum *Sticking* aufweisen. Daneben wird durch die obere Deckschicht, die durch die Verbindungsbrücke zwischen zwei Nanodrahtarrays entsteht, die *Sticking*-Neigung weiter verringert.



**Abbildung 5.34:** Drahtarrays nach der Entfernung des Templates; a) Drahtarray mit niedriger Drahtdichte, Templat entfernt mit Dichlormethan b) Drahtarray mit hoher Drahtdichte, Templat entfernt mit Dichlormethan. Durch Sticking kleben die oberen Drahtenden zusammen, c) mit Sauerstoffplasma freigestelltes Drahtarray. Zu erkennen sind die Reste vom Plasmaätzen, d) mit Sauerstoffplasma freigestelltes Array. Der CF<sub>4</sub>-Anteil bei der Ätzung war zu hoch eingestellt, die wollartigen Reste aus fluoriniertem Kunststoff lassen sich nicht mehr entfernen

**Tabelle 5.15:** Prozessablauf und -parameter zur Entfernung des Templates. Das Templat kann entweder mit Dichlormethan nasschemisch entfernt zu werden, oder mit Hilfe von Sauerstoffplasma trockenchemisch

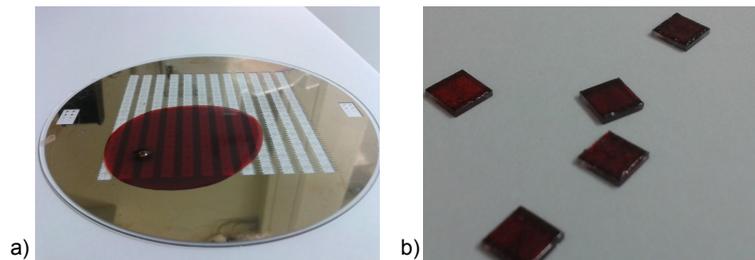
Schritt	Prozessteilschritte und -parameter
Entfernen des Templates mit Dichlormethan	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wafer-Templatverbund ca. 30 min in Dichlormethan (CH<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>) einlegen</li> <li>• Wafer für einige in Aceton (C<sub>3</sub>H<sub>6</sub>O) tauchen. Dieser Schritt dient hauptsächlich der Entfernung der Adäsionsschicht, besonders wenn ein Positiv-Photoresist verwendet wurde</li> <li>• Wafer vorsichtig mit Isopropanol spülen</li> <li>• Wafer trocknen lassen</li> </ul>
Entfernen des Templates mit Sauerstoffplasma in muegge R3T STP 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 1 h @ 800-1000 W, 1000 sccm O<sub>2</sub>, 50 sccm CF<sub>4</sub>, 50 sccm N<sub>2</sub>, Temperatur: Raumtemperatur, Druck: 450 mTorr</li> <li>• Anschließendes Spülen zur Fluorentfernung: 600 s, 800-1000 W, 1000 sccm O<sub>2</sub>, Temperatur: Raumtemperatur, Druck: 450 mTorr</li> <li>• Anschließendes Spülen mit Isopropanol</li> </ul>

---

## 5.8 Vereinzeln der Chips

---

Damit die Nanodrahtarrays später in Sensorelementen verwendet werden können, sind Chips aus dem Wafer zu vereinzeln. Dazu sägt man mittels einer Wafersäge Chips aus dem 4“-Wafer aus. Da beim Sägen das Sägeblatt mit Wasser gekühlt wird, besteht jedoch die Gefahr, des Wegspülens der Nanodrahtarrays. Daher ist es notwendig die Arrays vor dem Sägevorgang zu schützen. Das Belassen der Drähte im Templat hat sich als zu unzuverlässig erwiesen, da sich beim Sägen das Templat mit den Drähten gelöst hat. Das Eingießen der Arrays mit dem Photolack ma-P 1215 hat sich als zuverlässiger Prozess zum Schutz der Drähte herausgestellt. Nach dem Sägevorgang wird der Lack mit Aceton und Isopropanol bzw. Sauerstoffplasma (je nach Sticking-Neigung) entfernt.



**Abbildung 5.35:** a) Wafer zum Sägen vorbereitet. Der Bereich, in dem die Nanodrähte erzeugt wurden, ist mit ma-P 1215 versiegelt, b) gesägte Chips: die ma-P 1215-Schicht hat den Sägeschritt unbeschadet überstanden und die Nanodrähte wurden während des Sägevorgangs nicht beschädigt

---

## 5.9 Alternativer Prozess zur Herstellung von Nanodrähten für die Gasflusssensorik

---

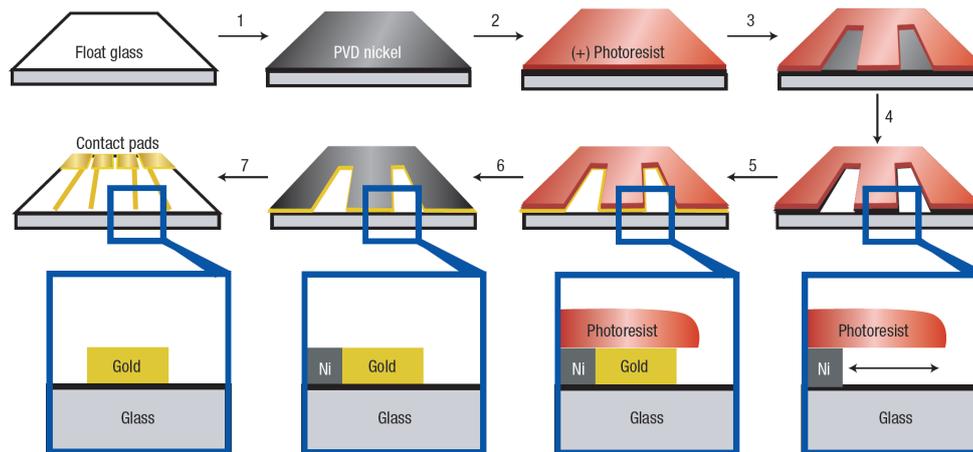
Der Nachteil des Ionenspurätzverfahrens sind die senkrechte Ausrichtung der Drähte auf dem Wafer sowie die begrenzte Länge der Drähte, die derzeit auf maximal  $100\ \mu\text{m}$  begrenzt ist. In Abschnitt 4.2 wurde jedoch gezeigt, dass Drähte mit einer Länge  $< 100\ \mu\text{m}$  zwar eine sehr niedrige Zeitkonstante besitzen, aber gleichzeitig auch eine sehr niedrige Sensitivität des Sensorelementes zu erwarten ist. Daher wurde im Verlauf der Arbeit ein alternatives Verfahren entwickelt, um nicht nur das Problem der Mikro-Nano-Integration zu lösen sondern auch ein geeignetes Verfahren zu entwickeln, mit dem Strömungssensoren mit sehr dünnen und ausreichend langen Drähten hergestellt werden können.

---

### 5.9.1 Prozess der Ätzkantengalvanik

---

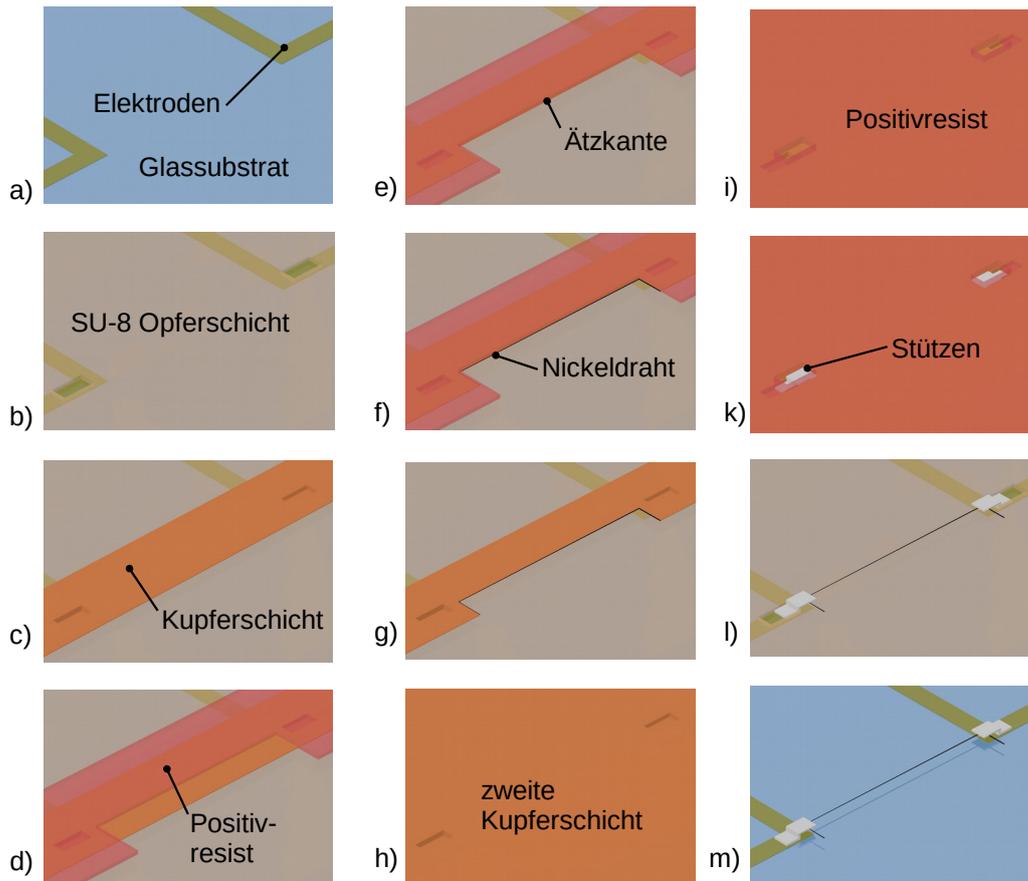
Erstmals durchgeführt wurde die Ätzkantengalvanik in [83]. Hierbei handelt es sich ebenfalls um ein Verfahren, welches ohne Top-Down-Ansätze wie Röntgen- oder Elektronenstrahlolithographie auskommt. Hierbei wird eine Elektrode strukturiert und gezielt unterätzt, so dass ein horizontaler „Graben“ entsteht, der dann galvanisch gefüllt wird. Den Prozessfluss aus [83] zeigt Abbildung 5.36. Im ersten Schritt wird eine Nickelschicht auf einem Wafer aufgedampft. Dann wird Photolack aufgebracht und strukturiert. Im nächsten Schritt wird die Struktur durch Ätzen auf die Nickelschicht übertragen. Dabei wird diese leicht unterätzt. Es entstehen horizontale „Gräben“, die im nächsten Schritt galvanisch mit Gold gefüllt werden. Nach dem Entfernen des Lackes und der Nickelschicht bleiben Gold-Nanodrähte auf dem Substrat übrig. Bei diesem Prozess ist es ohne weiteres nicht möglich, frei schwebende Nanodrähte zu erzeugen. Des Weiteren sind zusätzliche Anpassungen nötig, um Drähte zu erzeugen, die keine geschlossenen Konturen aufweisen.



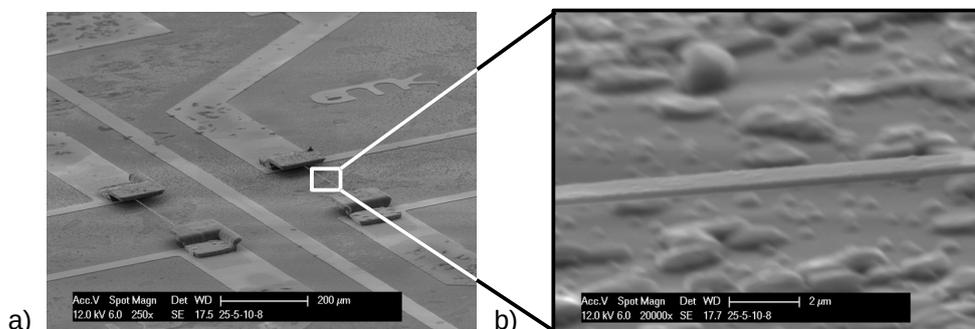
**Abbildung 5.36:** Prozessablauf für die Herstellung von Nanodrähten mit der Ätzkantengalvanik [83]. Durch gezieltes Unterätzen einer Nickelschicht werden horizontale Gräben für die Abscheidung der Gold-Nanodrähte erzeugt. Nach Entfernen des Photolacks und der Nickelschicht bleiben auf dem Substrat Gold-Nanodrähte zurück.

Dieser Prozess scheint prädestiniert, horizontale Nanodrähte zu erzeugen. Durch Anpassung ist es möglich, die Drähte auf einer Opferschicht zu erzeugen und anschließend freizustellen. Daher wurde der Prozess auf einer SU-8 Opferschicht durchgeführt, die nach der Nanodrahterzeugung entfernt wird. Zusätzlich müssen dann Stützen erzeugt werden, die die Drähte nach Entfernung der Opferschicht halten. Als Drahtmaterial wird in diesem Fall Nickel verwendet, wie auch bei dem Prozess mit ionenspurgeätzten Templaten. Daher wird als Startschicht in diesem Fall Kupfer benutzt. Den angepassten Prozessfluss zeigt Abbildung 5.37.

Im ersten Schritt werden Leiterbahnen und Elektroden auf einem Glassubstrat strukturiert (Abbildung 5.37 a). Dann wird die Opferschicht aus SU-8 auf dem Wafer aufgebracht (Abbildung 5.37 b)). In diese Schicht werden Öffnungen erzeugt, die später zur Herstellung der Stützen benötigt werden. Anschließend wird eine Kupferschicht auf SU-8 Opferschicht aufgesputtert. Auf diese wird wieder ein Photoresist aufgebracht und die Kupferschicht strukturiert um Inseln aus Kupfer zu erzeugen (Abbildung 5.37 c)). Dieser Schritt ist notwendig damit Drähte abgeschieden werden können, die keine geschlossenen Konturen aufweisen. Anschließend wird erneut ein Photoresist aufgebracht (Abbildung 5.37 d)) und die Kupferschicht geätzt (Abbildung 5.37 e)). Dabei entsteht eine Ätzkante an der die Nickeldrähte abgeschieden werden. Dabei ist darauf zu achten, dass nur an einer Seite eine Ätzkante erzeugt wird. Dies wird dadurch erreicht, dass der Photoresist die Kanten der „Kupferinsel“ überdeckt, an denen keine Drähte erzeugt werden sollen. Im nächsten Schritt werden die Drähte galvanisch an der frei liegenden Ätzkante abgeschieden (Abbildung 5.37 f)). Bei der Abscheidung der Nanodrähte kommt die gleiche Anlage und die gleichen Parameter wie in Abschnitt 5.5) zum Einsatz. Danach wird der Photolack wieder entfernt (Abbildung 5.37 g)). Zur späteren Erzeugung der Stützen wird eine weitere Kupferschicht aufgesputtert (Abbildung 5.37 h)). Darauf wird eine Schicht Photoresist aufgebracht und strukturiert, die anschließend als Galvanoform zur Erzeugung der Stützen dient (Abbildung 5.37 i)). Die Stützen werden mittels galvanischer Abscheidung von Nickel erzeugt (Abbildung 5.37 k)). Im nächsten Schritt werden die Kupfer- und Photolackschichten entfernt (Abbildung 5.37 l)). Der letzte Schritt ist die Entfernung der Opferschicht, um die Drähte freizustellen (Abbildung 5.37 m)). Tabelle 5.16 zeigt die nötigen Prozessschritte und Parameter im Detail.



**Abbildung 5.37:** Prozessfluss bei der Ätzkantengalvanik; a) Strukturieren von Leiterbahnen und Elektroden des Glassubstrates, b) Aufbringen und Strukturieren einer SU-8 Opferschicht, c) Aufbringen und Strukturieren einer Kupferschicht, d) Aufbringen und Strukturieren eines Photoresist, e) Ätzen der Kupferschicht zur Erzeugung der Ätzkante, f) Abscheiden des Nickeldrahtes an der Ätzkante, g) Entfernen des Photoresistes, h) Aufbringen einer zweiten Kupferschicht zur Erzeugung der Stützen, i) Aufbringen und Strukturieren von Photoresist zur Erzeugung der Stützen, k) Erzeugen der Stützen durch galvanisches Abscheiden von Nickel, l) Entfernen der Kupferschichten und Photoresisten, m) Entfernen der Opferschicht zum Freistellen der Opferschicht



**Abbildung 5.38:** REM-Aufnahmen der mittels Ätzkantengalvanik erzeugten freischwebenden Drähte zur Verwendung in einem Strömungssensor, a) Drähte sowie Aufhängungen und Heizelement, b) Nahaufnahmen der Drähte.

**Tabelle 5.16:** Prozessablauf und -parameter zur Herstellung von Nanodrähten mit der Ätzkantengalvanik

Schritt	Prozessschritte und -parameter
Strukturieren der Leiterbahnen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Strukturierung gemäß Tabelle 5.1 in Abschnitt 5.4.1</li> </ul>
Aufbringen und Strukturieren der SU-8 Opferschicht	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes SU-8: 8 s bei <math>500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, 50 s bei <math>4000 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, Sollsichtdicke <math>\approx 25 \mu\text{m}</math></li> <li>• Softbake: auf einer Hotplate, min. 10 min bei <math>100^\circ\text{C}</math></li> <li>• Belichten:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>350 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: i-Linie</li> </ul> </li> <li>• Post-Exposure-Bake (PEB): 1 min @ <math>65^\circ\text{C}</math>, 6 min @ <math>100^\circ\text{C}</math></li> <li>• Entwickeln: 5 min Tauchentwicklung in PGMEA<sup>1</sup></li> <li>• Spülen mit Isopropanol</li> <li>• Hardbake: 30 min @ <math>200^\circ\text{C}</math>, dabei verschließen sich alle entstandenen Risse</li> </ul>
Aufbringen und Strukturieren der „Kupferinseln“	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufputtern einer Kupferschicht (100-500 nm). Die Dicke der Kupferschicht gibt die Dicke der späteren Nanodrähte an</li> <li>• Aufschleudern des Photoresistes ma-P 1215: 30 s bei <math>1500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math></li> <li>• Softbake auf einer Hotplate: 2 min bei <math>100^\circ\text{C}</math></li> <li>• Belichten:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>55 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler ma-D 331 (micro resist technology GmbH, Berlin)</li> <li>• Reinigen: Spülen mit DI-Wasser</li> <li>• Ätzen der Kupferschicht mit Natriumpersulfat <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math></li> <li>• Strippen des Photoresistes mit Aceton und Isopropanol, Trocknen des Wafers</li> </ul>
Erzeugen der Ätzkanten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 8 s bei <math>500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, 50 s bei <math>3500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, Sollsichtdicke <math>\approx 8 \mu\text{m}</math></li> <li>• Softbake auf einer Hotplate: min. 8 h bei <math>35^\circ\text{C}</math></li> <li>• Belichten:             <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>680 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwickeln: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 400 K (verdünnt mit Wasser, 1:3)</li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> <li>• Ätzen der Kupferschicht zur Erzeugung der Ätzkanten mit Natriumpersulfat <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math></li> <li>• Spülen des Wafers mit DI-Wasser, Wafer nass lassen (Prozessierung Nass-in-Nass)</li> </ul>

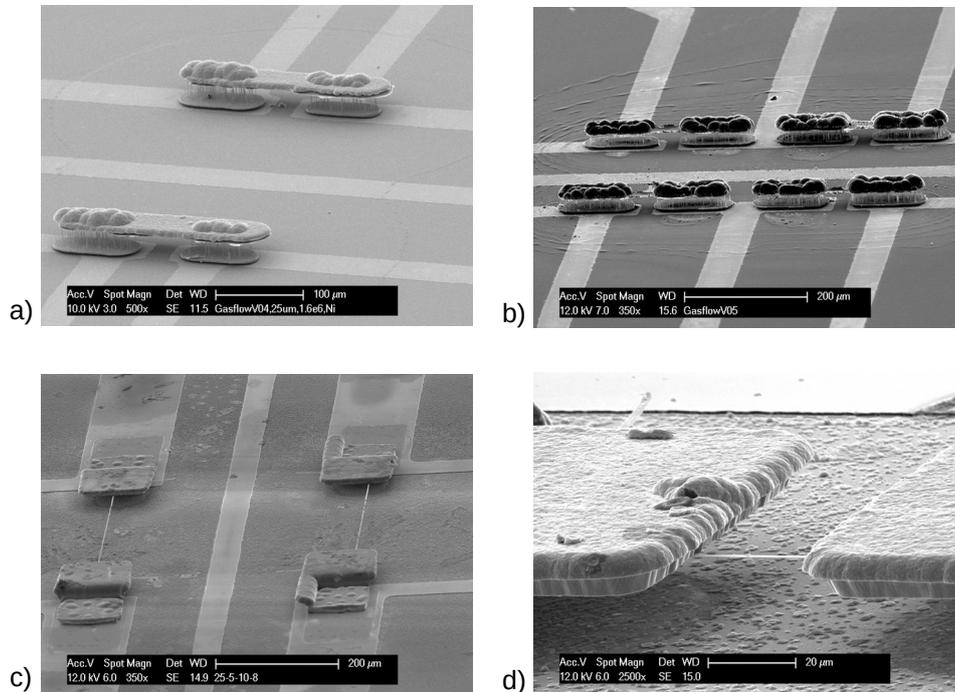
Abscheiden der Nickeldrähte	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aktivieren und Benetzen mit 50 % Essigsäure (<math>\text{CH}_3\text{COOH}</math>), ca. 30 s</li> <li>• Abscheiden der Nickeldrähte nach Tabelle 5.12 in Abschnitt 5.5</li> <li>• Entfernen des Photoreistes AZ9260 aus vorherigem Prozessschritt mit Aceton und Isopropanol</li> </ul>
Aufbringen einer zusätzlichen Kupferschicht und Erzeugen der Stützen	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aufspüttern einer 200 nm dicken zweiten Kupferschicht</li> <li>• Aufschleudern des Photoresistes: 8 s bei <math>500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, 50 s bei <math>3500 \frac{\text{U}}{\text{min}}</math>, Sollschichtdicke <math>\approx 8 \mu\text{m}</math></li> <li>• Softbake auf einer Hotplate: min. 8 h bei <math>35^\circ\text{C}</math></li> <li>• Belichten: <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dosis: <math>680 \frac{\text{mJ}}{\text{cm}^2}</math></li> <li>• Kantenfilter: ghi-Linie</li> </ul> </li> <li>• Entwicklung: 2 min Tauchentwicklung mit Entwickler AZ 400 K (verdünnt mit Wasser, 1:3)</li> <li>• Reinigen mit DI-Wasser</li> <li>• Galvanisches Aufwachsen der Stützen (Nickel) in den Öffnungen, Parameter nach Tabelle 5.12 in Abschnitt 5.5</li> <li>• Entfernen des Photoreistes AZ9260 aus vorherigem Prozessschritt mit Aceton und Isopropanol</li> </ul>
Entfernen der Kupferschichten	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Entfernen der Kupferschichten mit Natriumper-sulfat <math>\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8</math>, Nickel wird nicht angegriffen</li> <li>• Spülen mit DI-Wasser und Trocknen</li> </ul>
Entfernen der SU-8 Opferschicht in muegge R3T STP 2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2 h @ 800-1000 W, 1000 sccm <math>\text{O}_2</math>, 50 sccm <math>\text{CF}_4</math>, 50 sccm <math>\text{N}_2</math>, Temperatur: Raumtemperatur, Druck: 450 mTorr</li> <li>• Anschließendes Spülen zur Fluorentfernung: 600 s, 800-1000 W, 1000 sccm <math>\text{O}_2</math>, Temperatur: Raumtemperatur, Druck: 450 mTorr</li> <li>• Anschließendes Spülen mit Isopropanol</li> </ul>

Der zentrale Prozessschritt ist die Erzeugung des Nickeldrahtes in der Unterätzung (Prozessschritt f) in Abbildung 5.37). Die Form der Unterätzung gibt dabei eine rechteckige Form des Drahtes vor. Dabei wird über die Dicke der vorher aufgesputterten Kupferschicht die Dicke des Drahtes vorgegeben. Über die Abscheidendauer wird dann die Breite des Drahtes eingestellt. Durch Einstellen der Ätzparameter des Kupfers (Prozessschritt e) in Abbildung 5.37) wird die Tiefe der Unterätzung eingestellt.

## 5.9.2 Fazit

Die mit diesem Prozess erzeugten Drähte sind deutlich besser geeignet zum Einsatz in der Strömungssensorik, als die im Ionensputzverfahren hergestellten Nanodrähte. Das liegt zum Einen daran, dass die Drähte prinzipiell beliebig lang prozessierbar sind. Damit lässt sich sehr gut ein gewünschter Wert für den Drahtwiderstand auslegen, der mit einer geeigneten Elektronik auswertbar ist. Der andere Grund

ist, dass die Drähte im Prinzip beliebig hoch über dem Substrat aufgehängt werden können. Dazu muss nur die Dicke der Opferschicht angepasst werden. Das Prinzip der Ätzkantengalvanik wurde in dieser Arbeit nur mit Nickel demonstriert, die Arbeiten in [83] legen jedoch nahe, dass auch Gold oder andere Edelmetalle für die Erzeugung der Drähte einsetzbar ist.



**Abbildung 5.39:** Vergleich der Drähte, die in dieser Arbeit in der Strömungssensorik eingesetzt werden, a) und b) Nanodrähte, die mit dem Ionenspurätzverfahren erzeugt wurden: Drahtlänge: 25 µm, Drahtdurchmesser: 400 nm, Drahtdicke:  $6 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , c) und d) mit Hilfe des Ätzkantengalvanikverfahrens hergestellte Messdrähte, Drahtdicke 200 nm, Drahtbreite 2 µm, Drahtlänge 250 µm (c) bzw. 20 µm (d))

Dennoch weisen die Nanodrähte aus dem Ionenspurätzverfahren ein hohes Potential in der Mikrosystemtechnik auf, insbesondere für biologische und chemische Sensoren. Auch Arbeiten im Bereich der Feldemissionssysteme zeigen vielversprechende Ansätze für den Einsatz von Nanodrähten. Der entwickelte Prozess wurde in [84–87] veröffentlicht



---

## 6 Konzipierung und Auslegung von Strömungssensoren mit galvanisch erzeugten Drähten

---

Im vorherigen Abschnitt wurden die Prozesse zur galvanischen Erzeugung sehr dünner Drähte vorgestellt. Im Folgenden wird dargelegt, wie die Herstellungsprozesse einsetzbar sind, um kalorimetrische Strömungssensoren mit galvanisch erzeugten Drähten herzustellen. Dabei werden zunächst Konzepte mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren und anschließend mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanik-Verfahren vorgestellt. Es werden je zwei Generationen von Sensoren konzipiert, die später zu charakterisieren sind. Die erste Generation dient dazu, die grundsätzlichen Eigenschaften der Sensorelemente zu messen. Dabei liegt das Augenmerk auf der Prozessentwicklung: die konzipierten Sensorelemente benötigen wenig Chipfläche, was auch bei einer niedrigen Prozessausbeute eine ausreichende Anzahl an charakterisierbaren Sensorelementen garantiert. Der Strömungskanal wird an den Chip angepasst. In der zweiten Generation wird mehr Wert auf einen optimierten Strömungskanal gelegt. Vor allem die Messung oszillierender Strömungen, in Anlehnung an den Einsatz in einer photoakustischen Messzelle, ist ein Kriterium. Auch das Kontaktierverfahren wird überarbeitet und verbessert. In der zweiten Generation verhält es sich so, dass die Form der Chips dem optimalen Strömungskanal angepasst wird, die Prozessausbeute ist dann hoch genug, um die größere Chipfläche zu kompensieren. Die Realisierung der in diesem Kapitel konzipierten Sensorelemente mitsamt den ausgelegten Strömungskanälen wird in Kapitel 7 dargestellt.

---

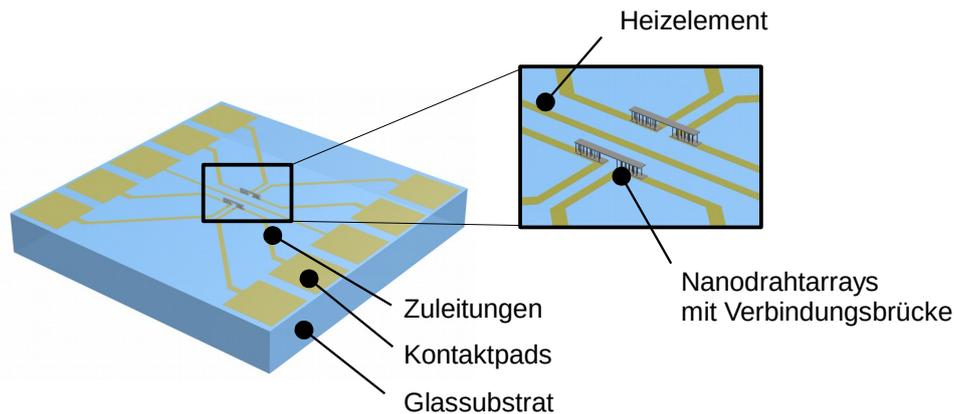
### 6.1 Konzept für einen Strömungssensor mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren

---

Das Ionenspurätzverfahren ermöglicht die Herstellung von Drähten, die senkrecht auf einem Substrat stehen. Dabei können die Drähte nicht einzeln hergestellt werden, sondern sind in sog. Drahtarrays organisiert (vgl. Abschnitt 5). Durch die Herstellung von Brückenstrukturen können die Drähte auf der Oberseite kontaktiert werden, wobei immer zwei Drahtarrays in Reihe geschaltet sind (vgl. Abschnitt 5.6). Eine solche Reihenschaltung aus zwei Drahtarrays wird im Folgenden als *Kaskade* bezeichnet. Eine solche Kaskade bildet ein Temperaturmesselement des Strömungssensors. Je ein solches Temperaturmesselement wird vor (Upstream) und hinter (Downstream) dem Heizelement angebracht. Abbildung 6.1 zeigt das Konzept für einen Strömungssensor mit Messelementen aus Nanodrähten, die im Ionenspurätzverfahren hergestellt wurden.

Das Heizelement ist in diesem Konzept als Dünnschichtheizelement ausgeführt und direkt bei der Strukturierung der Kontaktpads und Startelektroden (vgl. Abschnitt 5.4.1) mit strukturiert. Als Substrat kommt ein Glaswafer (Borofloat 33, Dicke: 0,7 mm) zum Einsatz. Dieser gewährleistet eine gute elektrische Isolierung und des weiteren eine vergleichsweise niedrige Wärmeleitung, verglichen mit Siliziumsubstraten.

Die Array-Kaskaden sind mit jeweils vier Leiterbahnen mit den Kontaktpads verbunden, so dass mittels 4-Punkt-Messmethode der Widerstand der einzelnen Kaskaden erfassbar ist. Das ist notwendig, da die Drahtarrays fertigungsbedingte Widerstandsschwankungen aufweisen, die mit einer Messbrücke nicht ohne weiteres kompensiert werden können. Zudem weisen die Zuleitungen einen deutlich höheren Widerstand als die Drahtarrays auf. Die Kontaktpads sind, ebenso wie die Startelektroden für die Drähte, vergoldet, damit die elektrische Kontaktierung des Sensorelementes gut durchgeführt werden kann. Die Goldbeschichtung ermöglicht die Verwendung von Drahtbond- als auch Lötverbindungen. Nach der Prozessierung der Sensoren werden die Sensorelemente aus dem Wafer gesägt. Die Kantenlänge der Chips beträgt 5 mm x 5 mm.



**Abbildung 6.1:** Konzept für den Gasflusssensor mit Arrays aus Nanodrähten, die mit dem Ionenspurätzverfahren hergestellt wurden. Je zwei in Reihe geschaltete Drahtarrays sind in Reihe geschaltet und dienen als resistive Temperaturelemente.

### 6.1.1 Layout des Strömungssensors

Beim Ionenspurätzverfahren handelt es sich um ein templatbasiertes Verfahren, das heißt die verwendeten Folien geben die Eigenschaften der Drahtarrays vor. Für die Herstellung der Strömungssensoren werden hier Folien der Fa. it4ip verwendet (vgl. Tabelle 5.6) mit einem Porendurchmesser von 400 nm und einer Porendichte von  $1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ . Das entspricht einem mittleren Abstand der damit herstellbaren Drähte von etwa 10  $\mu\text{m}$ . Die Dicke der Templatfolie beträgt 25  $\mu\text{m}$ , was die Länge der Drähte vorgibt. Die Arrays wurden auf Startelektroden aus Gold synthetisiert und weisen eine Grundfläche von  $30 \times 100 \mu\text{m}^2$  (vgl. Abbildung 6.2) auf. Bei einer Drahtdichte von  $1 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$  ergibt sich, dass ein Array aus etwa 30 einzelnen Drähten besteht. Mit einem Drahtdurchmesser von 400 nm und einer Drahtlänge von 25  $\mu\text{m}$  ergibt sich bei einem spezifischen Widerstand von Nickel ( $\rho_{\text{El}} = 7 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$ ) ein elektrischer Widerstand von 13,74  $\Omega$  bei Raumtemperatur. Durch die Parallelschaltung von 30 Drähten ergibt sich dann ein Widerstand von 0,46  $\Omega$  pro Drahtarray. Abbildung 6.2 zeigt einen Ausschnitt des Layouts des konzipierten Sensors. Die Arrays sind jeweils 200  $\mu\text{m}$  vor und hinter dem Dünnschicht-Heizelement platziert. Dieser Abstand ergibt sich aus der Chip- und Kanengeometrie und wird in einer Siration (Abschnitt 6.4.2 dargestellt). Das Heizelement selbst hat eine Breite von 50  $\mu\text{m}$ .

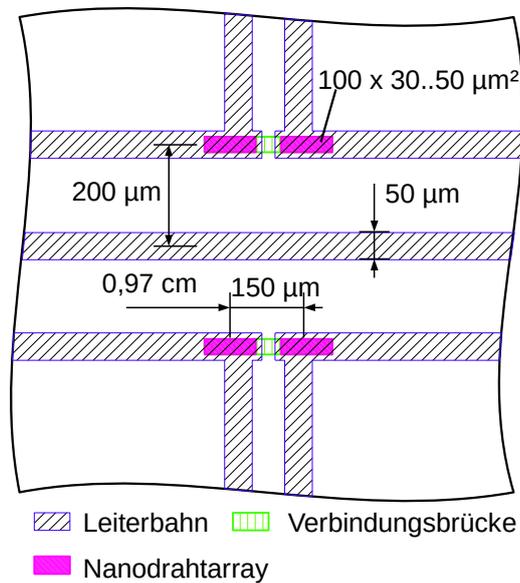
#### Reihenschaltung von mehr als zwei Drahtarrays

Zunächst werden immer nur zwei Drahtarrays in Reihe geschaltet. Um den Messeffekt zu erhöhen ist es jedoch möglich, mehr als zwei Arrays in Reihe zu schalten. Das hat zur Folge dass der Widerstand für die Temperaturelemente steigt und damit leichter zu messen ist. Gleichzeitig steigt jedoch die Fehleranfälligkeit des Herstellungsprozesses, da alle Drahtarrays auf dem Sensor vollständig gewachsen und elektrisch kontaktiert sein müssen. In der Arbeit wurden auch Sensoren mit vier in Reihe geschalteten Drahtarrays untersucht und charakterisiert.

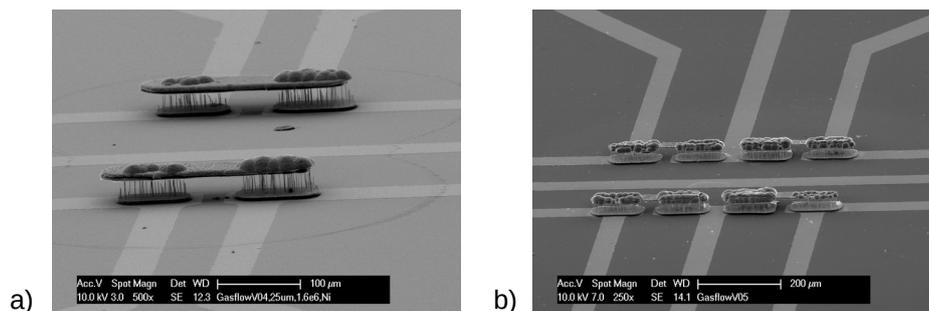
Abbildung 6.3 zeigt die realisierten Sensorelemente als Rasterelektronenmikroskopaufnahme. Dabei wurden entweder je zwei Drahtarrays pro Temperaturelement oder je vier Drahtarrays je Temperaturelement in Reihe geschaltet.

#### Zusammenfassung der Eigenschaften des konzipierten Sensors

Tabelle 6.1 fasst nochmal die Eigenschaften der konzipierten Sensoren zusammen. Diese Sensoren werden im weiteren Verlauf der Arbeit realisiert und charakterisiert.



**Abbildung 6.2:** Layout des konzipierten Strömungssensors mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren



**Abbildung 6.3:** Konzept des Strömungssensors aus Submikrodrähten, die mit dem Ionenspurätzverfahren hergestellt wurden; a) Je zwei kaskadierte Arrays bilden das Upstream- bzw. Downstreammesselement, b) Je 4 Drahtarrays bilden ein Temperaturmesselement. Zu erkennen sind auch die Leiterbahnen die der elektrischen Kontaktierung der Drahtarrays dienen. Bei den vier Arrays ist eine zusätzliche Leiterbahn vorhanden, die nur zur Kontaktierung bei der Abscheidung der Drähte dient. Beim Sägen der Chips wird die Leiterbahn aufgetrennt.

**Tabelle 6.1:** Material- und geometrische Kennwerte des konzipierten Strömungssensors aus Drähten nach dem Ionenspurätzverfahren

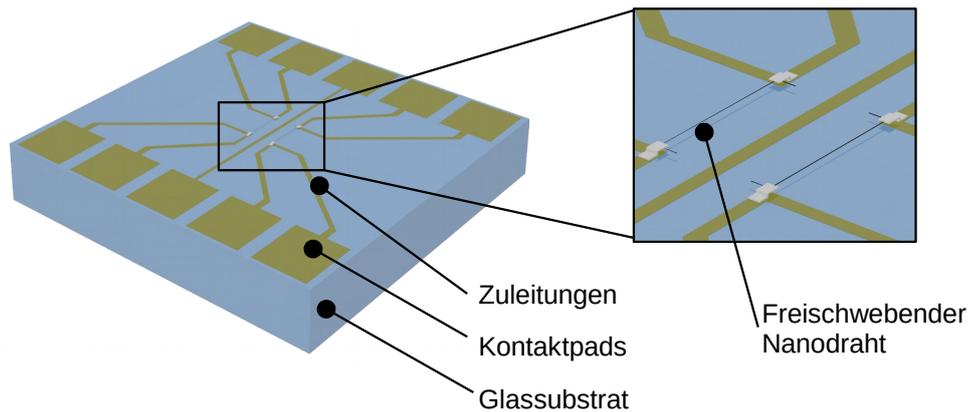
Größe	Einheit	Wert
Schichtdicke des Schichtverbundes für die Leiterbahnen	nm	20 (Cr), 170 (Ni), 50 (Au)
Breite des Heizelementes	$\mu\text{m}$	50
Außenmaße der Drahtarrays	$\mu\text{m}^2$	30..50 x 100
Material der Nanodrähte		Nickel
Verwendetes Templat (Fabrikat)		it4ip
Dicke	$\mu\text{m}$	25
Porendurchmesser	nm	400
Porendichte	$\frac{1}{\text{cm}^2}$	$10^6$
elektrischer Widerstand / Draht	$\Omega$	13,78
berechnete Anzahl von Drähten / Array		30..50
berechneter Widerstand / Array	$\Omega$	0,4596..0.276
Anzahl der Arrays pro Temperaturelement		2/4

## 6.2 Konzept für einen Strömungssensor mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren

Mit dem Ätzkantengalvanikverfahren (vgl. Kapitel 5.9) sind waagrecht über dem Substrat aufgehängte Drähte herstellbar. Werden diese vor und hinter einem Heizelement erzeugt, können auch mit diesem Verfahren kalorimetrische Strömungssensoren hergestellt werden. Sonst entspricht das Konzept im Wesentlichen dem Konzept für Strömungssensoren mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren. Da die Drahtlänge nicht, wie beim Ionenspurätzverfahren, von den Eigenschaften eines Templates abhängt, ist sie deutlich freier variierbar. In dieser Arbeit werden Drahtlängen zwischen 50 und 700  $\mu\text{m}$  hergestellt. Die Höhe, in welcher die Drähte über dem Substrat aufgespannt sind, ergibt sich aus der Dicke der Opferschicht. Während der Entwicklung des Prozesses wird diese auf 3  $\mu\text{m}$  festgelegt, um Prozesszeiten zu minimieren. Die Proben für die Charakterisierung erhalten eine Opferschicht mit einer Dicke von 25  $\mu\text{m}$ . Auf Grund des Verfahrens weisen die hergestellten Drähte keinen runden sondern einen rechteckigen Querschnitt auf. Die Dicke des Drahtes ergibt sich aus der Dicke der Drahtstartschicht. Die Breite ergibt sich aus der Dauer der galvanischen Abscheidung und wird auf ca. 2  $\mu\text{m}$  festgesetzt. Daraus ergibt sich ein elektrischer Widerstand von  $R_{\text{Draht}} = 8,6\Omega$  für eine Drahtlänge von 50  $\mu\text{m}$  bzw. von  $R_{\text{Draht}} = 121\Omega$  für eine Drahtlänge von 700  $\mu\text{m}$ . Die Drähte werden wie bei dem vorhergehenden Konzept als Temperaturelemente vor bzw. hinter dem Heizelement platziert. Die Leiterbahnen sind so ausgelegt, dass der elektrische Widerstand der Drähte mittels 4-Leiter-Verfahren messbar ist. Abbildung 6.4 zeigt das Konzept des Sensorelementes als 3D-CAD-Modell.

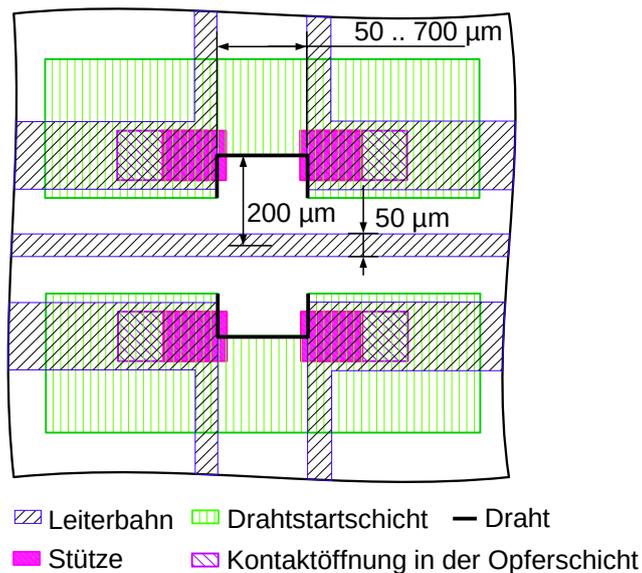
### 6.2.1 Layout des Strömungssensors

Abbildung 6.5 zeigt das konzipierte Layout (Lithographiemasken) des Sensorelementes. Es entspricht im Wesentlichen dem Layout für einen Strömungssensor mit Drahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren. Die Drahtarrays werden lediglich durch einzeln aufgespannte Drähte aus dem Ätzkantengalvanikverfahren ersetzt. So werden die Drähte ebenfalls 200  $\mu\text{m}$  vor und hinter dem 50  $\mu\text{m}$  dicken Heizelement platziert. Zu erkennen ist, dass jeder Draht mit vier Leiterbahnen kontaktiert wurde, um eine 4-Punkt-Messung des elektrischen Widerstands durchführen zu können. Das ist notwendig, da die Länge die



**Abbildung 6.4:** Konzept für den Gasflussensor mit frei aufgehängten Drähten, die mit dem Ätzkantengalvanikverfahren hergestellt wurden

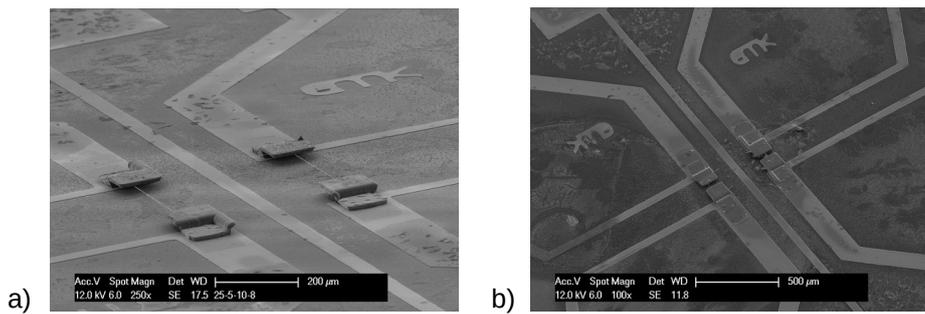
Leiterbahnen einen erheblichen Beitrag zum Gesamtwiderstand leisten und die Anteile daher kompensiert werden müssen. Nach der Prozessierung der Sensoren werden die Sensorelemente aus dem Wafer gesägt. Die Kantenlänge der Chips beträgt 5 mm x 5 mm.



**Abbildung 6.5:** Layout des konzipierten Strömungssensors mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren

**Zusammenfassung der Eigenschaften des konzipierten Sensors**

Tabelle 6.2 fasst nochmal die Eigenschaften der konzipierten Sensoren zusammen. Diese Sensoren werden im weiteren Verlauf der Arbeit realisiert und charakterisiert.



**Abbildung 6.6:** Konzept des Strömungssensors aus Drähten, die mit dem Ionensputätzverfahren hergestellt wurden; a) Drähte mit einer Länge von 250 µm, b) Drähte mit einer Länge von 50 µm

**Tabelle 6.2:** Material- und geometrische Kennwerte des konzipierten Strömungssensors aus Drähten nach dem Ätzkantengalvanikverfahren

Größe	Einheit	Wert
Schichtdicke des Schichtverbundes für die Leiterbahnen	nm	20 (Cr), 170 (Ni), 50 (Au)
Breite des Heizelementes	µm	50
Material der Nanodrähte		Nickel
Querschnitt der Drähte (Breite x Höhe)	µm <sup>2</sup>	2 x 0,2
Länge der Drähte	µm	50..700
geschätzter elektrischer Widerstand / Draht	Ω	8,6...121 Ω

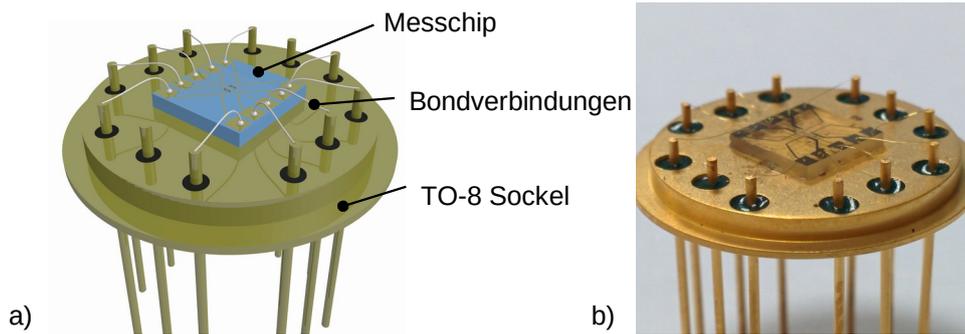
### 6.3 Elektrische Kontaktierung der Sensorelemente sowie Platzierung im Strömungskanal

Die prozessierten Sensorelemente aus beiden Fertigungsverfahren liegen als gesägte Chips mit einer Kantenlänge von 5 mm x 5 mm vor. Die Sensorelemente müssen elektrisch kontaktiert und in einen geeigneten Strömungskanal platziert werden.

Um die Sensorelemente elektrisch zu kontaktieren verfügen sie über zehn vergoldete Kontaktpads, je vier für die beiden Temperaturmesselemente und zwei für das Heizelement. Die Kontaktpads haben äußere Abmessungen von 0,8 mm x 0,8 mm. Zur elektrischen Kontaktierung werden die Sensorelemente zunächst auf einen TO-8 Sockel geklebt. Anschließend wird das Sensorelement elektrisch durch Drahtbonden mit dem Sockel verbunden. Dabei wird ein Ball-Wedge-Verfahren verwendet. Der „Ball“ wird auf den Sensorchip gesetzt, der „Wedge“ auf die Anschlusspins des Sockels.

Tabelle 6.3 zeigt die Parameter, die beim Drahtbonden verwendet wurden.

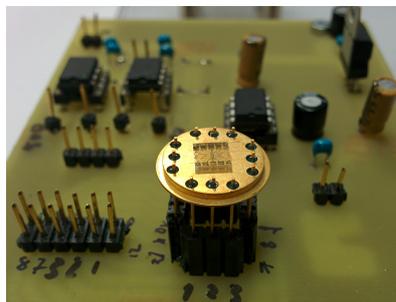
Der Sockel kann anschließend direkt auf eine Platine gesteckt, damit die Temperaturmesselemente (Submikrodrahtarrays und einzeln aufgespannte Drähte) elektrisch charakterisiert werden können. Abbildung 6.8 zeigt einen auf eine Platine mit geeigneter Auswerteelektronik gesteckten Sockel mit montierten und kontaktiertem Sensorelement.



**Abbildung 6.7:** Konzept des auf einen TO-8 Sockel platzierten Chip. Die elektrische Kontaktierung wurde mittels Ball-Wedge-Drahtbonden durchgeführt; a) zeigt das Konzept, b) die Realisierung des auf einem TO-8 Sockels montiertem und kontaktierten Chips.

**Tabelle 6.3:** Parameter zum Ball-Wedge Bonden des Sensors mit dem Bonder „Delvotec NFO 09“

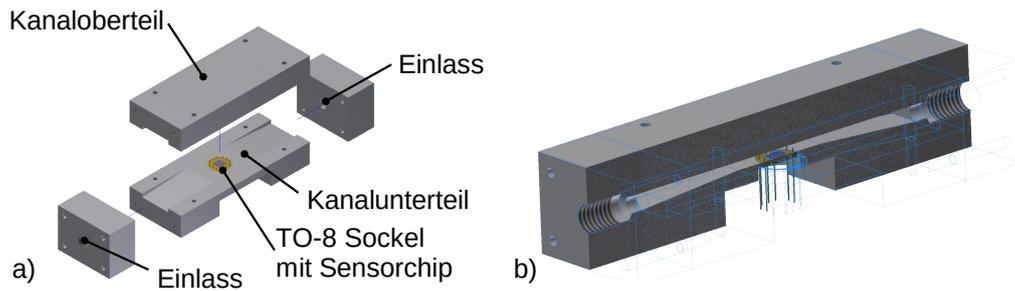
Größe	Wert
Draht	Gold, 25 $\mu\text{m}$ Durchmesser
Bondkraft (Ball / Wedge) / cN	86 / 305
Ultraschalleistung (Ball / Wedge) / willk. Einheit	240 / 250
Ultraschallzeit (Ball / Wedge) / ms	60 / 70



**Abbildung 6.8:** Sockel mit montiertem und kontaktiertem Sensorelement auf einer Platine, die die Messverstärker und Spannungsversorgung enthält. Die auf dem Sockel montierten Sensorelemente lassen sich gut hantieren und elektrisch kontaktieren.

## 6.4 Konzept für den Strömungskanal

Zur Charakterisierung der Sensorelemente muss das Sensorelement in einem Strömungskanal platziert werden. Das ist notwendig, um definierte Strömungsverhältnisse oberhalb des Sensorelementes herzustellen. Da sich die Kontaktierung des Sensorelementes auf dem TO-8 Sockel als zuverlässig erweist, wird der Strömungskanal so ausgelegt, dass der TO-8 Sockel direkt im Kanal platziert werden kann. Zudem verfügt der Kanal über einen Ein- und Auslass, der mittels handelsüblicher Anschlüsse an ein Druckluftsystem angeschlossen werden kann. Der Sockel wird so in den Kanal eingebaut, dass der Sensor senkrecht zur Strömungsrichtung ausgerichtet ist. Abbildung 6.9 a) zeigt das CAD Modell des konzipierten Kanals in der Explosionsansicht, Abbildung 6.9 b) zeigt die Schnittansicht. Die Höhe des Strömungskanals über dem Sensorelement beträgt 2 mm.

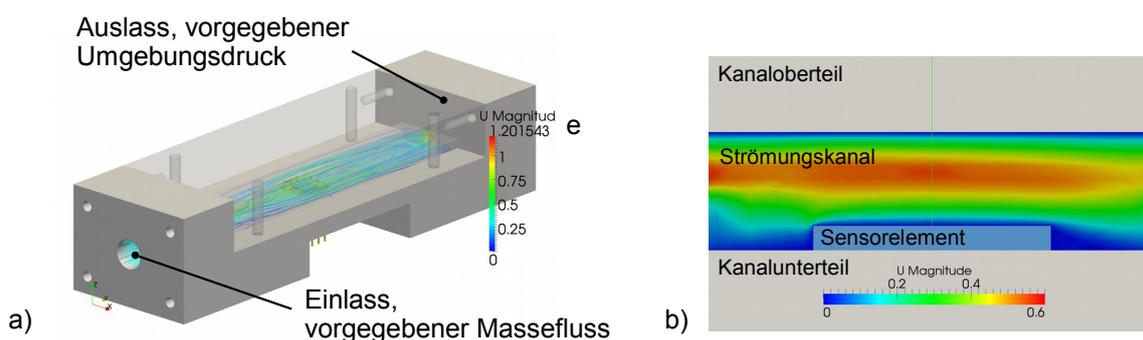


**Abbildung 6.9:** CAD Ansicht des konzipierten Strömungskanals a) Explosionsansicht b) Schnittansicht

Das Gas, im einfachsten Fall wird Druckluft verwendet, strömt durch den Einlass in den Kanal, überströmt in der Mitte des Kanals das Sensorelement und strömt am Auslass wieder aus. Mit einem Referenzsensor und einem Nadelventil ist ein definierter Massefluss einstellbar.

#### 6.4.1 Auslegung des Strömungskanals

Maßgeblich für die Erzeugung des Messsignals ist die Strömungsgeschwindigkeit über dem Sensorelement. Mittels numerischer Modellierung kann das Strömungsprofil oberhalb des Sensorelementes in Abhängigkeit des Massestroms<sup>1</sup>, der durch den Einlass in den Strömungskanal fließt, dargestellt werden. Dieses Vorgehen ist notwendig, damit das Ergebnis mit anderen Messungen vergleichbar wird. Dazu wird der Kanal mit der in Abschnitt 4.3 vorgestellten Methode in der Software OpenFOAM simuliert. Es werden die Navier-Stokes-Gleichungen für nichtkompressible Strömungen herangezogen. Auf ein Turbulenzmodell wird verzichtet. Am Einlass wird dabei ein fester Massestrom vorgegeben. In der später folgenden praktischen Charakterisierung kann diese Randbedingung mit dem Referenzsensor in Verbindung mit einem Nadelventil realisiert werden. Abbildung 6.10 zeigt das Strömungsfeld im Strömungskanal. Dabei zeigt 6.10 a) das Strömungsfeld als Stromlinien, b) zeigt das Strömungsfeld als Schnittansicht direkt oberhalb des Sensorelementes für einen Massefluss von  $\dot{m} = 100$  sccm.

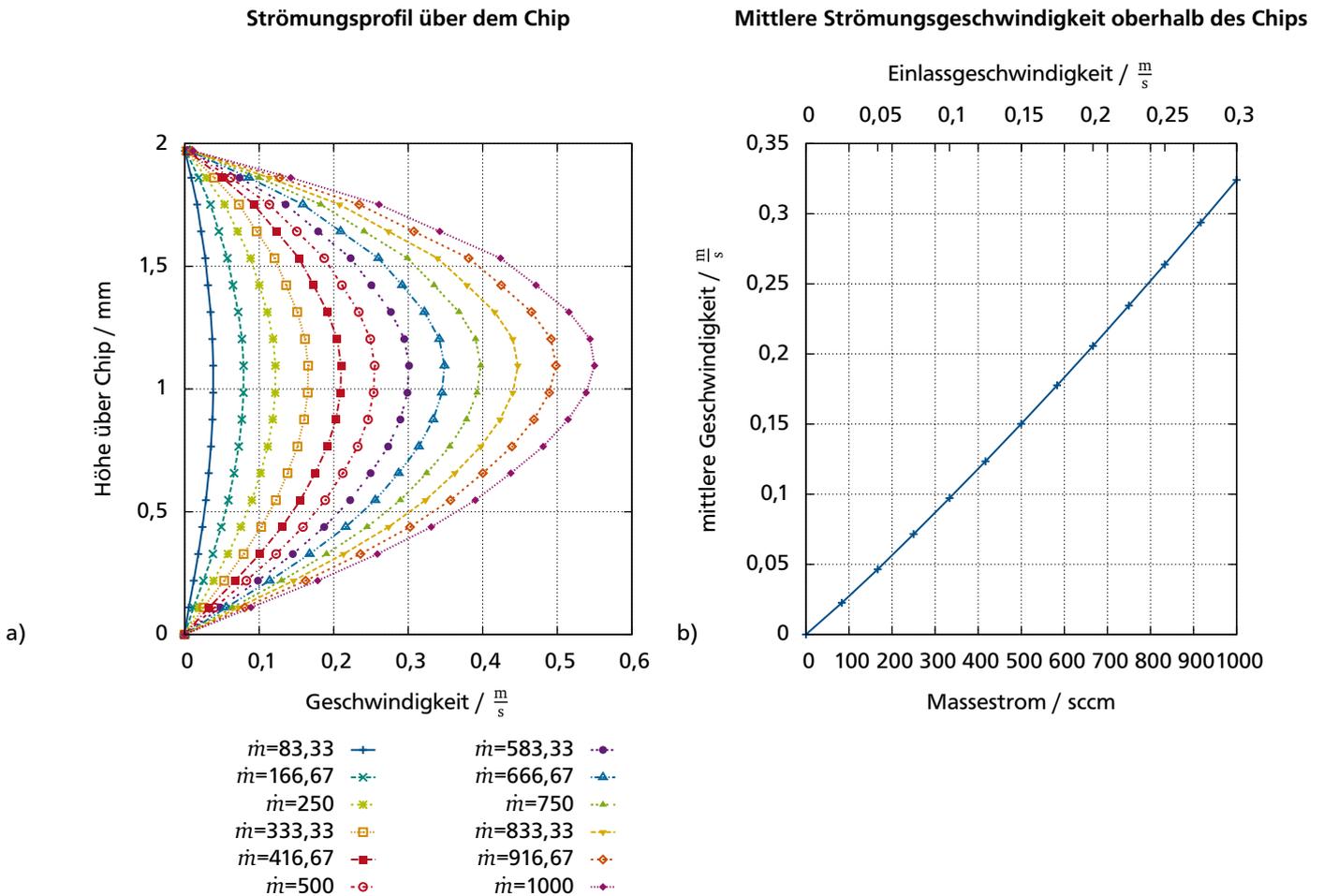


**Abbildung 6.10:** Strömungsfeld innerhalb des des Kanals, a) Stromlinien, b) Strömungsfeld oberhalb des Sensorelementes.

Das Strömungsprofil direkt oberhalb des Sensorelementes zeigt Abbildung 6.11 a) . Es ist zu erkennen, dass sich ein parabelförmiges Strömungsprofil in Abhängigkeit des eingepprägten Massestroms einstellt. Aus dem parabelförmigen Strömungsprofil wird die mittlere Strömungsgeschwindigkeit über dem Chip

<sup>1</sup> Der Referenzsensor zeigt den eingestellten Massestrom an. Zur besseren Vergleichbarkeit mit anderen Systemen wird dieser in eine Strömungsgeschwindigkeit überführt

bestimmt, die für die Charakterisierung als Bezugsmessgröße dient (Abbildung 6.11 b)). Dieser Schritt ermöglicht den Vergleich des in dieser Arbeit realisierten Systems mit anderen Arbeitsgruppen. In Tabelle 6.4 sind die in der Simulation eingestellten Parameter dargestellt. Die verwendeten Diskretisierungsschemata und Lösungsverfahren für die aus der Diskretisierung resultierenden linearen Gleichungssysteme sind im Anhang A.8.2 dargestellt.



**Abbildung 6.11:** a) Strömungsprofil oberhalb des Sensorelementes. Es bildet sich ein parabelförmiges Strömungsprofil aus, b) Aus dem Strömungsprofil ermittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Sensorelementes. Diese dient als Bezugsgröße zum Vergleich mit anderen Sensorsystemen. Der Zusammenhang ist nahezu linear. Der Massefluss in der Legende ist in sccm angegeben.

#### 6.4.2 Berechnung der Temperaturverteilung im Strömungskanal zur optimalen Platzierung der Temperaturmessenelemente

Die Strömungsmessung bei kalorimetrischen Sensoren geschieht über die Messung eines strömungsabhängigen Temperaturfeldes. Daher wird neben der Strömung im Folgenden auch die Temperaturver-

**Tabelle 6.4:** Materialkonstanten und Randbedingungen für die Strömungsberechnung im Kanal

Größe	Einheit	Wert
Kinematische Viskosität (Luft)	$\frac{\text{m}^2}{\text{s}}$	$10^{-5}$
Dichte	$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	1,2
Randbedingung am Einlass		$v_n = 0..0.3 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Randbedingung am Auslass		$\frac{\partial \vec{v}}{\partial n} = 0, p = 0 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$
Randbedingung an den Kanalwänden, Chip & Sockel		No-Slip, $v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$

teilung im Strömungskanal modelliert. Das Modell entspricht damit dem in den Abschnitten 4.3.1 und 4.3.4 vorgestellten. Die Berechnung der Temperaturverteilung ist aus mehreren Gründen notwendig. Zum einen kann abgeschätzt werden, welche Heizleistung zu welcher Temperaturerhöhung führt, zum anderen, wie weit die Drähte bzw. die Drahtarrays vom Heizelement entfernt sein müssen, um eine möglichst hohe strömungsinduzierte Temperaturänderung zu erfahren. Die Auswirkung der Messelemente (Drahtarray oder einzelner Draht) auf das Temperaturfeld wird in diesem Auslegungsschritt vernachlässigt. Dadurch kann der Rechenaufwand deutlich verringert werden, weil keine nanoskaligen Objekte im Rechenetz aufgelöst werden müssen. Mit in die Berechnung einbezogen werden folgende Einflüsse:

- *Strömung* Innerhalb des Kanals wird die Strömung für verschiedene Massefüsse berechnet (vgl. vorhergehender Abschnitt). Das Ergebnis ist das Geschwindigkeits- und Druckfeld im Strömungskanal. Zur Berechnung der Strömung gelten die in Tabelle 6.4 getroffenen Annahmen und Randbedingungen.
- *Temperaturfeld in der Strömung* In Ergänzung zum vorhergehenden Abschnitt wird zusätzlich die Transportgleichung für die Temperatur gelöst.
- *Temperaturfeld im Chip und Sockel* Das Heizelement befindet sich auf dem Sensorelement. Das heißt, dass das zur Messung der Strömungsgeschwindigkeit nötige Temperaturfeld im Festkörper erzeugt wird, und daher auch das Temperaturfeld im Festkörper berechnet werden muss. Zur Vereinfachung wird jedoch nur das Feld im Sockel und Chip berechnet, nicht jedoch in den restlichen Bauteilen des Strömungskanals, da davon auszugehen ist, dass die Bauteile soweit von den sensitiven Elementen entfernt sind, dass sie keinen Einfluss mehr ausüben.

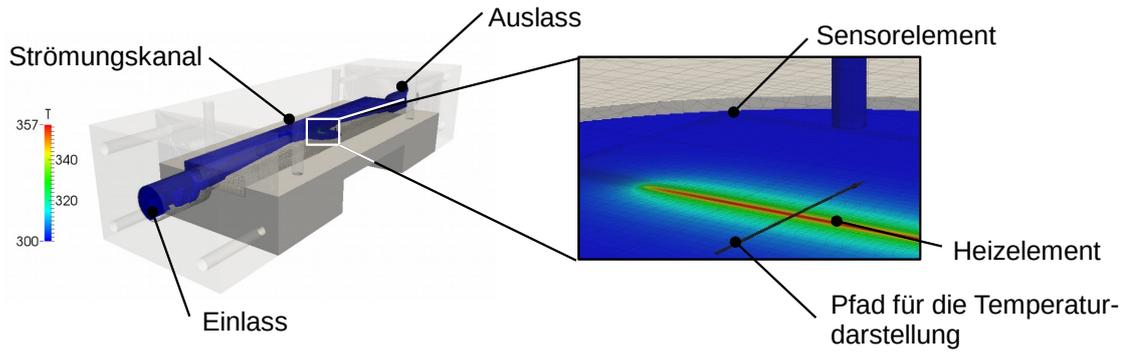
In Tabelle 6.5 sind die Randbedingungen und Materialkennwerte der Simulation dargestellt.

Ausgewertet wird die Temperatur, 25  $\mu\text{m}$  oberhalb des Sensorelementes. Dies entspricht der Höhe der Drahtarrays, bzw. der einzelnen Drähte. Der zur Auswertung genutzte Pfad ist in Abbildung 6.12 dargestellt.

In Abbildung 6.13 a) ist die Temperaturerhöhung durch das Heizelement deutlich zu erkennen. Eine Heizleistung von  $P = 150 \text{ mW}$  bewirkt eine Temperaturerhöhung von  $\Delta T = 57 \text{ K}$  gegenüber der angenommenen Umgebungstemperatur von  $T_0 = 300 \text{ K}$ . Der Temperaturabfall zu beiden Seiten des Heizelementes (Upstream und Downstream) ist für den Fall, dass sich das Gas in Ruhe befindet symmetrisch. Für eine Strömung mit einer Geschwindigkeit von  $\vec{v} > 0$  ist eine Abkühlung auf der Upstream-Seite<sup>2</sup> zu sehen.

Deutlicher werden die Temperaturverhältnisse, wenn die Temperaturdifferenz zur Ruhetemperatur, das heißt zu derjenigen Temperatur, die herrscht wenn sich das Gas in Ruhe ( $\vec{v} = 0$ ) befindet, aufgetragen wird, vgl. Abbildung 6.13 b). In dieser Darstellung ist deutlich zu erkennen, dass die Gasströmung vor dem Heizelement ( $x < 0$ , Upstream) eine deutliche Abkühlung hervorruft, wohingegen hinter dem Heizelement ( $x > 0$ , Downstream) eine leichte Erwärmung zu beobachten ist. Zur besseren Darstellung ist

<sup>2</sup> Der Strömung zugewandten Seite



**Abbildung 6.12:** Berechnetes Temperaturfeld im Strömungskanal. In der Detailansicht ist der Pfad dargestellt, der zur Auswertung der Temperatur genutzt wird. Der Pfad liegt 25  $\mu\text{m}$  oberhalb der Chipoberfläche, und reicht von 1 mm vor bis 1 mm hinter dem Heizelement. Deutlich zu erkennen ist die Temperaturerhöhung durch das Heizelement

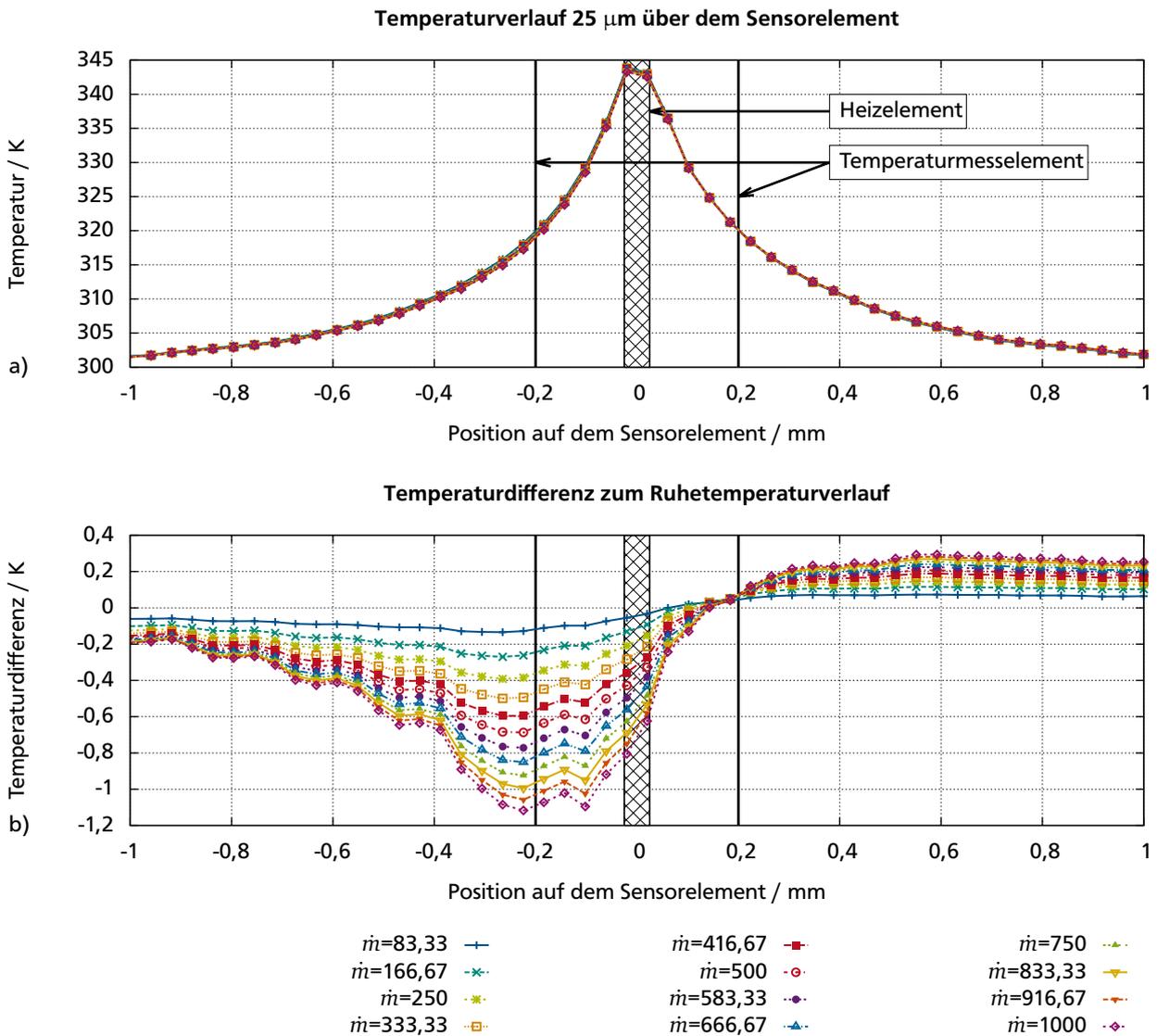
**Tabelle 6.5:** Parameter für die Strömungs- und Temperaturberechnung im Kanal

Größe	Einheit	Wert
Randbedingung für die Strömung		Vergleiche Tabelle 6.4
Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Glassubstrat $\lambda_{\text{Glas}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	1,1
Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Messingsockel $\lambda_{\text{Messing}}$	$\frac{\text{W}}{\text{mK}}$	235
Wärmediffusionskoeffizient, Glassubstrat $D_{\text{T,Glas}} = \frac{\lambda_{\text{Glas}}}{\rho_{\text{Glas}} \cdot c_{\text{Glas}}}$		$6 \cdot 10^{-7}$
Wärmediffusionskoeffizient, Messingsockel $D_{\text{T,Messing}} = \frac{\lambda_{\text{Messing}}}{\rho_{\text{Messing}} \cdot c_{\text{Messing}}}$		$9,7 \cdot 10^{-5}$
Temperaturrandbedingung Einlass		Einströmtemperatur $T_{\text{Einlass}} = 300 \text{ K}$
Temperaturrandbedingung Auslass		Gradient der Auströmtemperatur $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Außenbegrenzungen des Sockels		$T = 300 \text{ K}$
Heizleistung $P_{\text{El}} / \text{W}$		0,15

$$\rho = \text{Dichte} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$c = \text{spezifische Wärmekapazität} / \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

das Heizelement, welches eine Breite von 50  $\mu\text{m}$  aufweist, durch einen schraffierten Bereich im Graph dargestellt. Zweckmäßig ist, die Temperaturmessenelemente symmetrisch vor und hinter dem Heizelement zu platzieren. Nur dann können bidirektionale Strömungen mit gleicher Empfindlichkeit gemessen werden. Da es vornehmlich um die Messung von Wechselflüßen geht, ist aber ebendies notwendig. Der maximale Messeffekt wird erzielt, wenn das Upstream-Temperaturmessenelement im Minimum der Temperaturdifferenz (vgl. Abbildung 6.13 b)) platziert wird. Das heißt, dass das Upstream-Messelement 200  $\mu\text{m}$  vor dem Heizelement platziert wird. Aus Symmetriegründen folgt das Downstreammessenelement 200  $\mu\text{m}$  hinter dem Heizelement. Damit ist das Layout (siehe Abbildungen 6.2 und 6.5) für die Sensorelemente vollständig.



**Abbildung 6.13:** a) Temperaturverlauf 25  $\mu\text{m}$  oberhalb des Sensorelementes. Zu erkennen ist die Temperaturüberhöhung hervorgerufen durch das Heizelement (schraffierter Bereich), b) Temperaturdifferenz zum Ruhetemperaturverlauf. Zu erkennen ist die deutliche Abkühlung auf der Upstream-Seite ( $x < 0$ ), sowie eine Erwärmung auf der Downstream-Seite ( $x > 0$ ). Die gewählte Platzierung der Temperaturmeselemente ist durch vertikale schwarze Striche gekennzeichnet. Der Massefluss in der Legende ist in sccm angegeben.

---

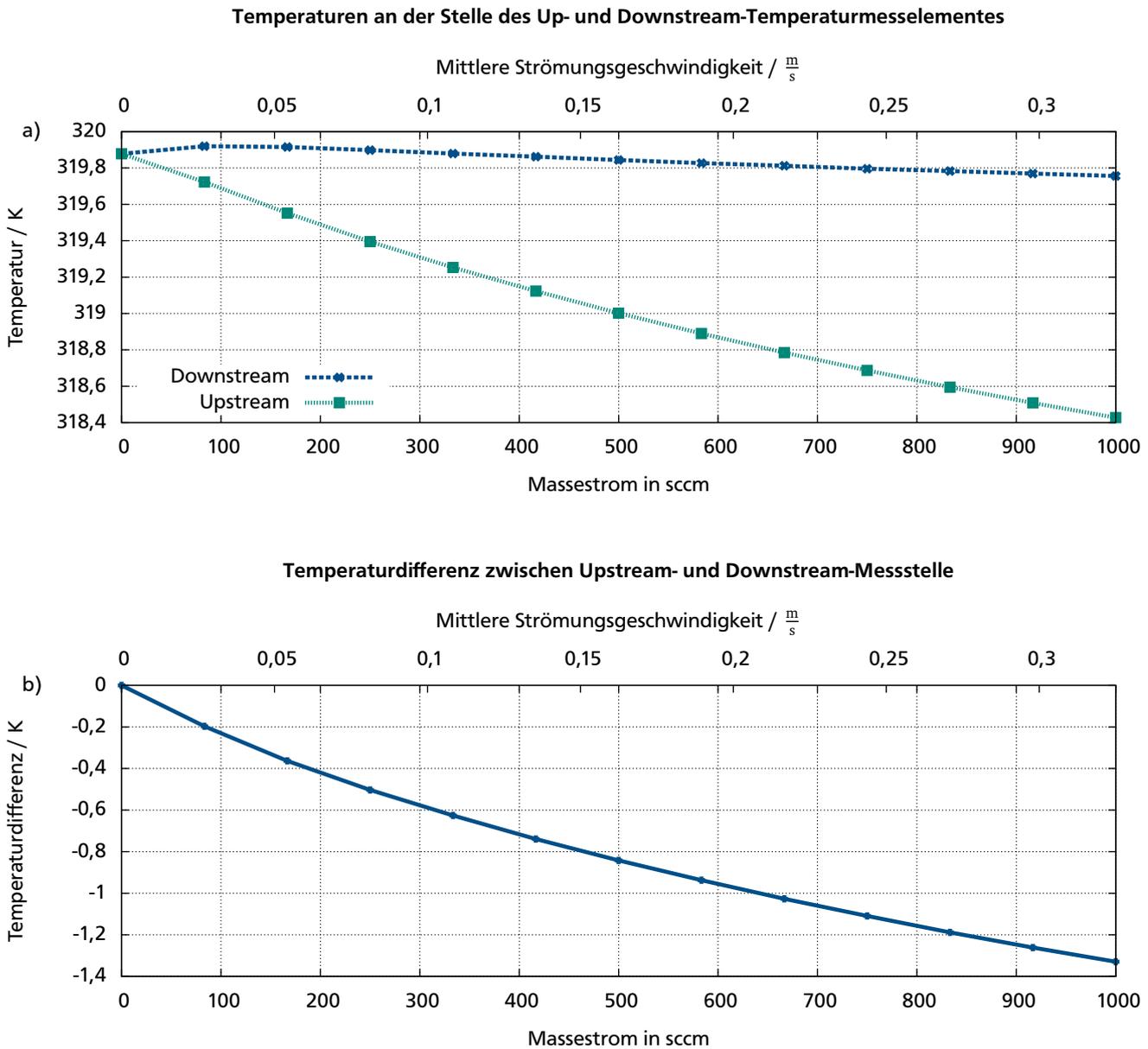
Aus den Simulationsdaten ist zusätzlich noch die Kennlinie des Sensorelementes schätzbar. Dazu wird die Temperaturdifferenz zwischen dem geplanten Downstream- und Upstream-Messelement ermittelt.

In Abbildung 6.14 a) ist die Temperatur an der Upstream- und Downstream-Messstelle in Abhängigkeit des Massestroms dargestellt. Deutlich zu erkennen ist die vergleichsweise starke Abkühlung des Upstreammeselementes bei steigender Strömungsgeschwindigkeit. An der Downstream-Messstelle steigt die Temperatur zunächst und sinkt dann bei steigendem Massestrom wieder. Der Effekt ist jedoch bei weitem nicht so ausgeprägt wie die Abkühlung des Upstream-Messelementes. Abbildung 6.14 b) zeigt die Differenz der Temperaturen zwischen den Messstellen in Abhängigkeit der Strömung. Dies entspricht der Kennlinie der später aufgebauten Sensoren. Die entstehende Temperaturdifferenz  $\Delta T$  von mehr als einem  $K$  ist ausreichend groß um detektiert zu werden. Durch Erhöhung der Heizleistung und der damit verbundenen höheren Heizelementtemperatur wird diese Differenz gesteigert. Da das System bgl. der Heizleistung *linear* ist (vgl. Gleichung (4.25) in Abschnitt 4.3.1) beeinflusst eine Erhöhung der Heizleistung die optimale Lage der Temperaturminima nicht. Lediglich die Temperaturdifferenz  $\Delta T$  wird erhöht, was zu einer Erhöhung der Empfindlichkeit führt. Es ist zu erwarten, dass sich die Heizelemente bis ca. 300 mW betreiben lassen.

Nicht berücksichtigt wurden in dieser Simulation die Effekte, die durch die Rückwirkung der Nanodrähte auf die Strömung selbst entstehen. Gerade bei Arrays aus Submikrodrähten, wie sie beim Fertigungsprozess mit dem Ionensputzverfahren entstehen, ist dieser Effekt aber aus zwei Gründen nicht mehr zu vernachlässigen:

1. Die Drähte sind auf Grund ihrer Länge von 25  $\mu\text{m}$  stark thermisch mit dem Substrat gekoppelt. Daher beeinflusst die Substrattemperatur die Temperatur der Drähte merklich.
2. Da es sich bei den Messelementen um ein Drahtarray handelt, welches über eine geschlossene Deckschicht verfügt (da sonst die elektrische Kontaktierung durch Verbinden nicht möglich wäre) stellt dies einen merklichen Strömungswiderstand dar, der sich auf die Strömung auswirkt.

Daher wird das Modell im Folgenden um Arrays aus Submikrodrähten erweitert. Für Drähte aus dem Ätzkantengalvanikverfahren wird auf diesen zusätzlichen Schritt verzichtet, da davon ausgegangen werden kann, dass die Rückwirkung der einzelnen Drähte vergleichsweise gering ist. Interessant wäre in diesem Fall nur die Darstellung des transienten Verhaltens bzw. die Bestimmung der Zeitkonstante. Aufgrund der skalenübergreifenden Simulation, welche bedingt dass ein vollständiges Modell aus extrem vielen Zellen bestehen muss, ist eine transiente Simulation ohnehin sehr aufwändig und wird nicht durchgeführt. Die Zeitkonstante der Systeme wird daher nicht durch Simulation ermittelt.



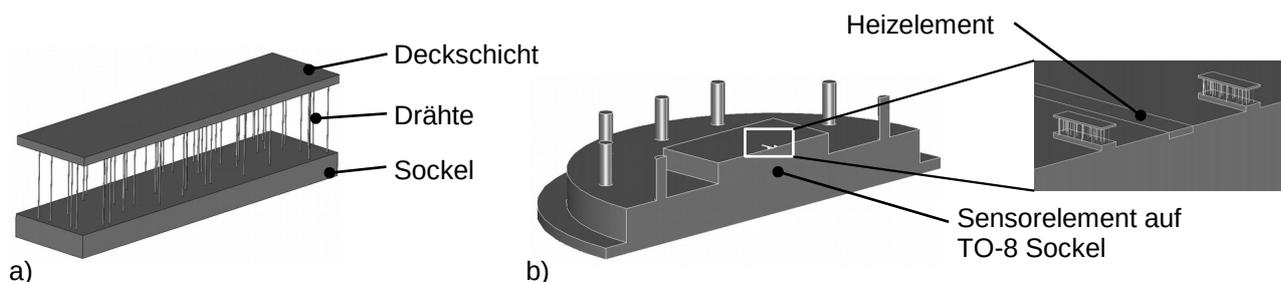
**Abbildung 6.14:** a) Temperatur in Abhängigkeit des Massestroms an der Up- und Downstreammessstelle. An der Upstream-Messstelle sinkt die Temperatur, während sie an der Downstream-Messstelle zunächst steigt und anschließend leicht sinkt; b) Temperaturdifferenz zwischen der Up- und Downstream-Messstelle in Abhängigkeit der Strömung

### 6.4.3 Einfluss der Submikrodrahtarrays

Um den Einfluss der Submikrodrahtarrays abzuschätzen wird im Folgenden eine Simulation durchgeführt, bei der diese mit berücksichtigt werden. Die Berücksichtigung der nanoskaligen Strukturen hat wesentliche Konsequenzen für die Komplexität der Modellierung:

- Da die Abmessungen der Submikrodraht-Arrays in den Bereich der mittleren freien Weglänge der Gasmoleküle liegen, sind Verarmungseffekte mit zu berücksichtigen. Dem wird durch Anwendung von Slip-Randbedingungen für Temperatur und Geschwindigkeit Rechnung getragen.
- Die Abmessungen im System liegen mehrere Größenordnungen auseinander. Der Strömungskanal, der das Sensorelement aufnimmt hat eine Länge von etwa 14 cm, die Drähte einen Durchmesser von 400 nm. Damit beträgt das Verhältnis der Größen im Modell etwa 350000:1. Das ist eine Herausforderung bei der Erstellung und Vernetzung des Modells.

Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Submikrodrähte statistisch im Array verteilt sind. Daher müssen die Drähte auch im Modell mit einer statistischen Verteilung platziert werden. Damit die Platzierung nicht von Hand durchgeführt werden muss, wurde ein Verfahren entwickelt, welches automatisiert Drahtarrays mit gegebenen geometrischen Daten als CAD-Modell erstellt. Dabei kann eine beliebige Verteilungsfunktion für die Platzierung der Drähte gewählt werden. Zusätzlich können folgende Größen eingestellt werden: Drahtlänge, -durchmesser, -dichte, Arraygrundfläche, Sockelhöhe (fertigungsbedingt durch Adhäsionsschichtdicke) sowie die Deckschichtdicke. Zunächst erstellt dieses Skript eine einfache Punktwolke auf der Arraygrundfläche. Auf diesen Punkten werden Zylinder platziert, die den geometrischen Daten der Drähte entsprechen. Abschließend werden Sockel und Deckschicht als Quader gemäß den eingegebenen Daten erstellt (vgl. Abbildung 6.15 a)). Die Erstellung der Geometrie erfolgt in der Software Salome<sup>3</sup> mit Hilfe eines Python-Skriptes. Dieses wurde automatisiert aus einem Scilab<sup>4</sup>-Programm, welches auch die Verteilung der Drähte berechnet, generiert. Die mit Salome erstellten Arrays werden dann im Modell des Sensorelementes mit Kanal platziert (Abbildung 6.15 b)).



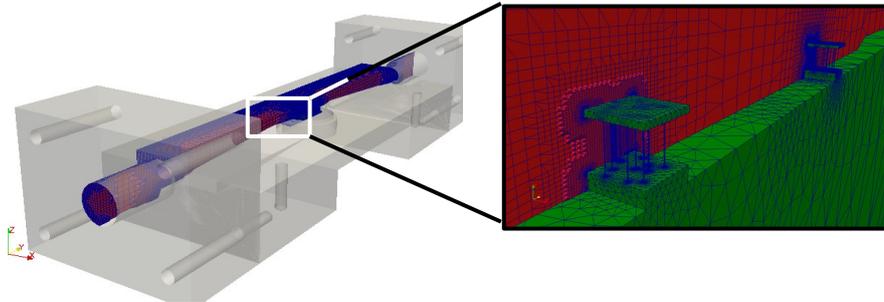
**Abbildung 6.15:** Geometrisches Modell der Submikrodrahtarrays, a) mittels Python-Skript erstelltes Array bestehend aus Drähten, Sockel und Deckschicht, b) Platzierung der Arrays im Modell des Sensorelementes. Aus Symmetriegründen wird nur eine Hälfte des Sensorelementes modelliert

Auf die Erstellung der Geometrie folgt die des Rechenetzes. Hierbei gelten wieder die in Abschnitt 4.3 dargestellten Randbedingungen für das Netz. Auf Grund der geringeren numerischen Anforderungen an das Rechenetz für den Festkörper (nur Lösung der Poisson-Gleichung) wird das Rechenetz für den Festkörper als tetraedrisches Rechenetz ausgeführt, wohingegen das Rechenetz für das Gas als hexadominantes Rechenetz ausgeführt wird. Die Rechenetze sind in Abbildung 6.16 dargestellt. Trotz der

<sup>3</sup> [www.salome-platform.org](http://www.salome-platform.org)

<sup>4</sup> numerisches Mathematikprogramm, [www.scilab.org](http://www.scilab.org)

immensen Größenunterschiede der einzelnen Elemente weist vor allem das Rechennetz für die Strömungsberechnung eine außerordentlich gute Qualität auf. So liegt die maximale Nichtorthogonalität bei  $55^\circ$ , bei einer Anzahl von knapp 3 Mio. Kontrollvolumina. Das Rechennetz für den Festkörper benötigt keine so hohe Qualität, da nur diffusive Prozesse modelliert werden. Daher erfolgt die Erstellung des Rechennetzes für die Strömung in OpenFoam mit dem Vernetzungsprogramm *snappyHexMesh*. Für das Rechennetz des Festkörpers (Sensorelement und TO-8 Sockel) kommt der netgen-Vernetzer<sup>5</sup> als Plug-In für Salome zum Einsatz. Die erstellten Rechennetze sind in Abbildung 6.16 dargestellt.



**Abbildung 6.16:** Das Modell löst sowohl den Strömungskanal als auch die Nanodrähte auf. Dabei handelt es sich um ein Multiskalenproblem, da zwischen den Längenskalen der einzelnen Elemente mehrere Größenordnungen liegen. Das Rechennetz für das Gas (rot) ist als hexdominantes Rechennetz, das für den Festkörper (grün) ist als tetraedrisches Rechennetz ausgeführt

Die Materialkonstanten, die in dieser Simulation zu verwenden sind, sind dieselben wie in den Tabellen 6.4 und 6.5. Da die Submikrodrahtarrays mit berücksichtigt werden, sind zusätzlich noch die Materialkonstanten für das Drahtmaterial zu implementieren. Da zudem Slip-Randbedingungen eingesetzt werden, werden noch Akkommodationskoeffizienten benötigt. Die zusätzlichen Materialparameter sind in Tabelle 6.6 dargestellt.

**Tabelle 6.6:** Zusätzliche Parameter und Randbedingungen für die Strömungs- und Temperaturberechnung im Kanal unter Berücksichtigung der Nanostrukturen

Größe	Wert
Randbedingung für die Strömung an den Nanodrähten	Slip RB gemäß Abschnitt 4.3.5
Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Nickeldraht-Array $\lambda_{\text{Nickel}} / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	1,1
Wärmediffusionskoeffizient, Nickeldrahtarray $D_{T,\text{Nickel}} = \frac{\lambda_{\text{Nickel}}}{\rho_{\text{Nickel}} \cdot c_{\text{Nickel}}}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Thermischer Akkommodationskoeffizient $\sigma_T$	0,9

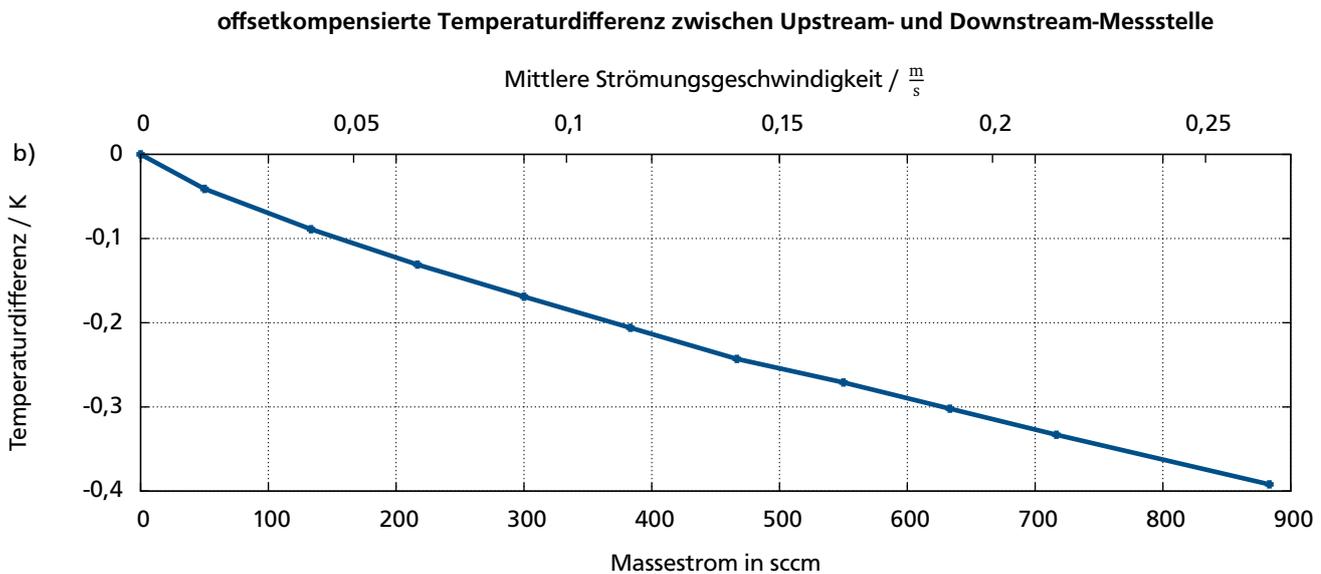
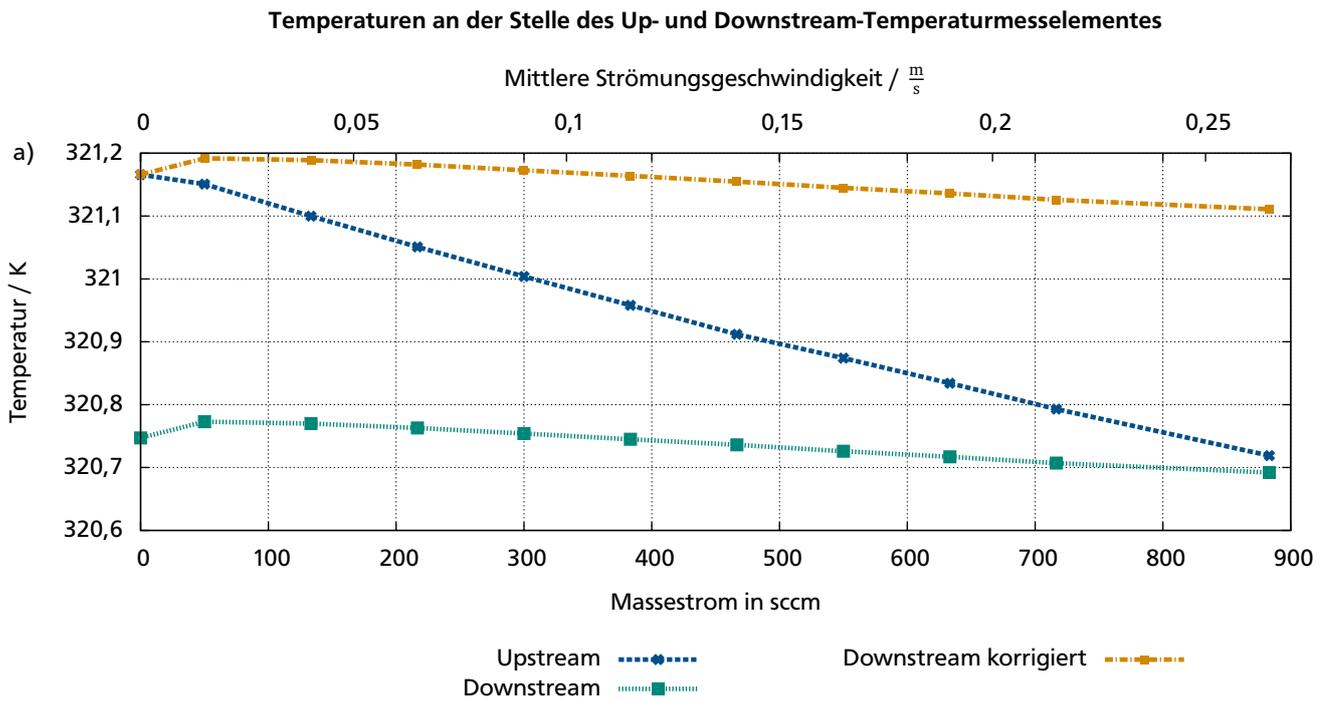
Auf Grund der hohen Anzahl an Zellen war auf einem handelsüblichen PC nur eine stationäre Simulation durchführbar. Zur Auswertung wird die mittlere Temperatur der Drahtarrays herangezogen. Das Ergebnis ist in Abbildung 6.17 dargestellt. Die berechneten Arraytemperaturen sind in Abbildung 6.17 a) dargestellt. Es ist auffällig, dass für das Up- und Downstreamarray unterschiedliche Temperaturen berechnet wurden. Das hat zwei Gründe. Zum einen sind die Arrays unterschiedlich, da die Drähte in den Arrays statistisch verteilt sind. Einen weitaus größeren Effekt hat jedoch das verwendete Rechennetz für den Festkörper. Das Rechennetz berücksichtigt die Symmetrie des Aufbaus nicht, und hat sehr schnelle Übergänge von der feinen Auflösung der Drähte zur groben Auflösung des Chips. Um quantitativ belastbarere Ergebnisse zu erzielen, muss das Rechennetz verbessert werden, u.U. ist es ratsam auch für den Festkörper ein hexdominantes Netz zu verwenden. Damit die Differenz sinnvoll interpretierbar ist, wird

<sup>5</sup> <http://sourceforge.net/projects/netgen-mesher/>

---

sie in Abbildung 6.17 b) offsetkompensiert dargestellt, d.h. die Ruhetemperaturdifferenz wurde von der berechneten Temperaturdifferenz abgezogen.

Es zeigt sich, dass die strömungsinduzierte Temperaturdifferenz nur noch etwa ein Drittel von dem beträgt, was ohne Rückwirkung der Arrays berechnet wurde. Das liegt an der starken thermischen Kopplung der Drähte mit dem Substrat. Die Drähte nehmen immer die Substrattemperatur an, die deutlich schwächer auf eine Strömung reagiert. Das Ergebnis ist nur unwesentlich besser, als wenn man ein Dünnschichtmesselement verwenden würde. Das lässt auch einige Rückschlüsse auf das transiente Verhalten zu: Das Substrat reagiert nur sehr langsam auf Temperaturänderungen, es weist Zeitkonstanten im Sekundenbereich auf. Da die Drähte im Arrays maßgeblich von der Substrattemperatur beeinflusst werden ist davon auszugehen, dass auch die Zeitkonstante des Substrates deutlich dominanter Auftritt als die der Submikrodrähte. Zur Messung einer schnellen Wechselströmung scheint ein Sensorelement mit Drahtarrays als Temperaturmesselemente nicht geeignet.



**Abbildung 6.17:** a) mittlere Temperatur des Up- bzw. Downstream-Drahtarrays in Abhängigkeit der Strömung. Die Ruhetemperaturdifferenz von ca. 0,4 K wird durch die Übergänge von groben zu feinen Strukturen und daraus resultierenden Asymmetrien verursacht. Zu besserer Übersicht ist die offsetkompensierte Downstream-Temperatur dargestellt; b) Temperaturdifferenz zwischen der Up- und Downstream-Submikrodrahtarray in Abhängigkeit der Strömung

---

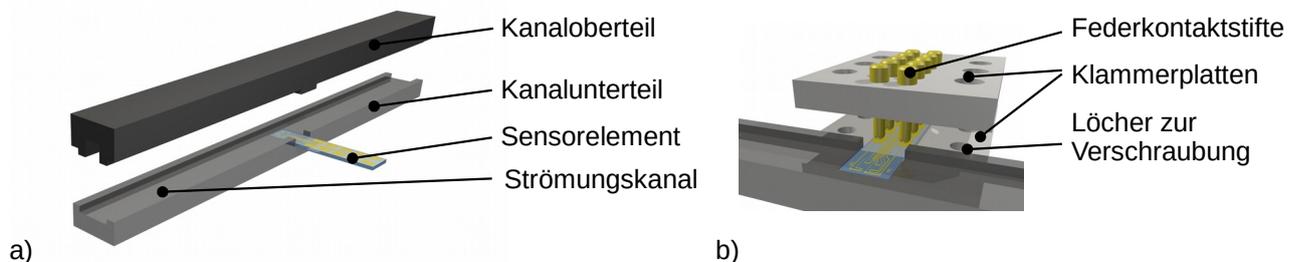
## 6.5 Sensoren und Strömungskanal der zweiten Generation

---

Der im vorhergehenden Abschnitt vorgestellte Strömungskanal eignet sich gut um einen grundsätzlichen Funktionsnachweis für die Sensorelemente zu bringen. Er weist jedoch einige Unzulänglichkeiten auf:

1. Der Kanalquerschnitt ist deutlich größer als der aktive Bereich der Sensorelemente. Dadurch wird die Strömung nicht optimal über die Drähte geführt
2. Eine dynamische Charakterisierung ist nicht vorgesehen
3. Die Kontaktierung durch Drahtbonden ist mechanisch instabil, da das System nicht kapselbar ist

Während die erste Sensorgeneration dem grundsätzlichen Funktionsnachweis diente, sollte die zweite Generation einen größeren Fokus auf die Strömungsverhältnisse legen. So wird der Strömungskanal der zweiten Generation so gestaltet, dass die Strömung wesentlich besser über die sensitiven Bereiche des Sensorelementes geleitet wird, was in einer höheren Sensitivität. Ein weiteres wichtiges Merkmal des Kanals der zweiten Generation ist die Möglichkeit, eine Wechselflussquelle anzuschließen, damit die Sensorelemente auch dynamisch charakterisiert werden können.



**Abbildung 6.18:** Konzept für einen verbesserten Strömungskanal; a) Der Chip ist nicht mehr auf einen Sockel montiert, sondern wird direkt in den Kanal eingebracht, b) Konzept zur Kontaktierung der Sensorelemente: Mittels zweier Platten werden Federkontaktstifte auf die Kontaktpads gepresst. Durch die Pressung wird gleichzeitig der Sensor fixiert

Das Sensorelement ist rechteckig ausgeführt und kann dadurch direkt auf das Kanalunterteil montiert werden. Durch die rechteckige Ausführung des Sensorelementes sind die Kontaktpads auch nach der Montage des Kanaloberteils frei zugänglich. Die Kontaktierung erfolgt durch einen Klemmmechanismus mit Federkontaktstiften (vgl. Abbildung 6.18). Diese Methode der Kontaktierung ist deutlich fehlertoleranter als die Kontaktierung durch Drahtbonden. Die grundsätzliche Anordnung der Drahtarrays bzw. Drähte sowie des Heizelementes entsprechen der, die für das quadratische Sensorelement gewählt wurde (Abbildung 6.2 und Abbildung 6.5). Die Möglichkeit der 4-Punktmessung des elektrischen Widerstandes wurde ebenfalls mit implementiert.

---

### 6.5.1 Strömungsprofil des Kanals der zweiten Generation

---

Für den neu konzipierten Kanal wird ebenfalls das Strömungsprofil berechnet. Der deutlich kleinere Querschnitt sorgt dafür, dass bei gleichem Massefluss  $\dot{m}$  eine deutlich höhere Strömungsgeschwindigkeit auftritt als bei den im vorhergehenden Abschnitt vorgestellten Strömungskanal. Abbildung 6.19 stellt das Strömungsprofil für unterschiedliche Masseflüsse sowie die daraus resultierende mittlere Fließgeschwindigkeit oberhalb des Sensorelements dar. In Tabelle 6.7 sind die für die Berechnungen angenommenen Parameter dargestellt.

Strömungsprofil über dem Chip

Mittlere Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Chips

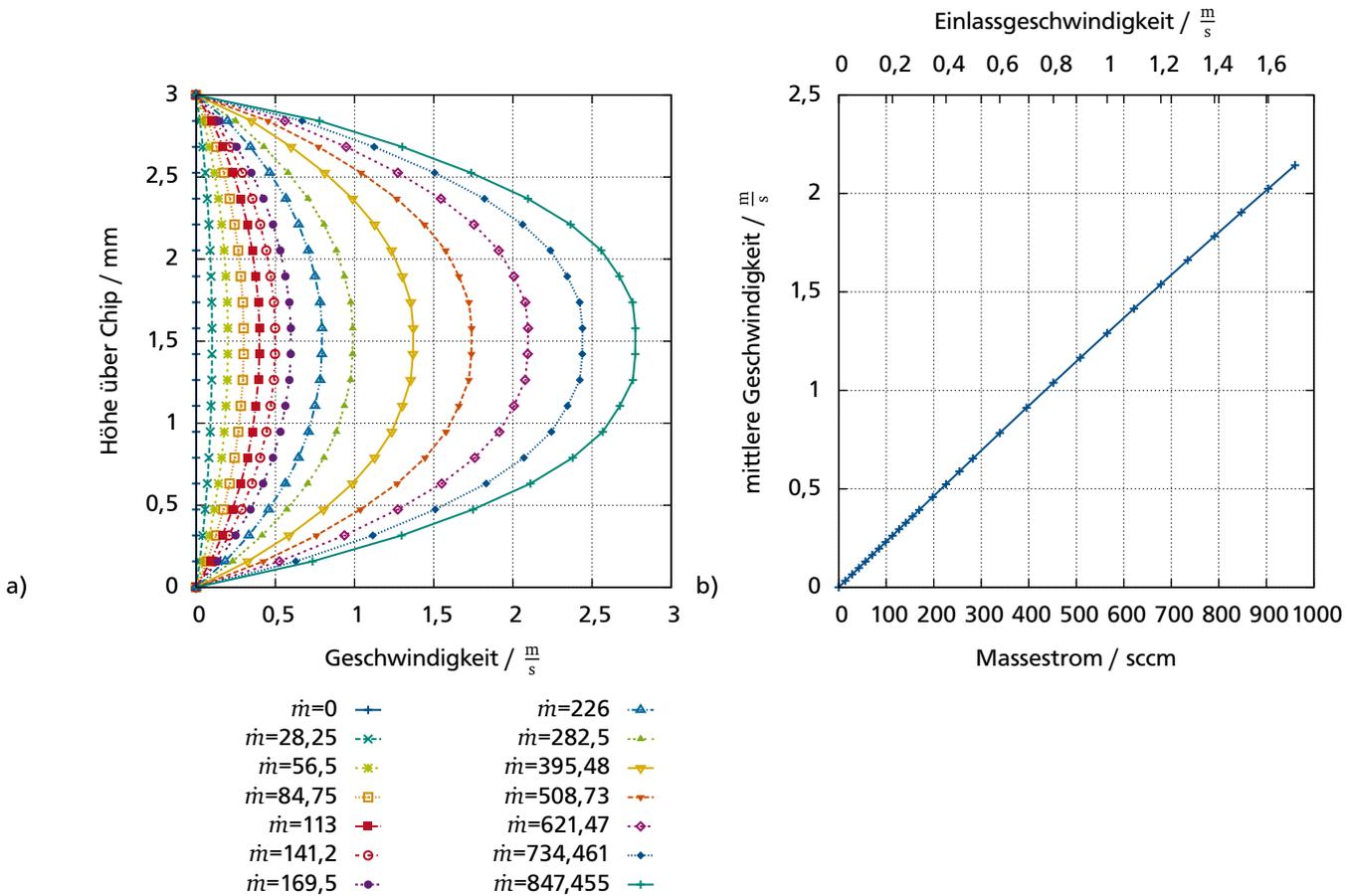


Abbildung 6.19: a) Strömungsprofil oberhalb des Sensorelementes. Es bildet sich ein parabelförmiges Strömungsprofil aus, b) Aus dem Strömungsprofil ermittelte mittlere Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Sensorelementes. Der Zusammenhang ist nahezu linear. Der Massefluss in der Legende ist in sccm angegeben.

Tabelle 6.7: Parameter für die Strömungsberechnung im Kanal

Größe	Einheit	Wert
Kinematische Viskosität (Luft)	$\frac{m^2}{s}$	$10^{-5}$
Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	1,2
Randbedingung am Einlass		$v_n = 0..1,5 \frac{m}{s}, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$
Randbedingung am Auslass		$\frac{\partial \vec{v}}{\partial n} = 0, p = 0 \frac{m^2}{s^2}$
Randbedingung an den Kanalwänden & Chip		No-Slip, $v = 0, \frac{\partial p}{\partial n} = 0$

## 6.5.2 Temperaturverteilung

Wie für den in Abschnitt 6.4 dargestellten Strömungskanal der ersten Generation lässt sich auf für den Kanal der zweiten Generation das Temperaturprofil oberhalb des Sensorelementes darstellen. Abbildung 6.20 zeigt das Temperaturprofil oberhalb des Sensorelementes. Die festgelegten Randbedingungen zeigt Tabelle 6.8. Da der Kanal (zumindest das Kanalunterteil) aus Aluminium gefertigt ist, kann angenommen werden, dass der Kanal sich nicht erwärmt, sondern die Umgebungstemperatur (Raumtemperatur) annimmt.

**Tabelle 6.8:** Parameter für die Strömungs- und Temperaturberechnung im Kanal

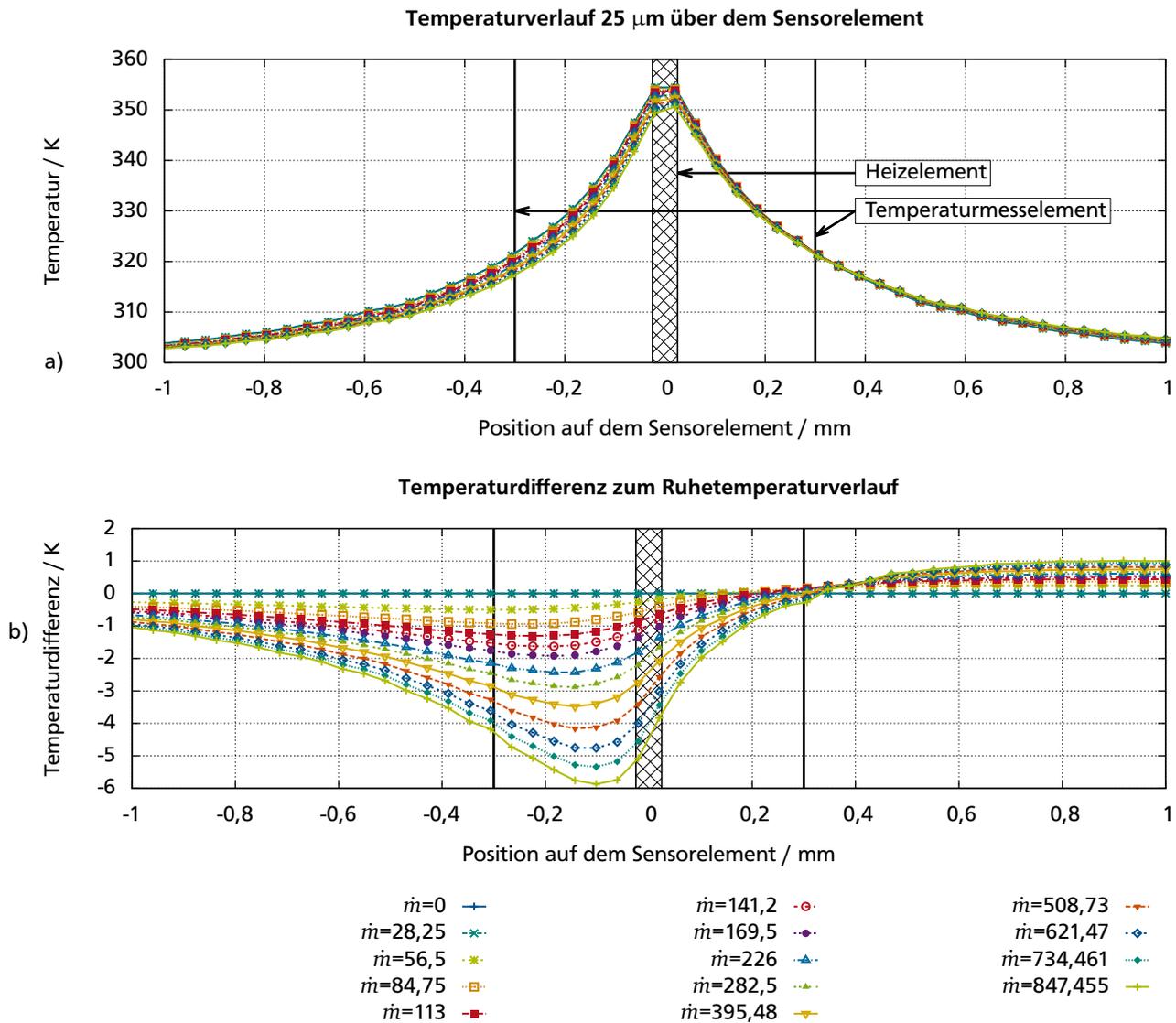
Größe	Wert
Randbedingung für die Strömung	Vergleich Tabelle 6.4
Spezifische Wärmeleitfähigkeit, Glassubstrat $\lambda_{\text{Glas}} / \frac{\text{W}}{\text{mK}}$	1,1
Wärmediffusionskoeffizient, Glassubstrat $D_{T,\text{Glas}} = \frac{\lambda_{\text{Glas}}}{\rho_{\text{Glas}} \cdot c_{\text{Glas}}}$	$6 \cdot 10^{-7}$
Temperaturrandbedingung Einlass	Einströmtemperatur $T_{\text{Einlass}} = 300 \text{ K}$
Temperaturrandbedingung Auslass	Gradient der Auströmtemperatur $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$
Außenbegrenzungen des Glassubstrates	$T = 300 \text{ K}$
Heizleistung $P_{\text{El}} / \text{W}$	0,15

$$\rho = \text{Dichte} / \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

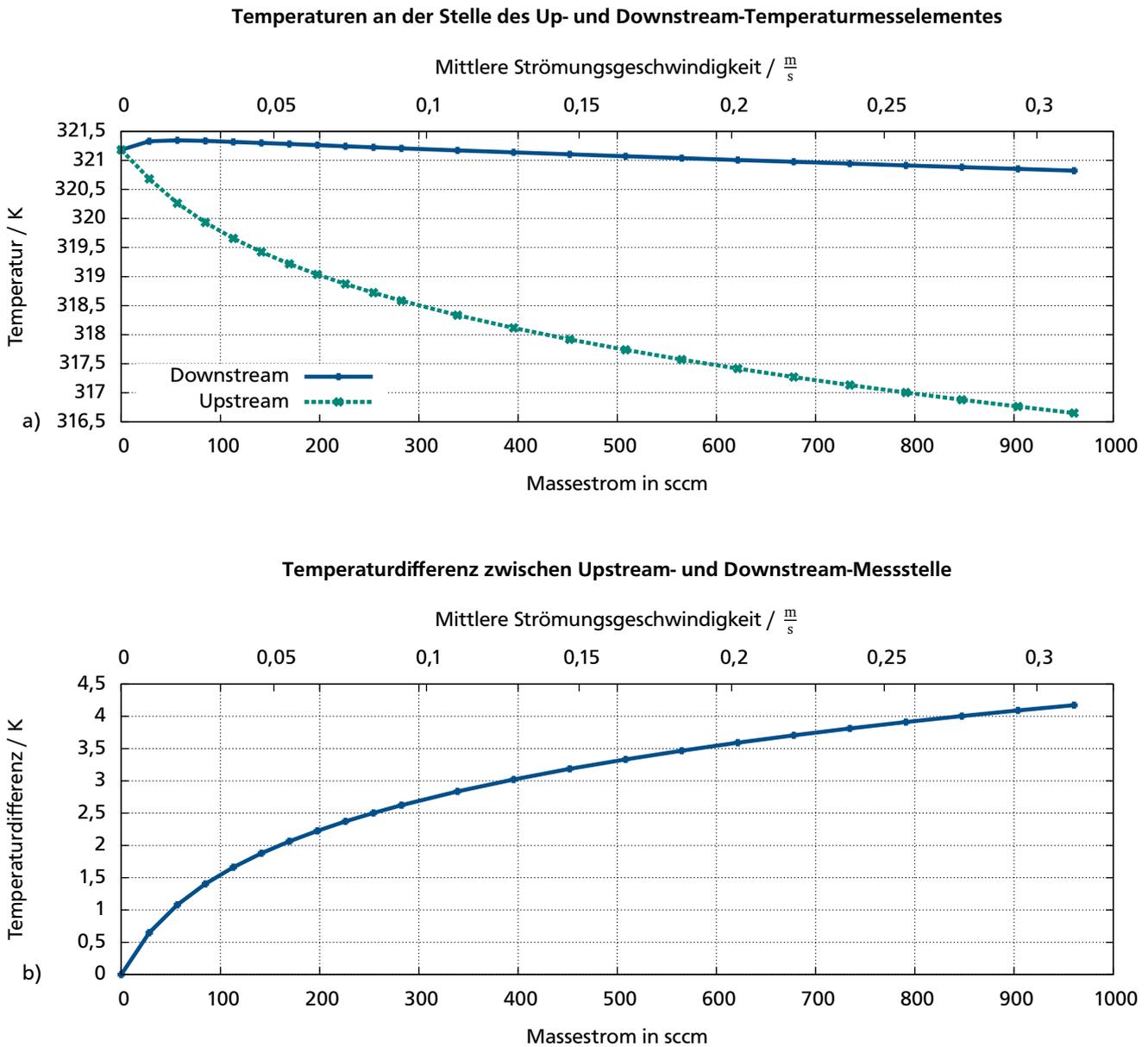
$$c = \text{spezifische Wärmekapazität} \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$$

Die höhere Strömungsgeschwindigkeit bei vorgegebenem Massefluss sorgt für eine stärkere strömungsin-  
dizierte Veränderung des Temperaturfeldes. Die Temperaturdifferenzen zur Ruhetemperatur sind daher  
deutlich höher als für den Strömungskanal der ersten Generation. Der neu konzipierte Kanal sorgt dem-  
nach dafür, dass besonders bei niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten der Kanal noch eine sehr hohe  
Sensitivität aufweist. Die Messelemente sind aus technologischen Gründen (größere Toleranzen beim  
Alignment) 300  $\mu\text{m}$  vom Heizelement entfernt platziert. Wie in Abschnitt 6.4.2 wird auch in diesem  
Kanal die Temperatur an der Upstream- bzw. Downstreammessstelle herangezogen, um die Kennlinie  
des konzipierten Sensors darzustellen. Die Platzierung der Messelemente ist mit 300  $\mu\text{m}$  Entfernung  
vom Heizelement nicht optimal gewählt, was in der Realisierung eines einfacheren Lithographielayouts  
begründet liegt.

Abbildung 6.21 zeigt die berechnete Kennlinie des Sensorelementes im Strömungskanal. Die entste-  
henden Temperaturdifferenzen sind deutlich höher als bei der ersten Version des Strömungskanals was  
auf die bessere Strömungsführung und den daraus resultierenden höheren Strömungsgeschwindigkeiten  
zurück zu führen ist. Weiterhin ist gut zu erkennen, dass der Verbund aus Sensorelement und Strömungs-  
kanal vor allem im Bereich von  $\dot{m} < 500 \text{ sccm}$  empfindlich ist.



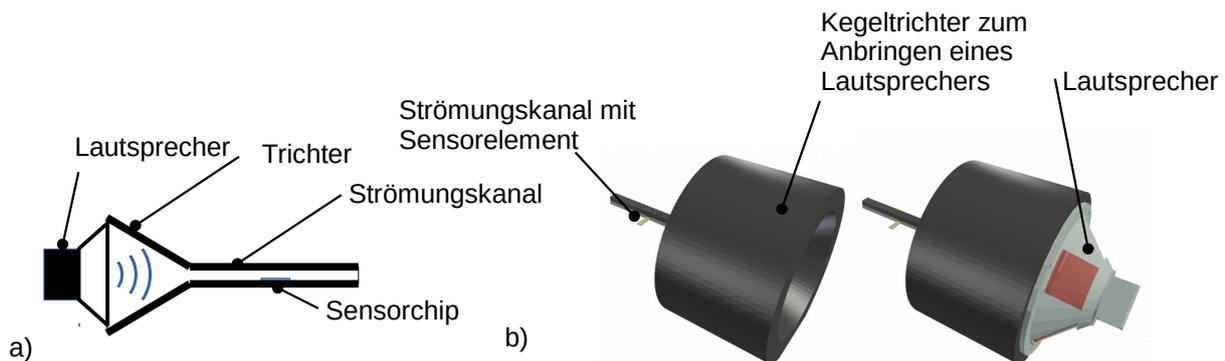
**Abbildung 6.20:** a) Temperaturverlauf 25  $\mu\text{m}$  oberhalb des Sensorelementes. Zu erkennen ist die Temperaturüberhöhung hervorgerufen durch das Heizelement (schraffierter Bereich), b) Temperaturdifferenz zum Ruhetemperaturverlauf, zu erkennen ist die deutliche Abkühlung auf der Upstream-Seite ( $x < 0$ ), sowie eine Erwärmung auf der Downstream-Seite ( $x > 0$ ). Die Platzierung der Temperaturmesselemente ist durch vertikale schwarze Striche gekennzeichnet. Der Massefluss in der Legende ist in sccm angegeben.



**Abbildung 6.21:** a) Berechnete Temperatur in Abhängigkeit des Massestroms an der Up- und Downstreammessstelle. An der Upstream-Messstelle sinkt die Temperatur, während sie an der Downstream-Messstelle zunächst steigt und anschließend leicht sinkt; b) Temperaturdifferenz zwischen der Up- und Downstream-Messstelle in Abhängigkeit der Strömung

## 6.6 Konzept zur dynamischen Charakterisierung

Der zweite Kanal ist so konzipiert worden, dass eine dynamische Charakterisierung der Sensorelemente realisierbar ist. Damit wird ein Messszenario realisiert, welches der späteren Verwendung in einem photoakustischen System sehr nahekommt. Zur dynamischen Charakterisierung wird eine Quelle benötigt, die eine oszillierende Strömung erzeugt [88]. In dieser Arbeit kommt zur Erzeugung der oszillierenden Strömung ein Lautsprecher (Visaton BG 13 P) zum Einsatz. Der Lautsprecher erzeugt eine Gasschwingung mit einstellbarer Frequenz und Amplitude. Über einen Trichter wird die Gasschwingung in den Strömungskanal eingekoppelt und schließlich über das Sensorelement geführt. Ein Funktionsgenerator treibt den Lautsprecher direkt an.



**Abbildung 6.22:** Konzept zur dynamischen Charakterisierung der Sensorelemente: Der Kanal wird an einen kegelförmigen Trichter angeflanscht, der seinerseits zur Befestigung eines Lautsprechers dient. Mit dem Lautsprecher wird eine oszillierende Gasströmung erzeugt, a) schematische Zeichnung, b) 3D-Modell des Systems ohne und mit angeflanschem Lautsprecher

Auf Grund der Frequenzabhängigkeit der resultierenden Strömungsgeschwindigkeit im Verhältnis zur Ansteuerspannung des Lautsprechers kann das System ohne weitere Modellbildung nur zur *qualitativen* Analyse der Sensorelemente genutzt werden. Ohne weitere Modellbildung des Systems aus Lautsprecher und Strömungskanal kann lediglich überprüft werden, ob das Messelement in der Lage ist, Schwingungen mit der eingekoppelten Anregungsfrequenz zu erkennen. In dieser Arbeit wird der Aufbau daher nur genutzt, um die grundsätzliche Fähigkeit der Messelemente hochfrequente Gasoszillationen nachzuweisen, zu überprüfen.

---

## 7 Aufbau und Charakterisierung von Technologiedemonstratoren

---

Die Sensoren mit den galvanisch erzeugten Nanodrähten werden gemäß Kapitel 6 aufgebaut und im Strömungskanal platziert. Vor der Durchführung der Strömungsmessung werden Kennwerte wie Draht- bzw. Arraywiderstand bestimmt. Anschließend wird die statische Kennlinie gemessen. Die Strömung wird mit einem Referenzsensor gemessen und mit den Kennwerten der Sensorelemente in Bezug gesetzt. Abgeschlossen wird das Kapitel mit der dynamischen Charakterisierung der Messelemente.

---

### 7.1 Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands

---

Um die Sensorelemente zu charakterisieren wird zunächst der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands gemessen. Dabei wird das Sensorelement in einer Klimakammer platziert und der Widerstand für verschiedene Temperaturen bestimmt. Die Messung wird sowohl für Sensorelemente mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren als auch aus dem Ätzkantenverfahren durchgeführt. Die Bestimmung des Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands ist notwendig, um aus den gemessenen Widerstandswerten die Drahttemperatur abschätzen zu können. Die Temperatur wurde dabei zwischen 20 °C (Raumtemperatur) und 60 °C variiert, da dies dem Temperaturbereich, dem die Messdrähte ausgesetzt sind, entspricht. In diesem Bereich kann auch in sehr guter Näherung angenommen werden, dass die Temperaturabhängigkeit des elektrischen Widerstands linear ist.

Für den elektrischen Widerstand gilt:

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha(T - T_0))$$

Der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstands  $\alpha$  kann damit als Steigung der Geraden

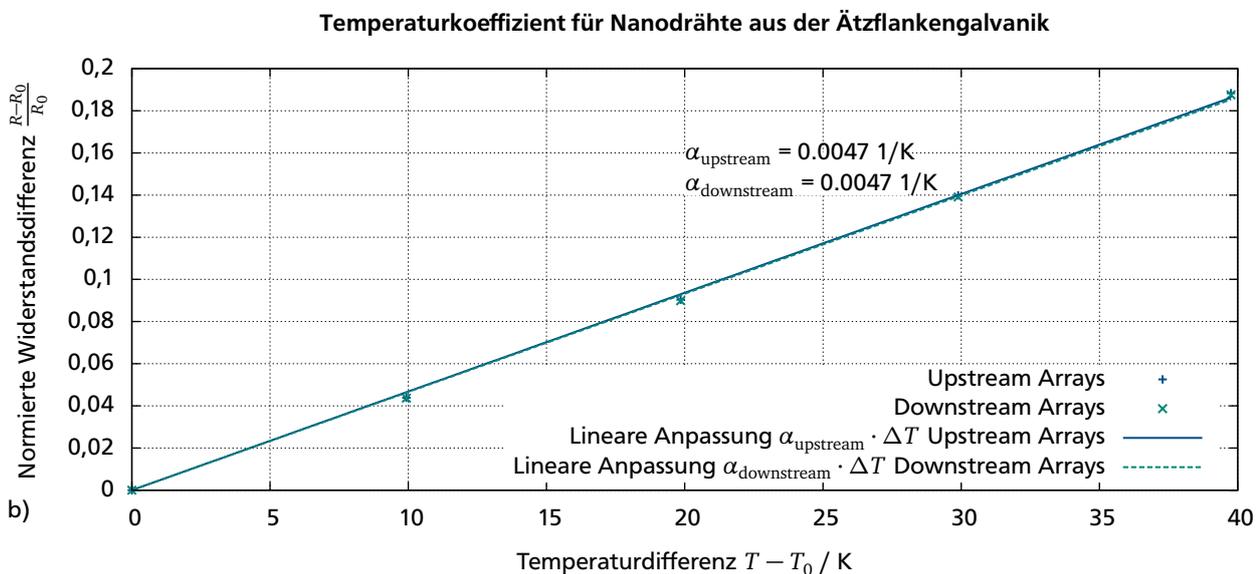
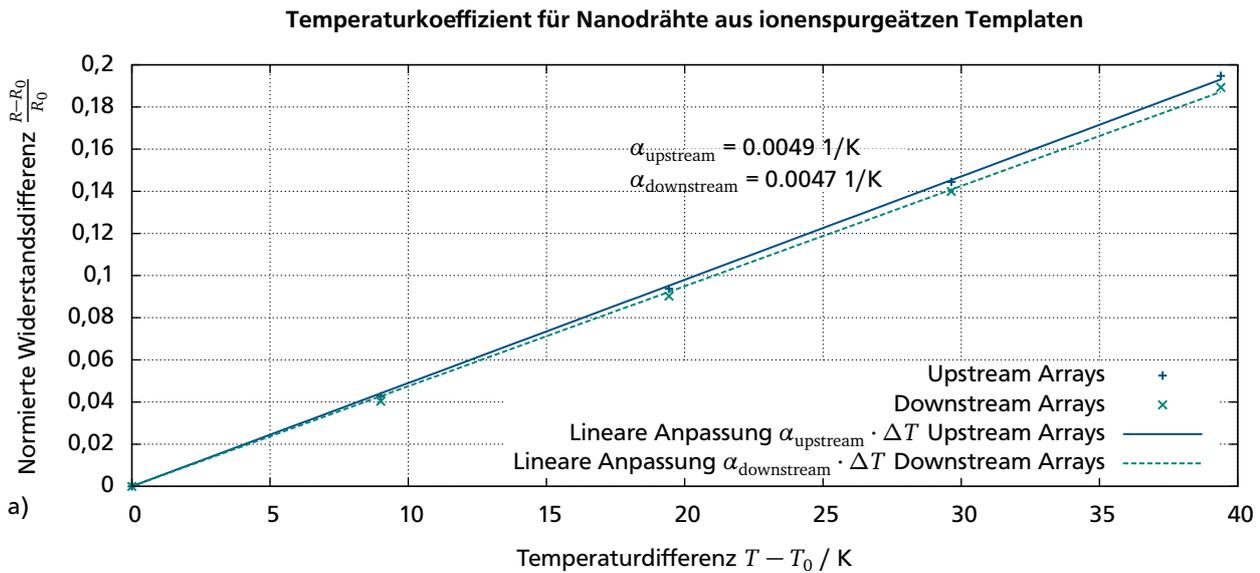
$$\frac{R - R_0}{R_0} = \alpha(T - T_0)$$

interpretiert werden. Die gemessenen Werte sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Der resultierende Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes ist unabhängig von dem Herstellungsverfahren für die Nanodrähte. Er ergibt sich zu  $\alpha = 4,7 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$  und ist damit niedriger als der Literaturwert von Bulk-Material  $\alpha_{\text{Bulk}} = 6 \cdot 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}$ .

Ist der Temperaturkoeffizient des elektrischen Widerstandes bekannt, kann die Temperatur des Messdrahtes bzw. Drahtarrays berechnet werden.

$$T = \frac{R - R_0}{R_0 \alpha} + T_0$$

Der Widerstand beider auf einem Sensorelement vorhandenen Messelemente wurde simultan mit Digitalmultimetern NI PXI-4070 bzw. NI PXI-4072 gemessen. Die Multimeter sind Einsteckkarten für das NI PXI System und übermitteln die gemessenen Daten direkt an den PC. Sie unterstützen die 4-Punkt-Messmethode und kompensieren Thermospannungen die an Materialübergängen auftreten können.

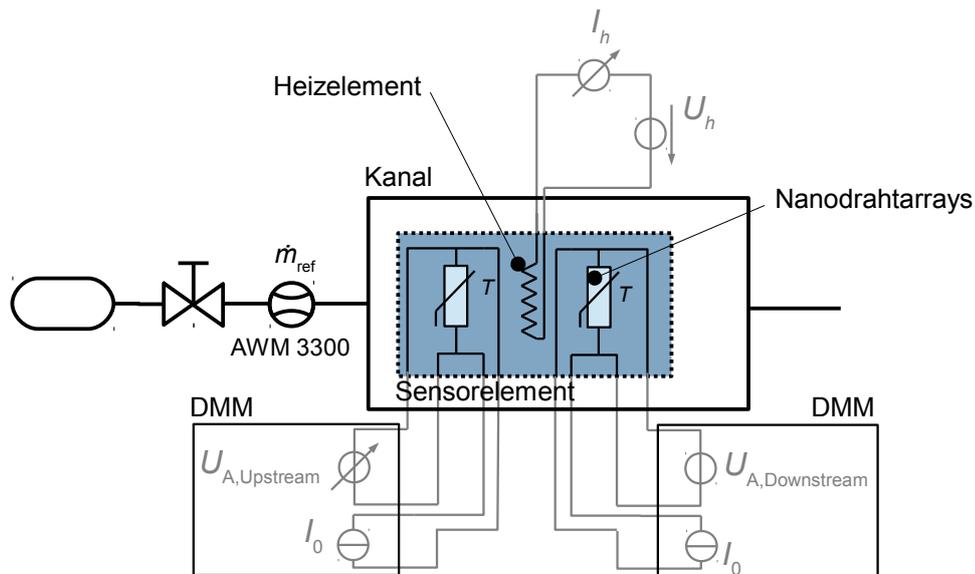


**Abbildung 7.1:** Elektrischer Widerstand in Abhängigkeit der Temperatur für Drahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren (a)) sowie für Drähte aus dem Ätzkantengalvanikverfahren (b)). Der Temperaturkoeffizient ergibt sich aus der Steigung der linearen Anpassung der Kurven.

## 7.2 Statische Kennlinie des Sensorelementes im Strömungskanal der ersten Generation

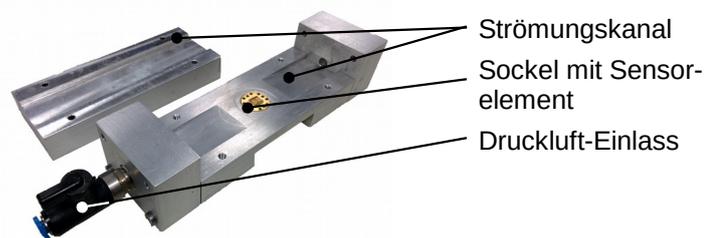
Von den aufgebauten Sensorelementen wird zunächst die statische Kennlinie aufgenommen. Dazu wird das Sensorelement wie in Abschnitt 6.4 im Strömungskanal platziert. Der Kanal wird an das Hausdruckluftnetz angeschlossen. Über einen Druckminderer und ein Nadelventil kann ein Massestrom  $\dot{m}$  eingestellt werden, der mittels eines Referenzsensors AWM 3300 gemessen wird. Das Konzept des Messaufbaus zeigt Abbildung 7.2. In Abbildung 7.3 ist ein Photo des Kanals mit dem montierten Sensorelement dargestellt.

Das Heizelement erwärmt sich mit einer definierten Heizleistung. Mittels zweier Digital-Multimeter werden die Widerstände des Upstream- und Downstream-Messelementes mittels 4-Leiter-Messmethode ge-



**Abbildung 7.2:** Konzept für die Bestimmung der statischen Kennlinie

messen. Mittels des im vorhergehenden Abschnitt berechneten Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands kann daraus die Temperatur an den Messelementen bzw. die Temperaturdifferenz zwischen den Messelementen berechnet werden.

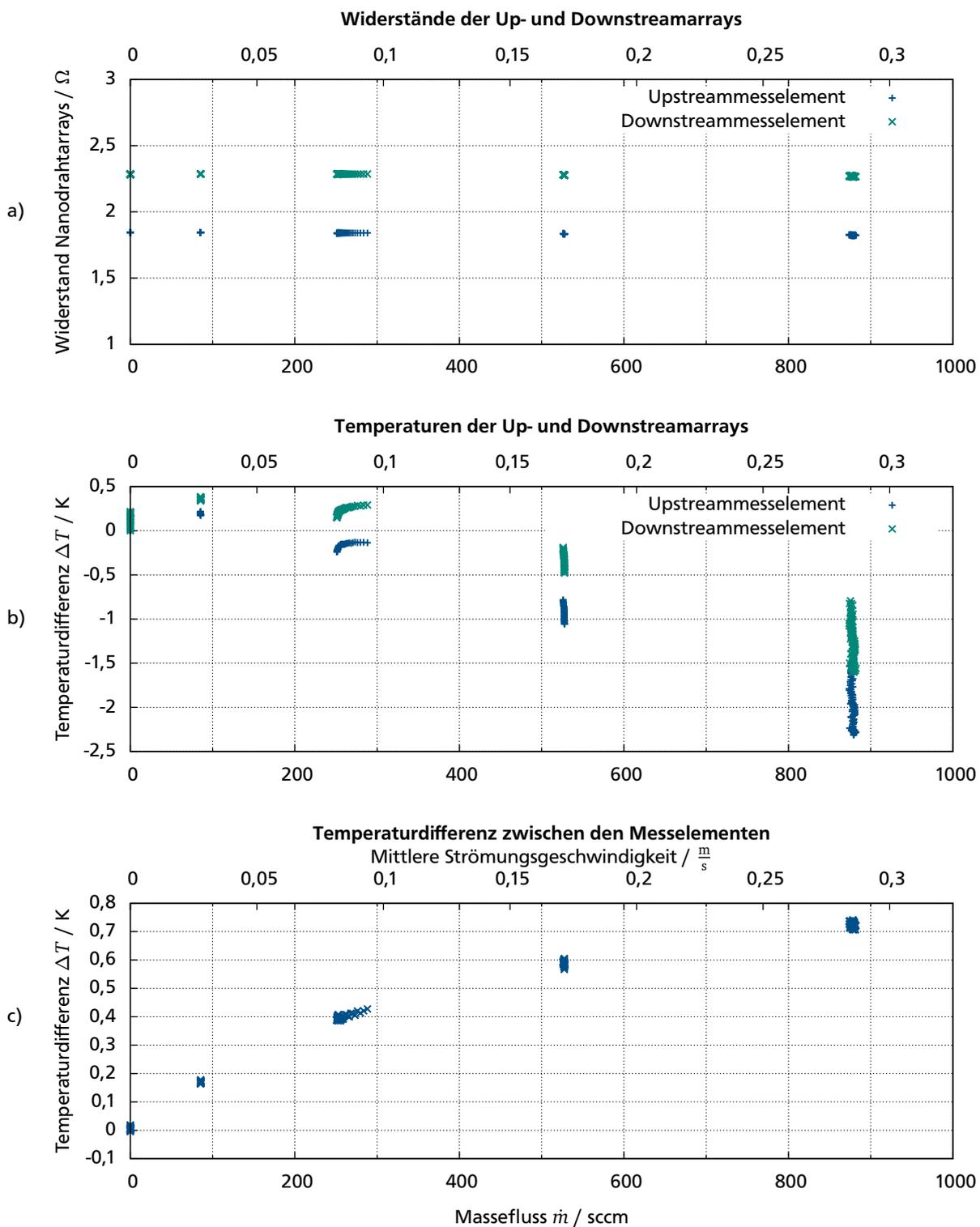


**Abbildung 7.3:** Strömungskanal der ersten Generation zur statischen Charakterisierung der Sensorelemente

Der strömungsabhängige Widerstand der Messelemente wird mittels einer 4-Leitermessung bestimmt. Mit Hilfe eines Nadelventils und des Referenzflussmessers wird ein definierter Gasfluss eingestellt mit welchem die Widerstandswerte in Bezug gesetzt werden. Der verwendete Referenzsensor Honeywell AWM 3300 ermöglicht die Messung von Masseflüssen von 0-1000 sccm (Luft). Das entspricht einer mittleren Strömungsgeschwindigkeit oberhalb des Sensorelementes von etwa  $0,33 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  (vgl. Abschnitt 6.4.1). Für die Versuche wurde die Heizleistung auf  $P_{\text{El}} = 150 \text{ mW}$  festgelegt.

### 7.2.1 Sensorelemente mit Nanodrahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren

Abbildung 7.4 zeigt die aufgenommenen Messwerte für ein Sensorelement mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren. Das Messelement entspricht dabei dem in Abschnitt 6.1 dargestellten. Es verfügt über je zwei in Reihe geschaltete Nanodrahtarrays, die in Up- und Downstreamposition platziert werden (vgl. Abbildung 6.3).



**Abbildung 7.4:** Messwerte für ein Sensorelement mit Drahtarrays aus dem Ionensputzverfahren nach Abschnitt 6.1 in Abhängigkeit des Massestroms, a) gemessene Widerstände für die Upstream und Downstream-Arrays, b) berechnete Temperaturdifferenz zur Ruhetemperatur, c) Temperaturdifferenz in Abhängigkeit des Massestroms. Dies entspricht der Kennlinie des Sensorelementes in dem Strömungskanal

---

Der Grundwiderstand der beiden in Reihe geschalteten Upstreamarrays beträgt demnach ca.  $1,8425 \Omega$ , was  $0,92125 \Omega$  pro Array entspricht (unter Vernachlässigung des Widerstandes der Brücke). Für das Downstreammesselement beträgt der Widerstand beider Arrays ca.  $2,285 \Omega$  was  $1,1425 \Omega$  pro Array entspricht. Damit sind die tatsächlichen Widerstände der Arrays mehr als doppelt so hoch wie der berechnete. Das hat im Wesentlichen zwei Gründe:

1. Der spezifische elektrische Widerstand von galvanisch abgeschiedenen Nickel ist höher als der von Bulkmaterial, der in der Abschätzung in Abschnitt 6.1 angenommen wurde.
2. Nicht alle Drähte innerhalb des Arrays sind gewachsen.

Der resultierende Widerstandsunterschied macht eine einfache Differenzbildung unmöglich. Mit der in Abschnitt 7.1 dargestellten Beziehung können die Widerstandswerte jedoch in Temperaturdifferenzen zum Ruhewert umgerechnet werden, was in Abbildung 7.4 b) dargestellt ist. Die Differenz dieser Werte ist automatisch offsetbereinigt und stellt die Sensorkennlinie dar. Sie ist in Abbildung 7.4 c) dargestellt.

Der Vergleich mit der numerischen Modellierung (vgl. Abschnitte 6.4.2 und 6.4.3) zeigt: Die tatsächlich gemessene maximale Temperaturdifferenz liegt bei  $\Delta T = 0,7 \text{ K}$  für  $\dot{m} = 880 \text{ sccm}$  (Abbildung 7.4 c)) und ist damit niedriger als die, die ohne Berücksichtigung der Messelemente numerisch ermittelt wurde ( $\Delta T = 1,2 \text{ K}$  für  $\dot{m} = 880 \text{ sccm}$ , vgl. Abbildung 6.14 b)). Das wurde auf Grund der guten thermischen Kopplung der Drahtarrays mit dem Substrat auch vermutet.

Die gemessene Temperaturdifferenz ist jedoch höher als die in der Simulation, bei der die Submikrodrähte Berücksichtigung finden, berechnete ( $\Delta T = 0,4 \text{ K}$  für  $\dot{m} = 880 \text{ sccm}$ , vgl. Abbildung 6.17 b)). Das hat mehrere Gründe. Durch das nicht optimale Rechnetz (Festkörper) sollte nicht zu viel Vertrauen in die Genauigkeit der simulierten Werte gelegt werden. Weiterhin steigert die Brücke, die beide Arrays miteinander verbindet und in der Simulation nicht berücksichtigt wurde, die gemessene Temperaturdifferenz. Sie ist durch die Drähte vom Substrat getrennt und ändert ihren Widerstand ebenfalls in Abhängigkeit der Strömung. Diese Änderung wird nicht kompensiert, sondern hat einen maßgeblichen Anteil am Messwert. Daher erscheint das Sensorelement besser, als in der Konzeptionsphase vermutet wurde.

Die erste Vorstellung des Systems wurde in [85] vorgestellt. Eine Möglichkeit zur Messung der Arraywiderstände mit Kompensation der Brücke hat der Autor in [87] vorgestellt.

---

## 7.2.2 Sensorelemente mit Submikrodrähten aus dem Ätzkantenverfahren

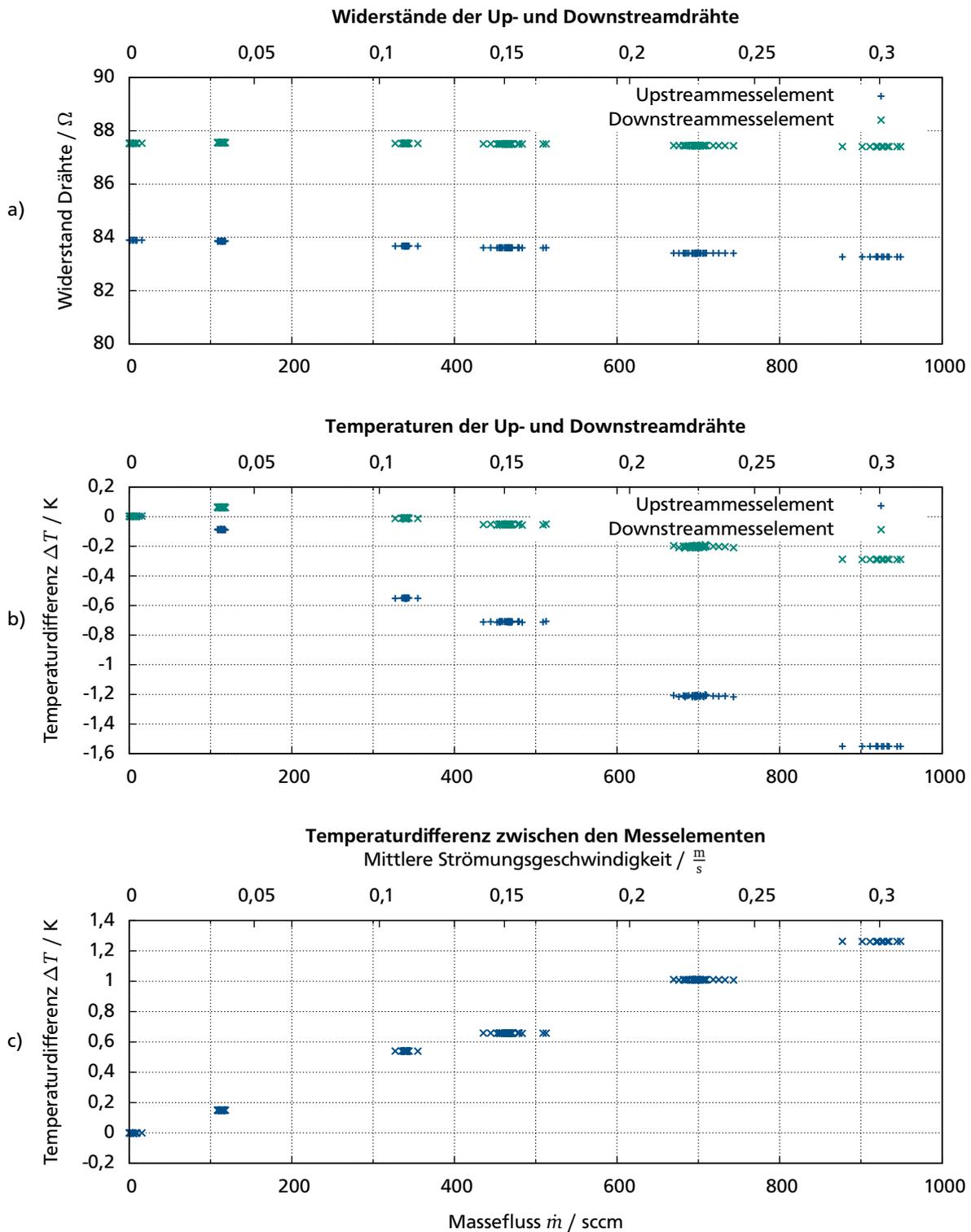
---

Der gleiche Versuch wurde nochmal mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren durchgeführt. Die Messergebnisse zeigt Abbildung 7.5.

Der Grundwiderstand der Drähte liegt bei  $83,8$  bzw.  $83,9 \Omega$ . Die Drähte haben einen Querschnitt von  $2 \times 0,2 \mu\text{m}$  und eine Länge von  $500 \mu\text{m}$ . Die Widerstandswerte für die beiden Messelemente liegen deutlich näher beieinander, was darauf zurückzuführen ist, dass das Ätzkantenverfahren reproduzierbarer durchzuführen ist als das templatbasierte Ionenspurätzverfahren. Es ist zu erkennen, dass die gemessene Temperaturdifferenz deutlich größer ist, als die die auf dem Sensorelement mit den Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren gemessen wurde. Das liegt an der besseren thermischen Entkopplung der Drähte vom Substrat. Die Steigerung dieser Messwerte bringt eine deutliche Steigerung der Sensitivität des Sensorelementes mit sich. Die gemessenen Werte liegen in sehr guter Übereinstimmung mit der in Abschnitt 6.4.2 durchgeführten Simulation ohne Berücksichtigung der Messelemente. Das zeigt, wie gut die Messelemente tatsächlich vom Substrat isoliert sind. Zu beobachten ist jedoch eine stärkere Abkühlung beider Messelemente als in der Simulation vorhergesagt. Das liegt an den verwendeten Multimetern: Der Messstrom, den die Geräte zur Messung des Widerstandes einsetzen ist mit  $1 \text{ mA}$  so hoch, dass eine Eigenwärmung der Messelemente gerechnet werden muss (nähere Betrachtung im nächsten Abschnitt).

---

Die Strömung kühlt die Messelemente wieder ab, so dass dem durch das Heizelement verursachten kalorimetrischen Messeffekt ein anemometrischer Effekt durch die Abkühlung Messdrähte überlagert ist. Der gemessene Grundwiderstand von ca.  $84 \Omega$  liegt nahe an dem theoretisch berechneten ( $86,6 \Omega$ ). Er ist etwas niedriger was den Schluss nahe legt, dass der Querschnitt der Drähte in Wirklichkeit etwas höher ist als gewünscht.

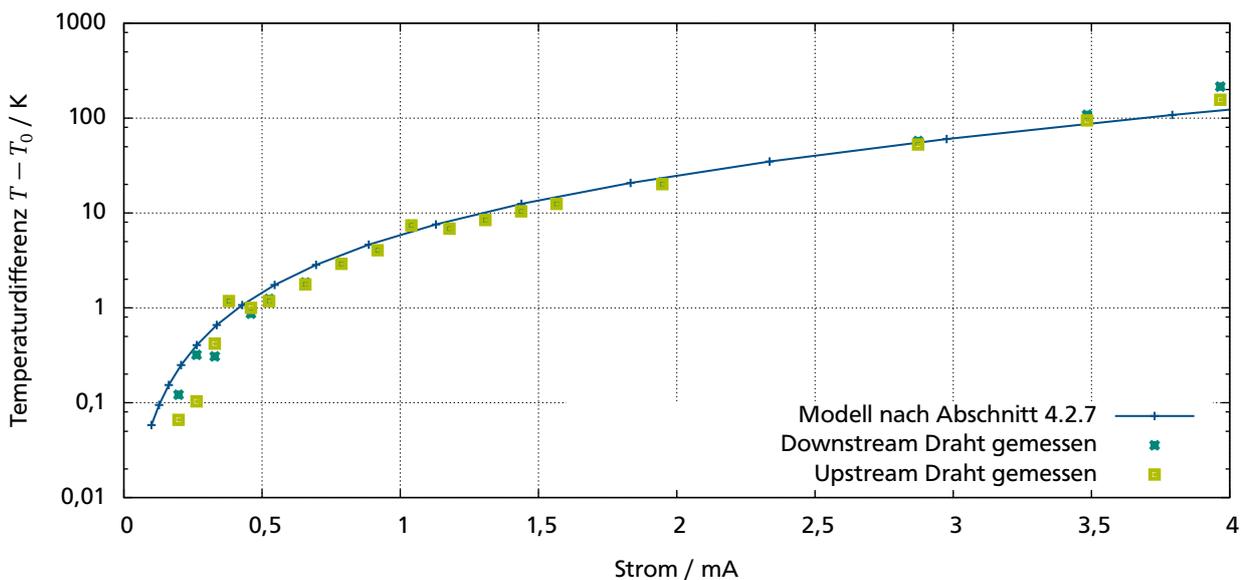


**Abbildung 7.5:** Messwerte für ein Sensorelement mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren nach Abschnitt 6.2 in Abhängigkeit des Massestroms, a) gemessene Widerstände für die Upstream- und Downstreamdrähte, b) berechnete Temperaturdifferenz zur Ruhetemperatur, c) Temperaturdifferenz in Abhängigkeit des Massestroms. Dies entspricht der Kennlinie des Sensorelementes in dem Strömungskanal

### 7.2.3 Fazit aus der Erfassung der statischen Kennlinie

Mit den Messungen wurde der Nachweis erbracht, dass mit beiden Verfahren beidseitig kontaktierte Drähte mit Abmessungen im Submikrometerbereich hergestellt werden können. Eine Strömungskennlinie konnte mit beiden Messelementen aufgenommen werden. Die theoretischen Annahmen sehen sich jedoch bestätigt: Das Ätzkantenverfahren eignet sich besser zur Herstellung von Submikrodrähten für die Strömungssensorik, da die Sensitivität deutlich höher ist. Das ist vor allem darauf zurück zu führen, dass die mit diesem Verfahren hergestellten Drähte länger sind, was sich in einer besseren thermischen Entkopplung mit dem Substrat und in einem höheren Grundwiderstand niederschlägt. Letzterer ermöglicht eine einfachere Messung der Widerstandsänderung durch die strömungsinduzierte Änderung der Temperatur. Die in diesem Abschnitt vorgestellten Charakteristika wurden mit einem Digitalmultimeter (NI PXI-4070 und NI PXI 4072) aufgenommen. Das hat im Wesentlichen zwei Auswirkungen auf die Messung:

1. Das Digitalmultimeter nimmt bei einer Genauigkeit von 6,5 Stellen nur maximal 5 Werte pro Sekunde auf. Damit kann das dynamische Verhalten der Sensoren nicht gemessen werden.
2. Bei den zu messenden Widerständen verwenden die Digitalmultimeter einen Messstrom von 1 mA. Bei diesem Strom ist bereits mit einer signifikanten Eigenerwärmung zu rechnen, vgl. Abbildung 7.6. Dieser Effekt fällt nur bei den deutlich längeren Drähten, die mit dem Ätzkantengalvanikverfahren erzeugt wurde, ins Gewicht.



**Abbildung 7.6:** Eigenerwärmung der Messdrähte aus dem Ätzkantenverfahren (Länge, 500  $\mu\text{m}$ ) auf Grund des Messstroms. Der vom Digitalmultimeter eingepreiste Messstrom beträgt 1 mA. Bei diesem Strom erwärmt sich der Draht bereits um ca. 8 K. Das führt zu einer Verfälschung der Messkurve, was sich in einem stärkeren Abkühlungseffekt des Sensors bemerkbar macht.

Nichtsdestotrotz eignet sich ein Digitalmultimeter zur statischen Charakterisierung der Messelemente. Beim Vergleich mit den durch das numerische Modell gewonnenen Daten muss der Eigenerwärmungseffekt der Drähte jedoch berücksichtigt werden. Dafür bietet die Charakterisierung mit einem Digitalmultimeter eine integrierte Kompensation von Zuleitungswiderständen und Thermospannungen, zudem weist die Messung ein sehr geringes Rauschen auf. Die Messung und Analyse der beiden Drahtarray-

---

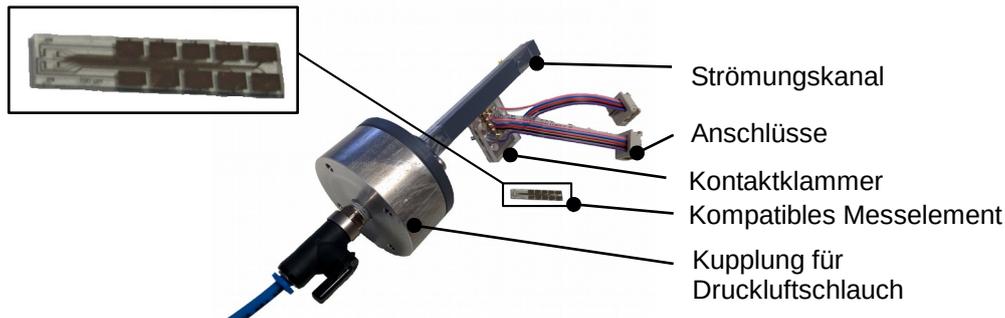
bzw. Drahtwiderstände nach Up- und Downstream getrennt ermöglicht zudem eine rechnerische Kompensation fertigungsbedingter Widerstandsunterschiede.

---

### 7.3 Charakterisierung von Mustern der zweiten Generation

---

Im Verlauf der Arbeit wurde eine zweite Generation eines Strömungskanals mit den dafür zugeschnittenen Sensorelementen realisiert (vgl. Abschnitt 6.5). Das realisierte Muster ist in Abbildung 7.7 dargestellt.



**Abbildung 7.7:** Strömungskanal und Messelement der zweiten Generation. Die Kontaktierung der rechteckigen Messelemente erfolgt durch eine Kontaktklammer, die Anschlüsse sind mittels Flachbandkabel nach außen geführt. Das ermöglicht den einfachen Tausch der Messelemente.

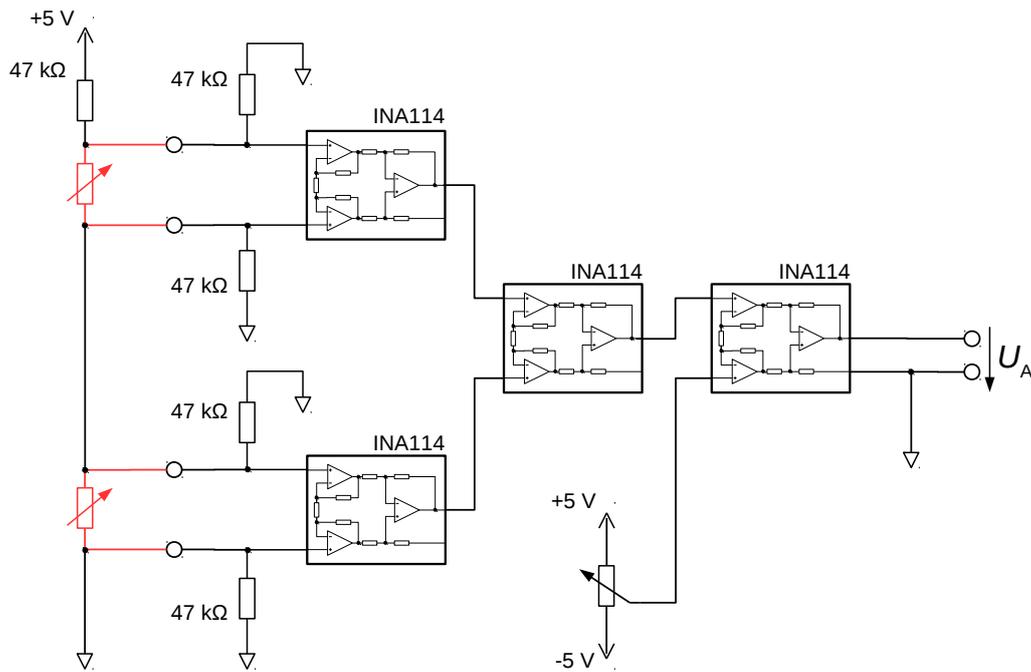
---

#### 7.3.1 Sensorelektronik

---

Da die Multimeter nicht geeignet sind, um das dynamische Verhalten des Sensors zu messen, wird im Folgenden eine einfache Verstärkerschaltung aufgebaut. Ein grundlegendes Konzept einer solchen Messschaltung wird in [89] verwendet um einen Time-of-Flight Sensor zu realisieren. Die in [89] vorgestellte Schaltung sieht vor, je einen Messwiderstand in einer Viertelbrücke anzuordnen. Das ist im Fall dieser Arbeit nicht realisierbar, da auf Grund der langen Zuleitungen auf dem Chip eine 4-Punktmessung wie in Abschnitt 7.2 zur Bestimmung des Drahtwiderstandes notwendig ist. Die realisierte Messschaltung ist in Abbildung 7.8 beschrieben.

Die Schaltung ist so gestaltet, dass Sensoren der zweiten Generation (vgl. Abschnitt 6.5) verwendet werden können. Über zwei Anschluss pads wird der Messstrom zur Messung des Widerstands eingepreßt. Der Messstrom wird dabei so gewählt, dass noch keine Eigenerwärmung des Drahtes stattfindet (vgl. Abbildung 7.6). Ein Messstrom von  $I_{\text{Mess}} = 100 \mu\text{m}$  erweist sich als ausreichend klein, um eine Eigenerwärmung zu verhindern, und liefert gleichzeitig einen für die Messung ausreichenden Spannungsabfall über dem Messdraht (bei einem Drahtgrundwiderstand von  $100 \Omega$  beträgt der Spannungsabfall über dem Widerstand dann  $10 \text{ mV}$ ). Dieser Spannungsabfall wird von je einem Instrumentationsverstärker verstärkt. Dabei wird die Verstärkung möglichst hoch gewählt, ohne dass der Verstärker voll aussteuert. Die zweite Verstärkerstufe bildet dann die Differenz zwischen den Spannungen. Ein Eingang der dritten Verstärkerstufe ist neben der Ausgangsspannung der zweiten Verstärkerstufe mit einer einstellbaren Referenzspannung beaufschlagt. Diese wird so eingestellt, dass die Differenz am Eingang des Instrumentationsverstärkers im Ruhefall (keine Strömung) 0 beträgt. Das ermöglicht eine hohe Wahl des Verstärkungsfaktors dieser Stufe. Die Spannung  $U_A$  wird anschließend mittels einer Messkarte am PC eingelesen und verstärkt.



**Abbildung 7.8:** Verstärkerschaltung zu Verstärkung der gemessenen Spannungen an Up- und Downstreamwiderstand; die erste Verstärkerstufe verstärkt direkt die Spannung die durch einen Messstrom am Widerstand hervorgerufen wird. Die zweite Verstärkerstufe bildet die Differenz zwischen der Up- und Downstreamspannung. Die Dritte Verstärkerstufe dient zur Nullpunkteinstellung und Verstärkung. Die Nullpunkteinstellung ermöglicht das Einstellen einer höheren Verstärkung ohne dass die Instrumentationsverstärker voll aussteuern. Zudem kann der nachgeschaltete Analog-Digitalwandler voll ausgenutzt werden.

Der Nachteil der Schaltung ist, das Rauschen und Störungen mit verstärkt werden. Daher muss nach der Digitalisierung eine dem Messszenario angepasste Filterung der Daten durchgeführt werden. Die Signalverarbeitung wird in den dazugehörigen Unterkapiteln dargestellt. Im Zuge der Arbeit werden nur Sensoren, die mit dem Ätzkantengalvanikverfahren hergestellt wurden, in dem Strömungskanal der zweiten Generation mit der vorgestellten Elektronik charakterisiert. Das gesamte System, bestehend aus Messelement, Strömungskanal und Elektronik kann als *Sensor-Elektronik-System* bezeichnet werden.

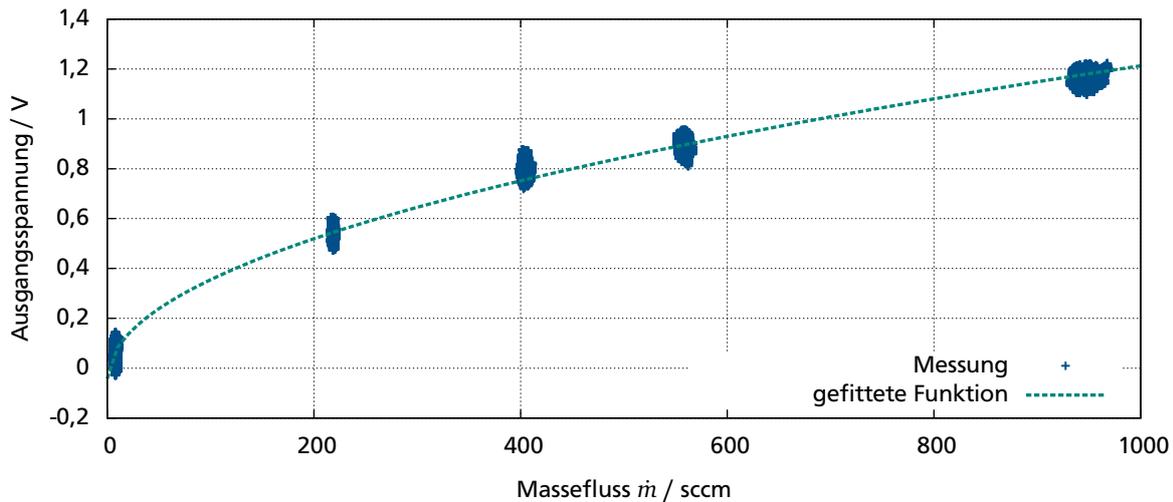
### 7.3.2 Statische Kennlinie

Zunächst wird die statische Kennlinie des Sensor-Elektronik-Systems aufgenommen. Zur Messung wird der gleiche Referenzsensor verwendet, wie bei der Charakterisierung von Sensorelementen der ersten Generation, der AWM 3300 aus dem Hause Honeywell. Abbildung 7.9 zeigt die gemessene Kennlinie des Systems.

Die Kennlinie des Sensor-Elektronik-Systems lässt sich mit der Funktion

$$U_A = A + B \cdot \left( \frac{\dot{m}}{\dot{m}_0} \right)^{0,5}$$

mit  $\dot{m}_0 = 1 \text{ sccm}$  anpassen. Die Koeffizienten wurden zu  $A = -0,0419979 \text{ V}$  und  $B = 0,0396812 \text{ V}$  bestimmt, womit sich die Kennlinie des Sensor-Elektronik-Systems geschlossen darstellen lässt. Das cha-



**Abbildung 7.9:** Kennlinie eines Sensor-Elektronik-Systems mit Drähten aus dem Ätzkantengalvanik-Verfahren. Die Drähte haben eine Länge von  $300 \mu\text{m}$  sowie einen Querschnitt von  $0,2 \times 2 \mu\text{m}$ . Der Heizstrom beträgt  $50 \text{ mA}$ .

Das charakterisierte Messelement verfügt über zwei Drähte als sensitive Messelemente, die einen Querschnitt von  $0,2 \times 2 \mu\text{m}^2$  sowie eine Länge von  $300 \mu\text{m}$  aufweist. Das Heizelement ist in Dünnschichttechnik realisiert, hat eine Dicke von etwa  $200 \text{ nm}$  und eine Breite von  $50 \mu\text{m}$ . Der Heizstrom beträgt  $50 \text{ mA}$ .

Wie bereits in der numerischen Modellierung des Systems (vgl. Abschnitt 6.5) gezeigt wurde, ist das System vor allem im Bereich kleiner als  $\dot{m} = 500 \text{ sccm}$  empfindlich.

### 7.3.3 Dynamische Charakterisierung

Der in Abschnitt 6.6 dargestellte Aufbau wird zur dynamischen Charakterisierung des Sensor-Elektronik-Systems genutzt. Der Lautsprecher (Visaton BG 13 P) wird direkt an einen Funktionsgenerator angeschlossen, die Ausgangsamplitude beträgt in allen Fällen  $10 \text{ V}$ . Die Frequenz wird zwischen  $0,05$  und  $500 \text{ Hz}$  variiert. Untersucht wird lediglich, ob sich die erzeugte Schwingung im Ausgangssignal des Sensorsystems nachweisen lässt, eine quantitative Analyse des Übertragungsverhaltens ist nachfolgenden Arbeiten vorbehalten.

#### 7.3.3.1 Frequenzen bis $1 \text{ Hz}$

Zunächst werden Frequenzen bis  $1 \text{ Hz}$  untersucht. Da das Signal starke Störungen aufweist wird nach der Digitalisierung eine Tiefpassfilterung durchgeführt. Hierfür wird ein elliptisches Tiefpassfilter dritter Ordnung gewählt, das eine besonders hohe Flankensteilheit aufweist. Die Messergebnisse sind in Tabelle 7.1 dargestellt. Der Offset, den die Messungen aufweisen ist darin begründet, dass sich der Nullpunkt nicht optimal einstellen lässt. Wie zu erkennen ist, lassen sich niedrige Frequenz bis  $0,05 \text{ Hz}$  sehr gut nachweisen. Die sinusförmigen Anregungen von  $f_A = 0,5 \text{ Hz}$  und  $f_A = 0,1 \text{ Hz}$  werden auch als Sinusfunktion mit derselben Frequenz abgebildet (siehe Zeilen 1 und 2 in Tabelle 7.1). Bei einer Anregung von  $f_A = 1 \text{ Hz}$  entsteht zusätzlich eine Oberschwingung mit der doppelten Frequenz (siehe dritte Zeile in Tabelle 7.1). Dieses unerwünschte Verhalten kann mehrere Gründe haben: zum einen variieren die Grundwiderstände der Messdrähte, was durch die Elektronik nicht abgebildet werden kann. Zum anderen kann es sein, dass ein Draht beschädigt ist, und auf dem Substrat aufliegt. Dadurch verändert sich

**Tabelle 7.1:** Sensorsignal bei unterschiedlichen Frequenzen bis 1 Hz. Bei einer Anregungsfrequenz von  $f_A = 1$  Hz zeigt sich, dass das System keine monotone Kennlinie aufweist. Im Frequenzbereich äußert sich dies durch eine zusätzliche Oberschwingung bei der doppelten Frequenz. Der Offset der Messwerte liegt an einem unzureichenden Nullpunktgleich in der Elektronik.

Anregung	Ausgangssignal
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 0,05</math> Hz</li> <li>Tiefpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_C = 0,5</math> Hz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 0,1</math> Hz</li> <li>Tiefpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_C = 1</math> Hz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 1</math> Hz</li> <li>Tiefpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_C = 10</math> Hz</li> </ul>	

sein Verhalten derart, dass die Kennlinie des Sensor-Elektronik-Systems nicht mehr streng monoton fallend, bzw. steigend ist, und sich das Signal bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit umkehrt. Ein weiterer Grund kann sein, dass ein Draht deutlich dünner ist als beabsichtigt und damit wieder eine Eigenerwärmung des betroffenen Drahtes vorliegt. In diesem Fall ist dem kalorimetrischen Messeffekt wieder ein anemometrischer überlagert, der für Oberschwingungen mit der doppelten Frequenz sorgt. Die dynamische Charakterisierung wird daher im Folgenden für einen einzelnen Draht durchgeführt, da ein Großteil des Signals vom Upstream-Draht erzeugt wird (siehe Abbildung 6.21).

Nichtsdestotrotz kann mit dem Demonstrationssystem nachgewiesen werden, dass der Sensor auch bei sehr niedrigen Strömungsgeschwindigkeiten bzw. -frequenzen noch ein gut messbares Signal erzeugt.

Die Messelemente mit den dünnen Drähten sind damit empfindlich genug, um auch sehr kleine bzw. langsame Strömungen zu messen.

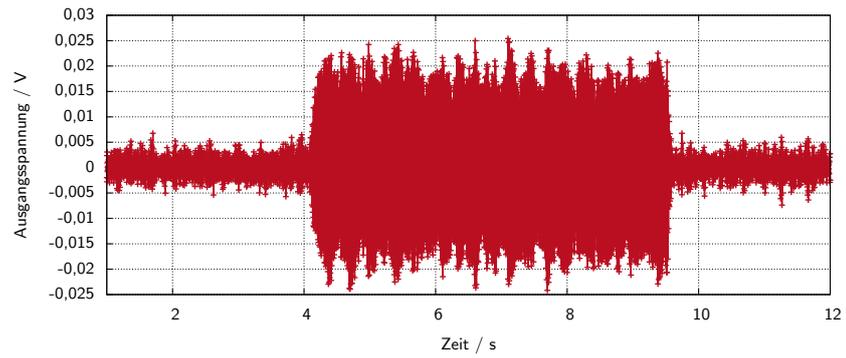
### 7.3.3.2 Dynamische Charakterisierung für höhere Frequenzen

Wie im vorherigen Abschnitt dargestellt, wird das dynamische Verhalten bei hohen Frequenzen nur mit einem Draht gemessen. Dazu wird die differenzbildende Verstärkerstufe (vgl. Abbildung 7.8) überbrückt und die erste Verstärkerstufe direkt mit der Stufe zum Nullpunktgleich verbunden. Da das Ausgangssignal stark gestört ist wird nach der Digitalisierung eine Bandpassfilterung durchgeführt. Hierfür wird ein elliptisches IIR-Filter dritter Ordnung verwendet. Die Messergebnisse sind in Tabelle 7.2 dargestellt.

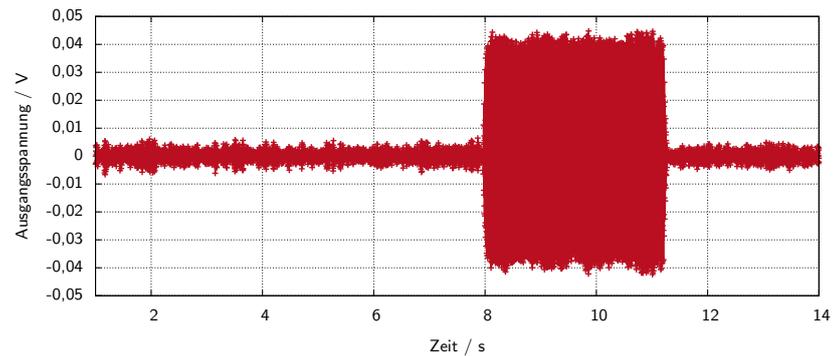
**Tabelle 7.2:** Sensorsignal für Anregungsfrequenzen bis 700 Hz. Es ist gut zu erkennen, dass sich Signale bis 500 Hz nachweisen lassen. Die Messungen werden nur mit einem einzelnen Submikro-Messdraht durchgeführt.

Anregung	Ausgangssignal
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 10</math> Hz</li> <li>Bandpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_{C,U} = 8</math> Hz, <math>f_{C,O} = 12</math> Hz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 100</math> Hz</li> <li>Bandpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_{C,U} = 98</math> Hz, <math>f_{C,O} = 102</math> Hz</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Anregungsfrequenz <math>f_A = 200</math> Hz</li> <li>Bandpassfilterung, Grenzfrequenz <math>f_{C,U} = 198</math> Hz, <math>f_{C,O} = 202</math> Hz</li> </ul>	

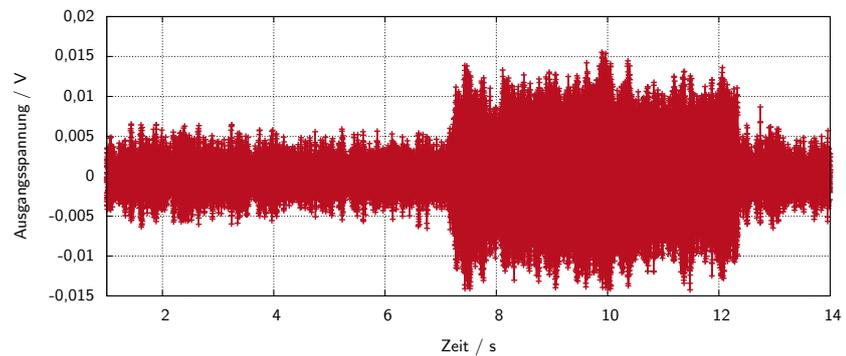
- Anregungsfrequenz  
 $f_A = 300 \text{ Hz}$
- Bandpassfilterung ,  
Grenzfrequenz  $f_{C,U} = 298 \text{ Hz}$ ,  $f_{C,O} = 302 \text{ Hz}$



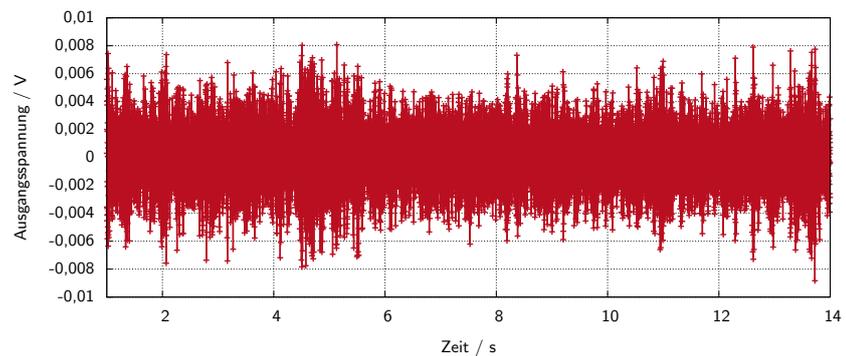
- Anregungsfrequenz  
 $f_A = 400 \text{ Hz}$
- Bandpassfilterung ,  
Grenzfrequenz  $f_{C,U} = 398 \text{ Hz}$ ,  $f_{C,O} = 402 \text{ Hz}$

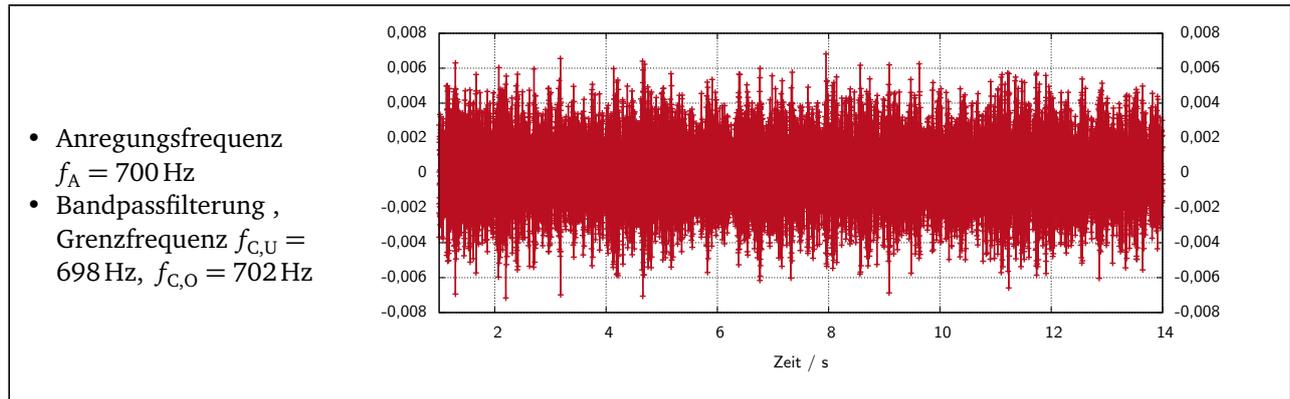


- Anregungsfrequenz  
 $f_A = 500 \text{ Hz}$
- Bandpassfilterung ,  
Grenzfrequenz  $f_{C,U} = 498 \text{ Hz}$ ,  $f_{C,O} = 502 \text{ Hz}$



- Anregungsfrequenz  
 $f_A = 600 \text{ Hz}$
- Bandpassfilterung ,  
Grenzfrequenz  $f_{C,U} = 598 \text{ Hz}$ ,  $f_{C,O} = 602 \text{ Hz}$





Es ist zu erkennen, dass sich Frequenzen bis zu  $f_A = 500 \text{ Hz}$  gut nachweisen lassen. Der Zeitpunkt, an dem der Lautsprecher angeschaltet wurde ist deutlich detektierbar. Die höchste Ausgangsamplitude liefern Frequenzen um  $f_A = 10 \text{ Hz}$  mit  $U_A \approx 60 \text{ mV}$  und  $f_A = 400 \text{ Hz}$  mit  $U_A \approx 40 \text{ mV}$ . Im Bereich dieser Frequenzen scheint eine Resonanzüberhöhung vorzuliegen. Die übrigen Frequenzen liefern alle eine ähnliche Ausgangsamplitude von  $U_A \approx 30 \text{ mV}$ . Eine Anregungsfrequenz von  $f_A = 500 \text{ Hz}$  liefert eine Ausgangsamplitude von  $U_A = 13 \text{ mV}$ , womit sich bereits eine Abschwächung abzeichnet. Für höhere Frequenzen ließ sich kein Signalanteil mehr vom Grundrauschen von  $5 \text{ mV}$  trennen.

Als abschließende Beurteilung lässt sich damit sagen, dass Frequenzen bis  $f_A = 500 \text{ Hz}$  nachweisen lassen. Die Frequenzabhängigkeit des Lautsprecher-Strömungskanal-Systems wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Das ist jedoch notwendig, um eine quantifizierte Charakterisierung durchzuführen, so dass die in diesem Abschnitt vorgestellten Ergebnisse nur qualitativ zu verstehen sind.

---

## 7.4 Fazit

---

In Kapitel 6 wurden Konzepte vorgestellt, mit denen aus den Prozessen zur Submikrodrahterzeugung kalorimetrische Strömungssensoren erzeugt werden können. Diese Konzepte wurden in diesem Kapitel umgesetzt und charakterisiert. Dabei wurden sowohl Messelemente mit Drähten aus dem Ionenspurätzverfahren, als auch Drähte aus dem Ätzkantengalvanikverfahren erzeugt. Diese Messelemente wurden im ersten Schritt auf TO-8 Sockel montiert und in einen dafür konstruierten Strömungskanal platziert. Die Auswertung der statischen Kennlinie erfolgt in diesem Fall mit Digitalmultimetern zur Bestimmung des Up- und Downstream-Widerstandes. Dabei zeigte sich, dass sowohl mit Drahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren als auch mit Einzeldrähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren einen messbaren, strömungsabhängigen Widerstand aufweisen. Sowohl die Modellierung als auch die Charakterisierung verdeutlichten, dass Drahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren grundsätzliche Nachteile gegenüber Drähten aus dem Ätzkantenverfahren aufweisen:

1. Die Platzierung der Drähte ist statistisch, daher können nur Drahtarrays verwendet werden. Die Drähte können daher nicht mikrometergenau platziert werden.
2. Die Grundwiderstände der verwendeten Arrays liegen im einstelligen Ohmbereich, was die Messung vergleichsweise störanfällig macht. Abhilfe schafft nur die Reihenschaltung sehr vieler Drahtarrays, was nach derzeitigen Abschätzungen der Prozesszuverlässigkeit die Ausbeute stark verringert.
3. Die Drahtlänge ist auf  $100 \text{ }\mu\text{m}$  beschränkt. Selbst diese Drahtlänge ist nur erreichbar, wenn Templatfolien, die am GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung in Darmstadt bestrahlt wurden, verwendet werden. Diese sind jedoch kommerziell nicht verfügbar. Kommerziell verfügbar

waren zum Zeitpunkt der Arbeit nur Templatfolien, die eine maximale Drahtlänge von  $25\ \mu\text{m}$  erlauben. Das verringert die Sensitivität des Sensors (vgl. Abschnitt 4.2.9.1) und erhöht den Einfluss von Temperaturschwankungen im Substrat sehr stark.

Die geringere Sensitivität der Drahtarrays gegenüber den Einzeldrähten zeigt sich direkt in der statischen Kennlinie des Messelementes: Die strömungsinduzierte Temperaturdifferenz zwischen Up- und Downstreammesselement ist bei den Messelementen mit Einzeldrähten aus dem Ätzkantengalvanikverfahren etwa doppelt so hoch wie bei Messelementen mit Drahtarrays aus dem Ionenspurätzverfahren.

Für die Strömungssensorik erweist sich das Konzept der Ätzkantengalvanik daher als das deutlich tragfähigere. Zum einen ist die Drahtlänge praktisch unbegrenzt, zum anderen müssen keine Drahtarrays verwendet werden, sondern es können mikrometergenau platzierte Einzeldrähte erzeugt werden. Daher wurde die zweite Sensorelement-Generation nur mit Ätzkantengalvanik-Sensoren realisiert. Mit den Elementen der zweiten Generation wurde eine qualitative dynamische Charakterisierung durchgeführt. Oszillierende Gasströmungen zwischen 0,05 Hz und 500 Hz konnten erfasst werden. Das zeigt die hohe Dynamik der Messdrähte. Tabelle 7.3 zeigt eine Zusammenfassung der Charakterisierungsergebnisse.

**Tabelle 7.3:** Zusammenfassung der Charakterisierung der Messelemente

Größe	Ionenspurgeätzte Drahtarrays	Ätzkantengalvanik-Einzeldrähte
Arrayabmessungen	$30 \times 100\ \mu\text{m}^2$	
Drahtdichte	$1.6 \cdot 10^6\ \frac{1}{\text{cm}^2}$	
Drahtquerschnitt		$0,2 \times 2\ \mu\text{m}^2$
Drahtdurchmesser	$d = 400\ \text{nm}$	
Drahtlänge	$25\ \mu\text{m}$	$500\ \mu\text{m}$
Grundwiderstand	$1,84..2,28\ \Omega$	$84\ \Omega$
max. Temperaturdifferenz der Messelemente im Messbereich 0..1000 sccm	$0,7\ \text{K}$	$1,3\ \text{K}$
Nachweisbare Strömungsszillationsfrequenzen	Messung nicht durchgeführt	$0,05\text{-}500\ \text{Hz}$

In zukünftigen Arbeiten muss die Messelektronik verbessert werden, um die stärksten Störungen zu verhindern. Das Layout der zweiten Messelementgeneration weist noch einen Nachteil auf: Die Zuleitungen, die alle in Dünnschichttechnologie ausgeführt sind, sind vergleichsweise lang und weisen daher Widerstände im  $\text{k}\Omega$ -Bereich auf. Das erhöht die Störanfälligkeit und verhindert die Auswertung der Einzeldrahtwiderstände in einer Messbrücke, wie dies bei kalorimetrischen Strömungssensoren üblich ist. Ein verbessertes Layout- und Packaging-Konzept ist für eine Weiterführung der Arbeiten daher unerlässlich.

---

## 8 Fazit und Ausblick

---

In der vorliegenden Arbeit ist die Anwendung galvanisch erzeugter Drähte mit Durchmessern im Submikrometerbereich in Strömungssensoren untersucht worden. Dabei lassen sich die Ergebnisse in zwei Kategorien unterteilen. So ist es gelungen, das Ionenspurätzverfahren, welches zunächst nur die Drähte in einer Templatfolie erzeugt, so zu erweitern und zu modifizieren, dass sich Drähte direkt auf dem Substrat im Mikrosystem herstellen lassen. Das Ziel, leistungsfähige Strömungssensoren auf Basis dieses Verfahrens zu entwickeln hat sich jedoch als nicht tragfähig erwiesen so dass ein weiteres Verfahren, das Ätzflankengalvanikverfahren, weiterentwickelt und modifiziert wurde. Dieses ist für die Herstellung von Strömungssensoren wesentlich geeigneter als das Ionenspurätzverfahren. Zur Auslegung und Optimierung von Strömungssensoren mit den so hergestellten sehr dünnen Drähten wurden Modellierungsverfahren beleuchtet und entwickelt.

Das Fazit der Arbeit gliedert sich daher in drei Abschnitte:

1. Ergebnisse des Ionenspurätzverfahrens
2. Realisierung von Sensoren mit dem Ätzflankengalvanikverfahren
3. Modellierung von Strömungen durch bzw. um nanoskalige Strukturen

---

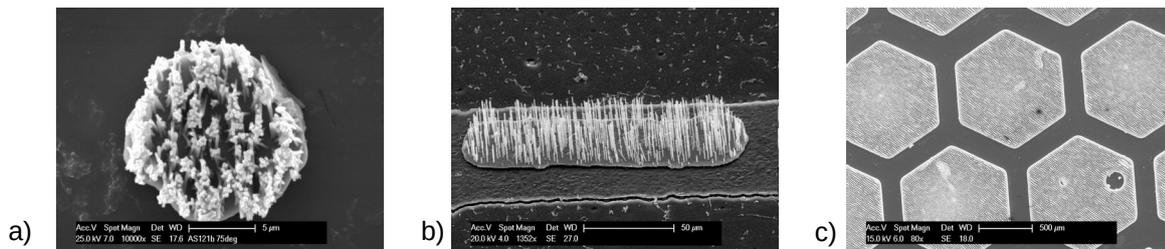
### 8.1 Ergebnisse und Möglichkeiten des Ionenspurätzverfahrens

---

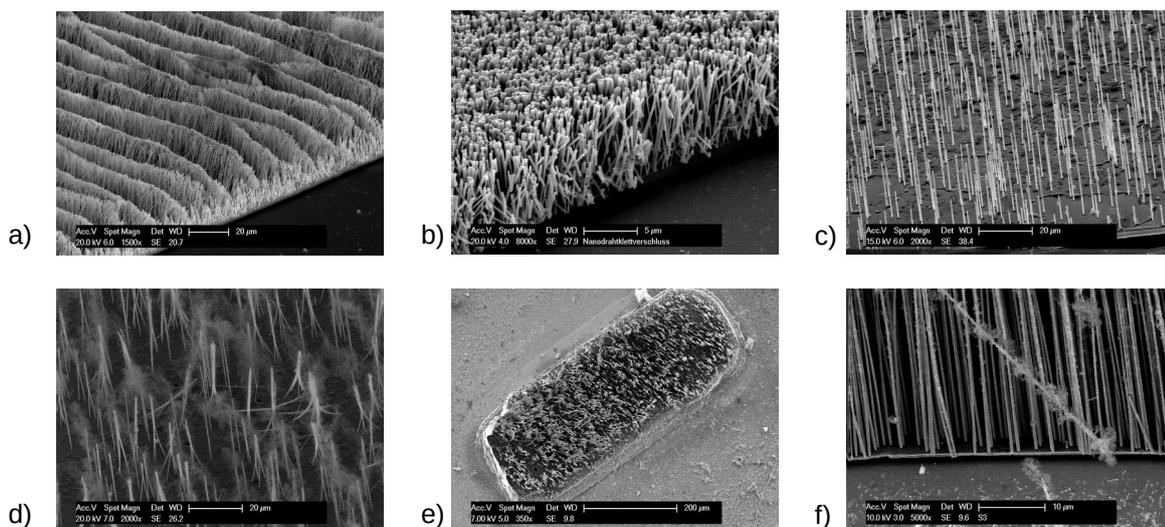
Das innerhalb dieser Arbeit entwickelte Integrationsverfahren für Nano- und Submikrodrähte aus dem Ionenspurätzverfahren zeichnet sich dabei durch folgende Eigenschaften aus:

- Alle Prozessschritte sind kompatibel zu gängigen Technologien der Mikrosystemtechnik. Die auftretenden Prozesstemperaturen liegen sämtlich unter 100°C (der wärmste Schritt ist der Softbake der verwendeten Photoresiste). Das ist ein zentraler Vorteil des Verfahren gegenüber z.B. der Vor-Ort-Erzeugung von Carbon-Nano-Tubes (CNTs). Dadurch besteht die Möglichkeit, die Drähte auf Substraten zu erzeugen, die z.B. über eine integrierte Elektronik verfügen. Aber auch die Verwendung von wärmeempfindlichen Substraten wie Polymerfolien ist mit diesem Prozess möglich.
- Die erzeugten Nanodrahtarrays können beliebige Grundrisse aufweisen, da die Strukturierung durch Photolithographie geschieht. Ebenso kann die Grundfläche der Nanodrahtarrays variiert werden. So können Grundflächen mit Durchmessern von nur einigen Mikrometern bis hin zu einigen Millimetern realisiert werden. Abbildung 8.1 zeigt Nanodrahtarrays, die auf einem Glassubstrat erzeugt wurden, mit unterschiedlichen Grundrissen.
- Das Verfahren ermöglicht eine weite Einstellung der geometrischen Eigenschaften der Nanodrähte bzw. Nanodrahtarrays. Es wurden Drahtdurchmesser von 100 nm bis 5 µm realisiert. Drahtlängen von 5 µm bis 100 µm konnten mit dem Verfahren erfolgreich integriert werden. Die Drahtdichten der Arrays reichen von  $2 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$  bis  $3 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , es wird also ein Bereich von mehr als zwei Größenordnungen abgedeckt. Abbildung 8.2 zeigt Nanodrahtarrays mit unterschiedlichen Parametern. Die Vielfältigkeit des Verfahrens ermöglicht die Adressierung vieler verschiedener Anwendungen (vgl. Abschnitt 8.1.1).
- Durch Verbindungsbrücken können einzelne Nanodrahtarrays in Reihe geschaltet werden. Dadurch ist eine beidseitige Kontaktierung der Nanodrähte gewährleistet. Abbildung 8.3 zeigt Brückenstrukturen, mit denen die beidseitige Kontaktierung von Nanodrahtarrays realisiert wurde.

- Prinzipiell lassen sich alle galvanisch abscheidbaren Metalle zur Synthese der Nanodrähte verwenden. In dieser Arbeit wurde das Verfahren mit Kupfer, Nickel und Gold durchgeführt. Auf Grund des hohen Temperaturkoeffizienten des elektrischen Widerstands ist Nickel das in dieser Arbeit am besten untersuchte Material.
- Durch den Aufbau eines potentiostatischen 3-Elektroden-Abscheidesystems können die Abscheidebedingungen sehr gut eingestellt und kontrolliert werden. Die Implementierung des Puls- bzw. Umkehrpulsabscheideverfahrens ermöglicht ein sehr gleichmäßiges galvanisches Wachstum der Drähte.

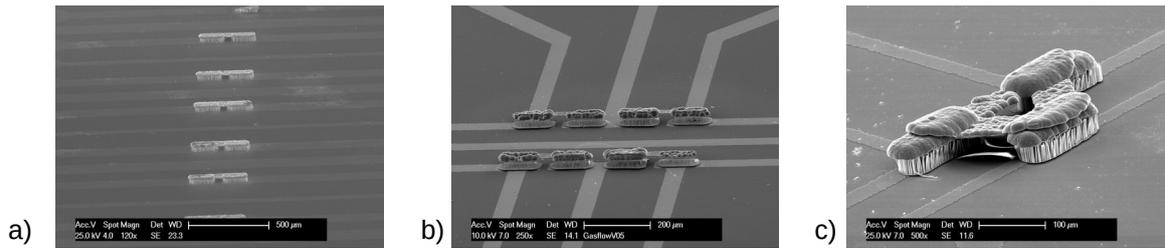


**Abbildung 8.1:** Die mit dem in der Arbeit entwickelten Prozess hergestellten Arrays können beliebige Grundrisse aufweisen: a) Array mit kreisförmigem Grundriss (Durchmesser des Arrays ca. 15 µm), b) ovales Array mit äußeren Abmessungen von 150 × 50 µm, c) wabenförmiges Array mit einem Durchmesser von 1 mm



**Abbildung 8.2:** Der entwickelte Prozess ermöglicht eine weite Variation der geometrischen Abmessungen der Drähte und ermöglicht damit das Erschließen einer großen Zahl unterschiedlicher Anwendungen. a) Drahtdurchmesser 100 nm, Drahtlänge 20 µm, Drahtdichte  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , b) Drahtdurchmesser 100 nm, Drahtlänge 10 µm, Drahtdichte  $3 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , c) Drahtdurchmesser 400 nm, Drahtlänge 25 µm, Drahtdichte  $1,6 \cdot 10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , Drahtdurchmesser 200 nm, Drahtlänge 25 µm, Drahtdichte  $2 \cdot 10^6 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , Drahtdurchmesser 1,5 µm, Drahtlänge 60 µm, Drahtdichte  $10^7 \frac{1}{\text{cm}^2}$ , Drahtdurchmesser 200 nm, Drahtlänge 100 µm, Drahtdichte  $10^8 \frac{1}{\text{cm}^2}$

Die große Prozess- und Materialvielfalt ermöglicht es daher, einen weiten Bereich zur Herstellung von Nanodrahtarrays abzudecken. Abbildung 8.2 zeigt Nanodrahtarrays, die unterschiedlichste Drahtdurchmesser, -längen sowie -dichten aufweisen. Die Arrays können prinzipiell beliebig groß (vgl. Abbildung 8.1) in der Grundfläche sein.



**Abbildung 8.3:** Durch Verbindungsbrücken können die Drahtarrays beidseitig kontaktiert werden. Dabei werden immer zwei Arrays in Reihe geschaltet; a) je zwei in Reihe geschaltete Nanodrahtarrays, b) durch den Prozess können auch mehr als zwei Arrays in Reihe geschaltet werden. Die Abbildung zeigt je vier in Reihe geschaltete Arrays, c) drei Arrays die durch eine Brücke verbunden sind. Mit diesem Aufbau kann der Widerstand eines einzelnen Arrays gemessen werden [87]

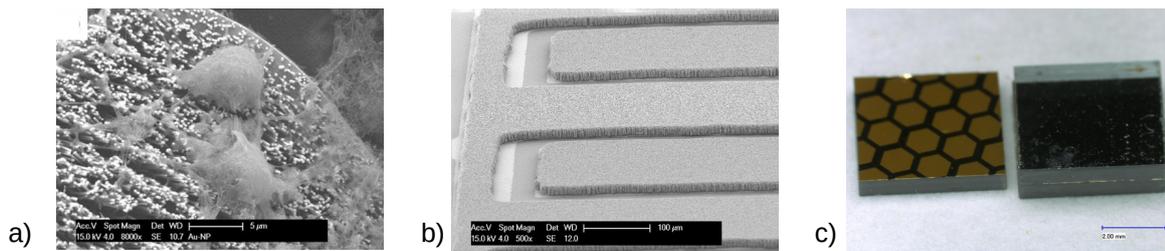
### 8.1.1 Weitere Anwendungen für das Ionensputzverfahren

Die Vielfältigkeit des Verfahrens ermöglicht es, sehr viele verschiedene Anwendungen zu adressieren. Nachfolgend werden die wichtigsten Anwendungen aufgezählt, die mit dem Abschluss der Arbeit erschlossen werden können. Parallel zur Untersuchung der Eignung des Verfahrens für die Strömungssensorik wird überprüft, ob sich die Drähte auch als Federelemente für kleinste Inertialsensoren eignen [90, 91]. Ein weiteres Anwendungsgebiet ist die Verwendung von Arrays aus Goldnanodrähten als Elektroden zur Ableitung des Zellpotentials [92, 93]. Auf Grund ihrer sehr geringen Impedanz lassen sich damit sehr gute Ergebnisse erzielen. Da sich der Prozess auch auf Polymersubstraten (z.B. Polyimidfolien) durchführen lässt, können flexible Systeme mit Nanodrahtelektroden hergestellt werden. Das macht dieses Verfahren für die Implantologie interessant, wenn die Implantate mit den körpereigenen Zellen kommunizieren müssen. Eine weitere Anwendung ist die Integration von Submikrodrähten aus Gold auf elektrische Schaltkontakte. Dadurch werden Unebenheiten der Kontaktflächen ausgeglichen und die Anzahl sog. *A-Spots* (Kontaktpunkte auf den Oberflächen) wird erhöht. Eine Reduktion des Schaltkontaktwiderstands um Faktor 20 lässt sich damit realisieren [94–97]. Eine ähnliche Anwendung ist die Realisierung von „Nano-Klett-Verschlüssen“ für Verbindungselemente als Ersatz für Lot- oder Thermokompressionskontakte [98, 99]. Dabei werden zwei Kontaktflächen mit Nanodrähten versehen und dann wie Klettverschlüsse aufeinander gepresst. Mit diesem Verfahren können die Fügepartner bei Raumtemperatur gefügt werden. Die Verbindungen können dabei Durchmesser von nur wenigen Mikrometern aufweisen, was deutlich unterhalb von aktuellen Kontakten liegt. Auch für diese Anwendung ist es von Vorteil, dass das Integrationsverfahren bei sehr niedrigen Temperaturen durchgeführt werden können.

Laufende Arbeiten untersuchen den Einsatz des Verfahren für die Herstellung von Feldemissionsarrays [100]. Hierfür ist es von großer Notwendigkeit, dass Drähte mit einer möglichst geringen Drahtdicke herstellbar sind.

Im Bereich biologischer Sensoren können die Drähte ebenfalls Anwendung finden. So ist z.B. ein auf Gold-Nanodrähten basierender Cholesterinsensor [101] zu nennen. Mit Nanodrähten versehene Oberflächen können auch eingesetzt werden, um biologische Analysen mittels Oberflächenplasmonen durchzuführen [102].

Das in dieser Arbeit entwickelte Verfahren ermöglicht demnach das Erschließen vieler Anwendungen. Das Verfahren ist Batch-fähig und erlaubt daher die Fertigung hoher Stückzahlen in vergleichsweise kurzer Zeit. Im Vergleich zu den gängigen Top-Down-Fertigungsverfahren für nanometergroße Strukturen in Mikrosystemen benötigt das Verfahren nur vergleichsweise geringe Investitionskosten, da die Templatfoli-



**Abbildung 8.4:** Beispiele für weitere Anwendungen von Submikro- und Nanodrahtarrays: a) Drahtarray als Elektrode zur Ableitung von Zell-Aktionspotentialen. Zu erkennen sind die Zellen auf den Drähten [92], b) Nanodrähte auf einer Kontaktfläche zur Verringerung von Schaltkontakten [97], c) wabenförmige Arrays als Teststruktur für Verbindungselemente. Die Strukturen wirken wie winzige Klettverschlüsse und ermöglichen das Fügen von Chips und anderen Bauelementen bei nur geringem Druck und Raumtemperatur

en kommerziell gut erhältlich sind. Daher kann das Verfahren auch von kleineren Unternehmen (KMU) gut umgesetzt werden.

## 8.2 Strömungssensoren mit Drähten aus dem Ätzflankengalvanikverfahren

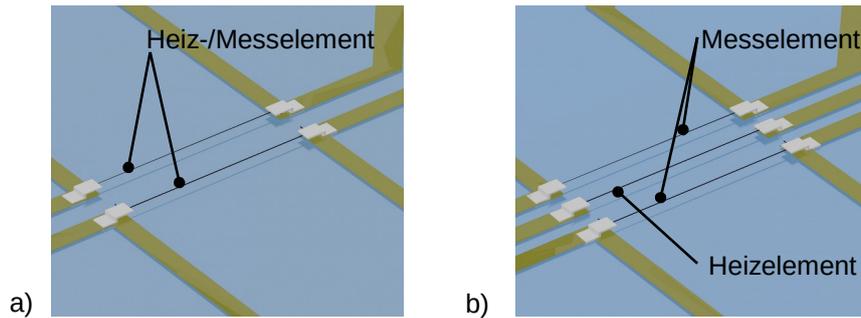
Schon bei der Abschätzung der thermischen Eigenschaften von Mikro- und Submikrodrähten (Abschnitt 4.2) hat sich abgezeichnet, dass die Drähte aus dem Ionenspurätzverfahren nicht optimal für die Verwendung als thermoresistive Elemente in Strömungssensoren sind. Das liegt vor allem an der begrenzten Länge der Drähte und der damit verbundenen niedrigen Sensitivität. Im Gegensatz zu den gängigen MEMS-Strömungssensoren, sind die Drähte in dem in dieser Arbeit vorgestellten Sensorelement nicht membrangestützt, sondern frei schwebend über dem Substrat angepasst. Das äußert sich in einer sehr hohen Sensitivität des Sensorelementes.

Um den Anforderungen an Strömungssensoren zur Erfassung sich schnell ändernder (hoch frequenter) Strömungen Rechnung zu tragen, wurde in dieser Arbeit das Ätzflankengalvanikverfahren aus [83] so erweitert, dass frei schwebende dünne Drähte galvanisch erzeugt werden können. Als Drahtmaterial wurde in dieser Arbeit Nickel auf Grund des hohen Temperaturkoeffizienten verwendet. Es lassen sich jedoch prinzipiell alle galvanisch abscheidbaren Metalle hierfür verwenden. Von besonderem Interesse ist natürlich Platin, da es zusätzlich zum vergleichsweise hohen Temperaturkoeffizienten des Widerstandes sehr korrosionsbeständig ist. Das ist wichtig, wenn das Sensorelement in einem photoakustischen Analysesystem eingesetzt werden soll, wo es einer korrosiven Analysegas-Atmosphäre ausgesetzt ist.

Mit den in dieser Arbeit entwickelten Sensorelementen konnten ohne Weiteres oszillierende Strömungen von bis zu 400 Hz sicher nachgewiesen werden. Eine bessere Elektronik lässt sicherlich die Detektion noch höherer Frequenzen zu.

Weiteres Potential für Verbesserungen des Sensorelementes bietet das Heizelement. In den realisierten Mustern wurde das Heizelement als Dünnschichtelement direkt auf dem Glassubstrat realisiert. Das hat im Wesentlichen zwei Nachteile:

- Es wird vergleichsweise viel Wärmeleistung benötigt, um die Betriebstemperatur des Sensorelementes zu erreichen, weil das Substrat mit aufgeheizt wird.
- Die Wärmeverteilung im Substrat ist ebenfalls strömungsabhängig. Sie ändert sich auf Grund der hohen Wärmekapazität des Substrates nur sehr langsam. Die Veränderung der Wärmeverteilung im Substrat beeinflusst aber auch die Temperatur der resistiven Messelemente, so dass dem schnellen Messsignal der Drähte immer das langsame Signal des Substrates überlagert ist.



**Abbildung 8.5:** Weiterführende Konzepte für Strömungssensoren aus dem Ätzflankengalvanikverfahren, a) 2-Leiteranordnung, b) 3-Leiteranordnung. Die 3-Leiteranordnung kann auch als Time-of-Flight-Sensor verwendet werden

Beide Nachteile lassen sich umgehen, wenn anstelle des Dünnschichtheizelementes ein Draht Heizelement verwendet wird. Dabei kann sowohl eine 2-Leiter-Anordnung mit kombinierten Heiz- und Messelementen als auch eine 3-Leiter-Anordnung mit getrennten Heiz- und Messelementen realisiert werden. Die Abstände zwischen den einzelnen Elementen sind dann zu verringern.

Die nötige Heizleistung verringert sich dann von einigen 100 mW auf Leistungen in  $\mu\text{W}$ -Bereich, um das Heizelement bei ca. 60 K Übertemperatur zu halten. Das macht das Sensorelement für den Betrieb in drahtlosen Anwendungen attraktiv, die bisher mit thermisch arbeitenden Sensoren auf Grund des zu hohen Energieverbrauchs noch nicht adressiert wurden. Die benötigte Heizleistung ist so gering, dass auch ein passiver Betrieb über RFID denkbar ist.

Die 3-Leiter-Anordnung weist zusätzlich noch den Vorteil auf, dass das Sensorelement als Time-of-Flight-Sensor betrieben werden kann. Damit ist es vorstellbar, neben der Strömungsgeschwindigkeit auch die Gaszusammensetzung bei binären Gasgemischen zu messen [103].

Weiteres Verbesserungspotential bietet das Packaging. Für die zweite Generation wurde ein rechteckiger Chip gefertigt, bei dem nur ein winziger Teil für das eigentliche sensitive System genutzt wird. Das fordert viel Chipfläche, was für eine Fertigung im größeren Maßstab unwirtschaftlich ist.

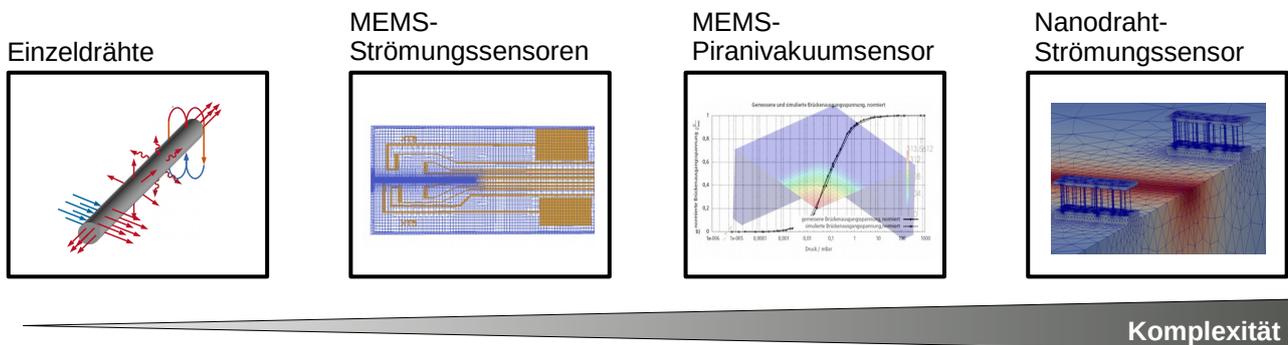
In dieser Arbeit wurden der Widerstand des Up- und Downstream-Messelementes getrennt gemessen. Das hat den Grund, dass nur dann fertigungsbedingte Widerstandstoleranzen zwischen den Messelementen berücksichtigt werden können. In weiteren Arbeiten ist die Implementation einer Messbrücke (Halbbrücke) auf dem Messelement sinnvoll um ein besseres Ausgangssignal des Sensorelementes zu generieren.

### 8.3 Strömungsmodellierung

Die in dieser Arbeit durchgeführte Modellierung deckt den Bereich vom einzelnen Draht bis hin zum vollständigen Sensor ab. Den Kern der wissenschaftlichen Arbeit bildet die Implementierung der Slip-Randbedingungen für Gleitrandbedingungen.

Innerhalb der Arbeit wurde erstmals eine Strömungssimulation vorgestellt, welche neben der Strömung auch eine Wärmeverteilung in Festkörper unter Berücksichtigung von Slip-Randbedingungen durchführt. Die physikalische Richtigkeit der Ergebnisse wurde anhand eines Vakuum-Drucksensors überprüft. Der Algorithmus weist Ergebnisse auf, die sehr gut mit Messungen übereinstimmen. Abschließend wurde ein kompletter Sensor mit Strömungskanal simuliert. In dem komplexen Modell wurden die einzelnen Nanodrähte mit aufgelöst. Auch die statistische Natur der Drahtarrays wird in der Modellierung mit

berücksichtigt. Ein eigens entwickeltes Python-Skript erstellt die Arrays nach einer gegebenen Verteilungsfunktion. In Abbildung 8.6 sind die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen in aufsteigender Komplexität dargestellt.



**Abbildung 8.6:** Die in dieser Arbeit durchgeführten Modellierungen in aufsteigender Komplexität: Für Einzeldrähte wurde ein einfaches Bilanzmodell verwendet, für die Simulation von MEMS-Strömungssensoren werden gekoppelte Strömungs- und Festkörperberechnungen genutzt. Für die Modellierung von Piranisensoren werden zusätzlich Slip-Randbedingungen berücksichtigt. Das Gas befindet sich allerdings in Ruhe. Die komplexeste Simulation ist die Strömung durch Sensoren, die Nanodrahtarrays als sensitive Elemente verwendet. Hier sind Multiskalenprobleme, Slip-Randbedingungen und Kopplung zwischen Festkörper und Gasströmung zu berücksichtigen.

Alle numerischen Simulationen wurden in der Software OpenFOAM durchgeführt und stehen damit als C++-Bibliothek zur Verfügung. Durch die ausschließliche Verwendung freier Software für die Simulation können die Berechnungen auf beliebig vielen Rechnern durchgeführt werden. Das Lösen der Strömungsgleichung ist auf beliebig viele Prozessorkerne verteilbar, ohne dass sich der Anwender um Lizenzen und Gebühren kümmern muss.

Die Ergebnisse der Simulationen sind direkt in das Layout für die herzustellenden Sensorelemente eingeflossen. Mit dem erstellten Solver steht ein Tool zu Verfügung, mit dem die Sensorelemente gemäß dem Einsatzzweck ausgelegt werden können.

Der offene Quellcode des Programmes OpenFOAM eröffnet noch einen weiteren Vorteil: Es können leicht mehrere Domänen miteinander gekoppelt werden, wie in Abschnitt 4.3.6 gezeigt. Es wurden neben thermischen auch elektrische Größen in einer Wheatstone-Brücke berechnet. Das Ergebnis ist eine Modellierung des vollständigen Sensor-Elektronik-Systems. Das kann natürlich auch für Strömungssensoren durchgeführt werden.

Gerade im universitären Umfeld ist der Einsatz quelloffener Software zu Simulationszwecken von Vorteil, da die Solver leicht an die Erfordernisse anpassbar sind. Für Studierende bietet sich der Vorteil, dass keine Lizenzkosten aufgewendet werden müssen. Innerhalb von Seminaren kann das Programm mitsamt Linux-Betriebssystem auch direkt von einem Live-USB-System verwendet werden, so dass die Studierenden Strömungssimulationen in Heimarbeit durchführen können, ohne zusätzliche Software installieren zu müssen. Nicht zuletzt ermöglicht die quelloffene Software den Lehrenden die Möglichkeit, den Studierenden die Algorithmen hinter der Simulation nahe zu bringen.

Abschließend lässt sich folgendes Fazit ziehen: Das Ionensprätzverfahren wurde in dieser Arbeit so weiterentwickelt, dass es gut in Mikrosystemen einsetzbar ist. Im Verlauf der Arbeit hat sich relativ schnell herausgestellt, dass die Drähte, die mit diesem Verfahren hergestellt werden können, nicht sinnvoll in Strömungssensoren nutzbar sind. Das Ziel der Arbeit, die Realisierung eines Strömungssensors,

---

der schnell oszillierende Strömungen messen kann, konnte mit diesem Verfahren allerdings nicht realisiert werden. Daher wurde ein weiteres Verfahren entwickelt, mit dem Sensoren hergestellbar sind, die diesen Anforderungen genügen. Die so entwickelten Sensoren haben durchaus Potential auch in anderen Bereichen eingesetzt zu werden, z.B. für drahtlose Messungen, da sie sehr energiesparend einsetzbar sind. Leakedetektion in verteilten Druckluft- bzw. Gasversorgungsnetzen ist nur ein Beispiel. Auf der anderen Seite kann das Ionenspurätzverfahren durch die in dieser Arbeit entwickelten Prozesse in einer Vielzahl anderer Anwendungen eingesetzt werden. Begleitet wurde der Entwicklungsprozess von der Implementierung von Modellierungsalgorithmen, die speziell auf die Strömungen durch nanoskalige Strukturen abgestimmt sind und zur Auslegung der hoch sensitiven, schnellen Strömungssensoren verwendet werden können.



---

## 9 Literatur

---



---

## Refenzierte Literatur

---

- [1] G. Schunck. “Schnelle Messfühler für kleine Gasströme”. Diss. Karlsruhe: Technische Hochschule Karlsruhe, 1974.
- [2] K. Jasek, T Budzynski und E Stryszak. “Optopneumatic detector with platinum flow sensor”. In: *Acta Physica Polonica-Series A General Physics* 116.3 (2009), S. 321.
- [3] N. Schwesinger, C. Dehne und F. Adler. *Lehrbuch Mikrosystemtechnik*. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH, Jan. 2008.
- [4] N.T Nguyen. “Micromachined flow sensors—a review”. In: *Flow Measurement and Instrumentation* 8.1 (1997), S. 7–16.
- [5] Y. Wang, C. Chen, C. Chang, C. Lin, C. Lin, L. Fu und C. Lee. “MEMS-based gas flow sensors”. In: *Microfluidics and Nanofluidics* 6.3 (1. März 2009), S. 333–346.
- [6] W. Polifke und J. Kopitz. *Wärmeübertragung*. München [u.a.]: Pearson Studium, 2009.
- [7] M. Elwenspoek. “Thermal flow micro sensors”. In: *CAS*. Bd. 2. 1999, S. 423–435.
- [8] R. Spohr. “Status of ion track technology—Prospects of single tracks”. In: *Radiation Measurements* 40.2 (Nov. 2005), S. 191–202.
- [9] E. Ferain und R. Legras. “Track-etch templates designed for micro- and nanofabrication”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 208 (Aug. 2003), S. 115–122.
- [10] W. Nitsche und A. Brunn. *Strömungsmesstechnik*. Springer, 18. Jan. 2006. 235 S.
- [11] G. Comte-Bellot. “Hot-Wire Anemometry”. In: *Annual Review of Fluid Mechanics* 8.1 (1976), S. 209–231.
- [12] L. V. King. “On the convection of heat from small cylinders in a stream of fluid: determination of the convection constants of small platinum wires, with applications to hot-wire anemometry”. In: *Proceedings of the Royal Society of London. Series A* 90.622 (1914), S. 563–570.
- [13] J. M. L. Janssen, L. Ensing und J. B. Van Erp. “A Constant-Temperature-Operation Hot-Wire Anemometer”. In: *Proceedings of the IRE* 47.4 (1959), S. 555–567.
- [14] A. E. Perry. *Hot-wire anemometry*. Oxford science publications. Oxford : New York: Clarendon Press ; Oxford University Press, 1982. 184 S.
- [15] L. Löfdahl und M. Gad-el-Hak. “MEMS applications in turbulence and flow control”. In: *Progress in Aerospace Sciences* 35.2 (Feb. 1999), S. 101–203.
- [16] B. W. Van Oudheusden. “Silicon thermal flow sensor with a two-dimensional direction sensitivity”. In: *Measurement Science and Technology* 1.7 (1. Juli 1990), S. 565.
- [17] A.F.P. van Putten und S. Middelhoek. “Integrated silicon anemometer”. In: *Electronics Letters* 10.21 (1974), S. 425–426.
- [18] W.C. Shin und R.S. Besser. “A micromachined thin-film gas flow sensor for microchemical reactors”. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 16.4 (2006), S. 731–741.
- [19] X. Duan, X. Fu, H. Xie und H. Yang. “Non-Silicon MEMS Calorimetric Gas Flow Sensor”. In: *1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006. NEMS '06*. 1st IEEE International Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems, 2006. NEMS '06. 2006, S. 658–661.

- [20] M. Schwerter, T. Beutel, M. Leester-Schädel, A. Dietzel und S. Büttgenbach. "Flexible Heißfilm-Anemometrie-Arrays zur Strömungsmessung an gekrümmten Strukturen". In: *Mikrosystemtechnik 2013*. Mikrosystemtechnik Kongress 2013. Aachen: VDE, 2013.
- [21] F. Völklein. "Thermal-Based Microsensors". In: *MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications*. Hrsg. von J. G. Korvink und O. Paul. Springer Berlin Heidelberg, 1. Jan. 2006, S. 229–279.
- [22] O. Tabata. "Fast-response silicon flow sensor with an on-chip fluid temperature sensing element". In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 33.3 (1986), S. 361–365.
- [23] R.G. Johnson und R.E. Higashi. "A highly sensitive silicon chip microtransducer for air flow and differential pressure sensing applications". In: *Sensors and Actuators* 11.1 (1987), S. 63–72.
- [24] E. Yoon und K.D. Wise. "A dielectrically-supported multi-element mass flow sensor". In: *Electron Devices Meeting, 1988. IEDM '88. Technical Digest., International*. Electron Devices Meeting, 1988. IEDM '88. Technical Digest., International. 1988, S. 670–673.
- [25] E. Yoon und K.D. Wise. "An integrated mass flow sensor with on-chip CMOS interface circuitry". In: *IEEE Transactions on Electron Devices* 39.6 (Juni 1992), S. 1376–1386.
- [26] L. Qiu, E. Obermeier und A. Schubert. "A Microsensor With Integrated Heat Sink And Flow Guide For Gas Flow Sensing Applications". In: *Solid-State Sensors and Actuators, 1995 and Eurosensors IX.. Transducers '95. The 8th International Conference on*. Bd. 1. 25. Juni 1995, S. 520–523.
- [27] N.T. Nguyen und W. Dötzel. "Asymmetrical locations of heaters and sensors relative to each other using heater arrays: a novel method for designing multi-range electrocaloric mass-flow sensors". In: *Sensors and Actuators A: Physical* 62.1 (Juli 1997), S. 506–512.
- [28] N. Sabate, J. Santander, L. Fonseca, I. Gracia und C. Cane. "Multi-range silicon micromachined flow sensor". In: *Sensors & Actuators: A. Physical* 110.1 (2004), S. 282–288.
- [29] S.-T. Hung, S.-C. Wong und W. Fang. "The development and application of microthermal sensors with a mesh-membrane supporting structure". In: *Sensors and Actuators A: Physical* 84.1 (1. Aug. 2000), S. 70–75.
- [30] C. Liu, J.-B. Huang, Z. Zhu, F. Jiang, S. Tung, Y.-C. Tai und C.-M. Ho. "A micromachined flow shear-stress sensor based on thermal transfer principles". In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 8.1 (1999), S. 90–99.
- [31] J. Xie, J. Shih und Y.-C. Tai. "Integrated surface-micromachined mass flow controller". In: *IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto*. IEEE The Sixteenth Annual International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2003. MEMS-03 Kyoto. Jan. 2003, S. 20–23.
- [32] Y.-C. Tai und R. S. Muller. "Lightly-doped polysilicon bridge as a flow meter". In: *Sensors and Actuators* 15.1 (Sep. 1988), S. 63–75.
- [33] T. Ebefors, E. Kalvesten und G. Stemme. "Three dimensional silicon triple-hot-wire anemometer based on polyimide joints". In: *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings.*, The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 1998. MEMS 98. Proceedings. Jan. 1998, S. 93–98.
- [34] J. Chen, J. Zou und C. Liu. "A surface micromachined, out-of-plane anemometer". In: *The Fifteenth IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, 2002*. Jan. 2002, S. 332–335.
- [35] J. Chen, Z. Fan, J. Zou, J. Engel und C. Liu. "Two-Dimensional Micromachined Flow Sensor Array for Fluid Mechanics Studies". In: *Journal of Aerospace Engineering* 16.2 (14. März 2003), S. 85–97.

- [37] H.-E. de Bree, P. Leussink, T. Korthorst, H. Jansen, T. S. J. Lammerink und M. Elwenspoek. “The -flown: a novel device for measuring acoustic flows”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 54.1 (Juni 1996), S. 552–557.
- [38] J. W. van Honschoten. *Modelling and optimisation of the Microflown*. 16. Apr. 2004. URL: <http://eprints.eemcs.utwente.nl/14316/> (besucht am 30.01.2015).
- [39] J. W. van Honschoten, V. B. Svetovoy, T. S. J. Lammerink, G. J. M. Krijnen und M. C. Elwenspoek. “Determination of the sensitivity behavior of an acoustic, thermal flow sensor by electronic characterization”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 112.1 (15. Apr. 2004), S. 1–9.
- [40] E. Ferain und R. Legras. “Heavy ion tracks in polycarbonate. Comparison with a heavy ion irradiated model compound (diphenyl carbonate)”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 82.4 (Sep. 1993), S. 539–548.
- [41] P. Apel. “Track etching technique in membrane technology”. In: *Radiation Measurements* 34.1 (Juni 2001), S. 559–566.
- [42] M.E. Toimil Molares, J. Brötz, V. Buschmann, D. Dobrev, R. Neumann, R. Scholz, I.U. Schuchert, C. Trautmann und J. Vetter. “Etched heavy ion tracks in polycarbonate as template for copper nanowires”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 185.1 (2001), S. 192–197.
- [43] J.J. Boote und S.D. Evans. “Dielectrophoretic manipulation and electrical characterization of gold nanowires”. In: *Nanotechnology* 16 (2005), S. 1500–1505.
- [44] M. Skupinski, M. Toulemonde, M. Lindeberg und K. Hjort. “Ion tracks developed in polyimide resist on Si wafers as template for nanowires”. In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 240.3 (Nov. 2005), S. 681–689.
- [45] L. Vila, P. Vincent, L. Dauginet-De Pra, G. Pirio, E. Minoux, L. Gangloff, S. Demoustier-Champagne, N. Sarazin, E. Ferain, R. Legras, L. Piraux und P. Legagneux. “Growth and Field-Emission Properties of Vertically Aligned Cobalt Nanowire Arrays”. In: *Nano Letters* 4.3 (2004), S. 521–524.
- [46] M. Lindeberg. “High aspect ratio microsystem fabrication by ion track lithography”. Diss. Acta Universitatis Upsaliensis, 2003.
- [47] H. Yoon, D. Deshpande, V. Ramachandran und V. K. Varadan. “Aligned nanowire growth using lithography-assisted bonding of a polycarbonate template for neural probe electrodes”. In: *Nanotechnology* 19.2 (16. Jan. 2008), S. 025304.
- [48] A. Gambirasi, S. Cattarin, M. Musiani, L. Vázquez-Gómez und E. Verlato. “Direct electrodeposition of metal nanowires on electrode surface”. In: *Electrochimica Acta* 56.24 (2011), S. 8582–8588.
- [49] B. Shi, Y.-B. Wang und K. Chen. “Pool boiling heat transfer enhancement with copper nanowire arrays”. In: *Applied Thermal Engineering* 75 (22. Jan. 2015), S. 115–121.
- [50] S. Hesse und G. Schnell. *Sensoren für die Prozess- und Fabrikautomation: Funktion - Ausführung - Anwendung*. 5., korr. und verb. Aufl. 2012. Vieweg+Teubner Verlag, 23. Dez. 2011. 432 S.
- [51] F. Jiang. “Silicon-micromachined flow sensors”. Diss. California Institute of Technology, 1998.
- [52] M. Schäfer. *Computational engineering: introduction to numerical methods*. Springer Verlag, 2006.
- [53] Fukang Jiang, Yu-Chong Tai, Chih-Ming Ho, R. Karan und M. Garstenauer. “Theoretical and experimental studies of micromachined hot-wire anemometers”. In: *Electron Devices Meeting, 1994. IEDM '94. Technical Digest., International*. Electron Devices Meeting, 1994. IEDM '94. Technical Digest., International. 1994, S. 139–142.

- [54] E. Abbaspour-Sani und D. Javan. "Analytical study of resistive MEM gas flow meters". In: *Microsystem Technologies* 14.1 (2008), S. 89–94.
- [55] S. Lecheler. *Numerische Strömungsberechnung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009.
- [56] *OpenFOAM - User Guide*. OpenFOAM Foundation, 2014.
- [57] F. Duchaine, S. Mendez, F. Nicoud, A. Corpron, V. Moureau und T. Poinso. "Coupling heat transfer solvers and large eddy simulations for combustion applications". In: *Center for Turbulence Research, Proceedings of the Summer Program*. 2008, S. 113.
- [58] M. Gad-el-Hak. *The MEMS Handbook: MEMS, design and fabrication*. CRC press, 2006.
- [59] D. Hänel. *Molekulare Gasdynamik*. Springer Verlag, 2004.
- [60] C. Shen. *Rarefied gas dynamics: fundamentals, simulations and micro flows*. Springer Verlag, 2005.
- [61] N.-T. Nguyen und S. T. Wereley. *Fundamentals and Applications of Microfluidics*. Microelectromechanical Systems Series. Boston, London: Artech House, 2002.
- [62] F. Völklein und A. Meier. "Microstructured vacuum gauges and their future perspectives". In: *Vacuum* 82.4 (2007), S. 420–430.
- [64] H. Versteeg und W. Malalasekera. *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. 2nd rev. ed. Prentice Hall, 6. Feb. 2007.
- [65] F. Greiner. "Mikro-Nano-Integration für metallische Mikrosysteme mit vertikal integrierten Federelementen". Dissertation. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, 21. Okt. 2013.
- [66] M. Rauber. "Controlled Synthesis of Nanowire Assemblies by Ion-Track Template Electrodeposition". Diss. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Jan. 2012.
- [67] F. Dehaye, E. Balanzat, E. Ferain und R. Legras. "Chemical modifications induced in bisphenol A polycarbonate by swift heavy ions". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 209 (Aug. 2003), S. 103–112.
- [68] G. Gerlach und W. Dötzel. *Einführung in die Mikrosystemtechnik - ein Kursbuch für Studierende*. München [u.a.]: Fachbuchverl. Leipzig im Carl Hanser Verlag, 2006. 384 S.
- [69] F. Völklein und T. Zetterer. *Praxiswissen Mikrosystemtechnik: Grundlagen - Technologien - Anwendungen*. Vieweg, 2006.
- [70] K. Richter, M. Orfert und K. Drescher. "Anisotropic patterning of copper-laminated polyimide foils by plasma etching". In: *Surface and Coatings Technology* 97.1 (1997), S. 481–487.
- [71] Z. D. Popovic, R. A. Sprague und G. A. Neville Connell. "Technique for monolithic fabrication of microlens arrays". In: *Applied Optics* 27.7 (1. Apr. 1988), S. 1281–1284.
- [72] H. Toshiyoshi, G.-D. J. Su, J. LaCosse und M. C. Wu. "A Surface Micromachined Optical Scanner Array Using Photoresist Lenses Fabricated by a Thermal Reflow Process". In: *Journal of Lightwave Technology* 21.7 (1. Juli 2003), S. 1700.
- [73] V. M. Schmidt. *Elektrochemische Verfahrenstechnik*. Weinheim, FRG: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Okt. 2003.
- [74] N. Kanani. *Galvanotechnik: Grundlagen Verfahren Praxis*. Hanser, 2000. 447 S.
- [75] C. H. Hamann und W. Vielstich. *Elektrochemie*. 3. Aufl. John Wiley & Sons Australia, Limited, 1998. 589 S.
- [76] T. W. Jelinek. *Praktische Galvanotechnik*. Leuze, 1997.
- [77] R. Dölling. "Potentiostaten - Eine Einführung". Pohlheim, Jan. 2005.
- [78] M. Paunovic und M. Schlesinger. *Fundamentals of Electrochemical Deposition*. 2 edition. Hoboken, N.J: Wiley-Interscience, 4. Aug. 2006. 373 S.

- 
- [79] K. J. Mysels. "Surface tension of solutions of pure sodium dodecyl sulfate". In: *Langmuir* 2.4 (1. Juli 1986), S. 423–428.
- [80] M. Lindeberg und K. Hjort. "A comprehensive study of ion track enabled high aspect ratio microstructures in flexible circuit boards". In: *Microsystem Technologies* 10.8 (1. Nov. 2004), S. 608–621.
- [81] T. Winterstein, M. Staab, D. Riemer und H. F. Schlaak. "Konstruktionskatalog für mechanische, elektrische und magnetische Eigenschaften von galvanisch abgeschiedenem Nickel". In: *Mikro-SystemTechnik*. Mikrosystemtechnik Kongress 2011. Darmstadt, 2011.
- [82] D. Dobrev, J. Vetter und N. Angert. "Electrochemical preparation of metal microstructures on large areas of etched ion track membranes". In: *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms* 149.1 (3. Jan. 1999), S. 207–212.
- [83] E. J. Menke, M. A. Thompson, C. Xiang, L. C. Yang und R. M. Penner. "Lithographically patterned nanowire electrodeposition". In: *Nature Materials* 5.11 (Nov. 2006), S. 914–919.
- [88] P. Merkli und H. Thomann. "Transition to turbulence in oscillating pipe flow". In: *Journal of Fluid Mechanics* 68.3 (1975), S. 567–576.
- [89] J. Radadia und M. E. Rizkalla. "High Precision Bidirectional Heat Pulsed Flow Sensor". In: *Journal of Software Engineering and Applications* 07.3 (2014), S. 135–141.
- [90] Martin Hottes, Markus Rauber, Christian Stegmann, Florian Dassinger, Helmut F. Schlaak, Christina Trautmann und Wolfgang Ensinger. "Electrodeposition of nanowire arrays for accelerometers and their mechanical properties". In: EDNANO-9. Porto, Nov. 2012.
- [93] C. Nick, C. Thielemann und H.F. Schlaak. "PEDOT:PSS coated gold nanopillar microelectrodes for neural interfaces". In: *2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO)*. 2014 International Conference on Manipulation, Manufacturing and Measurement on the Nanoscale (3M-NANO). 2014, S. 160–165.
- [94] S.S. Baek und R.S. Fearing. "Reducing Contact Resistance Using Compliant Nickel Nanowire Arrays". In: *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on* 31.4 (2008), S. 859–868.
- [95] C. Bellmann, R. Sarwar, A. Steinke, T. Frank, H. F. Schlaak und G. Gerlach. "Development of a humidity micro switch based on humidity sensitive polymers". In: *Proceedings MME 2012*. Micromechanics and Microsystems Europe 2012. Ilmenau, 9. Sep. 2012.
- [96] T. Frank, A. Cyriax, A. Steinke, C. Bellmann, G. Gerlach, R. Sarwar und H. F. Schlaak. "F13-Miniaturisierter energieautarker binärer Sensor auf Basis von feuchtigkeitsempfindlichen Hydrogelen". In: 11. Dresdner Sensor-Symposium. Dresden, Dez. 2013, S. 360–363.
- [98] S. Guttowski. *Nanorasenverbindungen als Element der Mikro-Nano-Integration - Realisierung - mechanische Charakterisierung - elektrische Modellierung - Kurztitel: NanoLawn: Abschlussbericht ; Teilprojekte: Metallische Nanorasen für eine höchstzuverlässige Aufbau- und Verbindungstechnik in der Systemintegration - Nanorasen-AVT; Untersuchung der plastischen Verformbarkeit funktionaler Nanostrukturen - VENS; Carbon Nano Tubes für nanoskalige Niedertemperatur-Verbindungen - CONTEMP; Entwicklung und Anwendung eines Modellierungsansatzes um den Einfluss von Carbon-Nano-Interconnects auf die Signalintegrität zu analysieren und bewerten - MoNanoSig*. Berlin, 2008. 84 S.
- [99] S. Fiedler, M. Zwanzig, R. Schmidt, E. Auerswald, M. Klein, W. Scheel und H. Reichl. "Evaluation of Metallic Nano-Lawn Structures for Application in Microelectronic Packaging". In: *Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006. 1st*. Electronics Systemintegration Technology Conference, 2006. 1st. Bd. 2. 2006, S. 886–891.

- 
- [101] S. Aravamudhan, A. Kumar, S. Mohapatra und S. Bhansali. “Sensitive estimation of total cholesterol in blood using Au nanowires based micro-fluidic platform”. In: *Biosensors and Bioelectronics* 22.9 (15. Apr. 2007), S. 2289–2294.
- [102] A. V. Kabashin, P. Evans, S. Pastkovsky, W. Hendren, G. A. Wurtz, R. Atkinson, R. Pollard, V. A. Podolskiy und A. V. Zayats. “Plasmonic nanorod metamaterials for biosensing”. In: *Nature Materials* 8.11 (Nov. 2009), S. 867–871.
- [103] J. van Kuijk, T. S. J. Lammerink, H. -E. de Bree, M. Elwenspoek und J. H. J. Fluitman. “Multi-parameter detection in fluid flows”. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 47.1 (1995), S. 369–372.
- [104] J. Ferziger und M. Peric. *Numerische Strömungsmechanik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008.

---

## Eigene Veröffentlichungen

---

- [36] S. Quednau, C. Stegmann und M. Hottes. *3-DOING - 3-Dimensionale Mikro-Nano-Integration für die Gasflusssensorik: Abschlussbericht ; Projektlaufzeit: 1/2011 - 12/2013*. Darmstadt: Technische Univ., 2014.
- [63] S. Quednau, H. F. Schlaak und F. Völklein. “Numerical Simulation of a MEMS Pirani Vacuum Sensor”. In: *Proceedings SENSOR 2013*. AMA Conferences 2013. Nürnberg, 14. Mai 2013, S. 222–228.
- [84] S. Quednau und H.F. Schlaak. “In-Situ Erzeugung von Arrays aus metallischen Mikro- und Nanodrähten in Silizium-Mikrosystemen”. In: *Mikro-Nano-Integration - 3. GMM-Workshop*. Stuttgart: VDE Verlag, 2011.
- [85] S. Quednau, F. Dassinger und H.F. Schlaak. “Growth In-Place Integration of Metallic Nanowires into MEMS Gas Flow Sensors”. In: *ITG/GMA Symposium; Proceedings of Sensors and Measuring Systems 2014; 17*. ITG/GMA Symposium; Proceedings of Sensors and Measuring Systems 2014; 17. Juni 2014, S. 1–6.
- [86] S. Quednau und H.F. Schlaak. “Strukturierte Herstellung und In-Situ Erzeugung von metallischen Mikro- und Nanodrahtarrays in Mikrosystemen”. In: *MikroSystemTechnik Kongress 2011*. Mikrosystemtechnik Kongress 2011. Darmstadt, 2011.
- [87] S. Quednau, F. Dassinger, M. Hottes, C. Stegmann, W. Ensinger und H. F. Schlaak. “Integration und Charakterisierung von Nanostrukturen in Mikrosysteme für sensorische Anwendungen”. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2013*. Mikrosystemtechnik 2013 - Von Bauelementen zu Systemen. Aachen: VDE, 14. Okt. 2013.
- [91] F. Dassinger, S. Quednau, F. Greiner, H. F. Schlaak, M. Hottes, C. Stegmann, M. Rauber, W. Ensinger und C. Trautmann. “Einsatz von integrierten Nanostrukturen in Mikrosystemen”. In: *Mikro-Nano-Integration - 4. GMM-Workshop*. Berlin: VDE Verlag, Nov. 2012.
- [92] C. Nick, S. Quednau, R. Sarwar, H.F. Schlaak und C. Thielemann. “High aspect ratio gold nanopillars on microelectrodes for neural interfaces”. In: *Microsystem Technologies* (2. Nov. 2013), S. 1–9.
- [97] R. Sarwar, S. Quednau und H. F. Schlaak. *Sensitive Microswitch: Abschlußbericht 2014; Teilvorhaben: Herstellung von uN-Kontakten*; Darmstadt: TU, 2014.
- [100] F. Roustaie, S. Quednau, F. Dassinger und H. F. Schlaak. “Strukturierung von Elektronen-Feldemitter auf Basis metallischer Nanodrähte”. In: *Mikro-Nano-Integration (GMM-FB 81)*. Mikro-Nano-Integration - Beiträge des 5. GMM-Workshops. Ilmenau: VDE Verlag, Frankfurt, 8. Okt. 2014.
- [105] S. Quednau, F. Greiner, H. F. Schlaak, M. Rauber, R. Neumann und W. Ensinger. “Integration von Nanodrahtarrays in Mikrosysteme für die Gasflusssensorik”. In: *Mikro-Nano-Integration - 2. GMM Workshop*. Erfurt: VDE-Verlag, 3. März 2010.
- [106] S. Quednau und H. F. Schlaak. “Lithographically defined nickel wires for gasflow sensing applications”. In: *Proceedings SENSOR 2015* (19. Mai 2015), S. 222–227.
- [107] C. Nick, S. Quednau, R. Sarwar, H. F. Schlaak und C. Thielemann. “Gold-Nanodrähte auf Mikroelektroden zur extrazellulären Ableitung elektrogener Zellen - Tagungsbeiträge”. In: *Mikrosystemtechnik Kongress 2013*. Aachen: VDE-Verlag, 2013.

- 
- [108] C. Nick, P. Lippert, S. Quednau, H.F. Schlaak und C. Thielemann. “Gold nanopillar microelectrodes on low temperature curing polyimide for the interface with electrogenic cells”. In: *2014 Middle East Conference on Biomedical Engineering (MECBME)*. 2014 Middle East Conference on Biomedical Engineering (MECBME). Feb. 2014, S. 55–58.
- [109] F. Greiner, F. Dassinger, S. Quednau, R. Sarwar, M. Hottes, C. Stegmann, M. Rauber, C. Trautmann, H. F. Schlaak und W. Ensinger. “Integration of nanowires onto 100 mm wafers by the growth in-place method”. In: *GSI Report*. Bd. 2013-1. GSI Report 2013-1 Bde. Darmstadt: GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, 2013, 413 p.

---

## A Ergänzungen zur Finite Volumen Modellierung

---

Die Modellierung der Strömungssensoren in dieser Arbeit wurde mit dem OpenFOAM durchgeführt. Hierbei handelt es sich um eine Sammlung von C++ Bibliotheken und ausführbaren Programmen zur Lösung partieller Differentialgleichungen mittels der Finiten Volumen Methode. Der komplette Quellcode von OpenFOAM ist offen, so dass OpenFOAM an die jeweilige Anwendung angepasst werden können. Da in dieser Arbeit nur Mikrostrukturen simuliert werden, wird auf die Verwendung von Turbulenzmodellen verzichtet.

---

### A.1 Prinzip der Finiten Volumen Methode

---

Für die FVM muss das Rechengebiet in sog. Kontrollvolumina zerlegt werden. Danach werden die Gleichungen über die Kontrollvolumina (KV) integriert. Die zeitliche Abhängigkeit wird dabei zunächst nicht mit berücksichtigt. Exemplarisch wird dieser Vorgang an der Wärmetransportgleichung demonstriert.

$$\underbrace{\vec{v} \cdot \nabla T}_{\text{diffusiv}} - \underbrace{\frac{\kappa}{\rho c} \cdot \Delta T}_{\text{konvektiv}} = \frac{\dot{q}}{\rho c}$$
$$\int_V \left( \vec{v} \cdot \nabla T - \frac{\kappa}{\rho c} \cdot \Delta T \right) dV = \int_V \frac{\dot{q}}{\rho c} dV$$

Mit Hilfe des Gauß'schen Satzes werden die Volumenintegrale auf der linken Seite in Oberflächenintegrale umgewandelt. Mit  $D = \frac{\kappa}{\rho c}$  und  $f = \frac{\dot{q}}{\rho c}$  gilt

$$\oint_A (\vec{v} \cdot T - D \cdot \nabla T) \cdot \vec{n} dA = \int_V f dV$$

mit  $\vec{n}$  als Normalenvektor auf der Fläche. Diese Gleichung wird approximiert. Dabei werden der diffusive Term und konvektive Term auf verschiedene Arten diskretisiert.

---

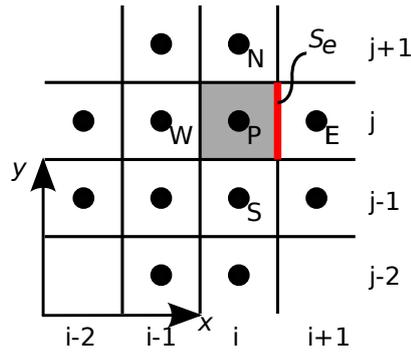
#### A.1.1 Diskretisierung des konvektiven Terms

---

Für die Diskretisierung des konvektiven Terms wird in dieser Arbeit das sog. Upwind-Verfahren eingesetzt (UDS - Upwind-Differencing-Scheme). Abbildung A.1 zeigt das Kontrollvolumen um den Punkt P mit den benachbarten Kontrollvolumen (Die Buchstaben der Punkte bezeichnen die Himmelsrichtungen). Zur Vereinfachung wird ein zweidimensionales kartesisches Gitter verwendet. Daher entstehen aus den Flächenintegralen Linienintegrale.

An der Ostseite  $e$  kann das Oberflächenintegral für den konvektiven Term dann mit Hilfe der Mittelpunkregel folgendermaßen approximiert werden:

$$\int_{S(i,j)_e} v_x \cdot T \cdot dS \approx \begin{cases} T_P \cdot v_x \cdot S_e & \text{für } v_x > 0 \\ T_E \cdot v_x \cdot S_e & \text{für } v_x < 0 \end{cases}$$



**Abbildung A.1:** Kontrollvolumen um Punkt P mit den benachbarten Kontrollvolumina im Gitter

Die Diskretisierung muss für jede Seite des Kontrollvolumens analog durchgeführt werden. In Open-FOAM können auch andere Diskretisierungsschemata gewählt werden, falls das UDS - Verfahren nicht konvergiert.

---

### A.1.2 Diskretisierung des diffusiven Terms

---

Der diffusive Term wird in dieser Arbeit mit Hilfe von Zentraldifferenzen approximiert. Das Oberflächenintegral kann wieder mit der Mittelpunkregel näherungsweise berechnet werden (vgl. Abbildung A.1). An der Ostseite des KV lautet es:

$$\int_{S(i,j)_e} D \cdot \nabla T dS \approx D \frac{T_E - T_P}{x_E - x_P} \cdot S_e$$

Die anderen Seiten des Kontrollvolumens müssen analog behandelt werden, damit der Integrationsweg das KV umschließt.

---

### A.1.3 Gleichungssystem

---

Durch die Diskretisierung der Wärmetransportgleichung entsteht ein lineares Gleichungssystem, welches folgende Struktur hat:

$$a_p \cdot T_p = \sum_i a_i \cdot T_i + f_p$$

In dieser Gleichung bezeichnen  $a_i$  und  $a_p$  Koeffizienten die sich aus dem gegebenen Geschwindigkeitsfeld, den Materialkonstanten und der Gittergeometrie ergeben. Sie bezeichnen die Kopplung des betrachteten KV mit den benachbarten KV. Da jedes KV nur mit den benachbarten KV gekoppelt ist, entsteht ein dünn besetztes Gleichungssystem, welches üblicherweise iterativ gelöst wird.

---

### A.1.4 Zeitdiskretisierung

---

Die Zeitdiskretisierung wird nach der örtlichen Diskretisierung durchgeführt. Dabei wird der Zeitableitungsterm zu dem bereits diskretisierten Gleichungssystem hinzugefügt. In dieser Arbeit wird das implizite Eulerverfahren zur Zeitdiskretisierung genutzt. Bei der Zeitdiskretisierung ist darauf zu achten,

**Tabelle A.1:** Terme, die in OpenFOAM (OF) implizit diskretisiert werden können

Beschreibung	Ausdruck	Darstellung in OF
Zeitableitung	$\frac{\partial \rho Q}{\partial t}$	fvm::ddt(rho, Q)
Konvektiver Term	$(\vec{v} \cdot \nabla)(\rho Q)$	fvm::div(phi, Q)
Laplace (Diffusion)	$\nabla \cdot \Gamma \nabla Q$	fvm::laplacian(Gamma, Q)
Quelle	$\rho Q$	fvm::Sp(rho, Q)

dass die Zeitschritte klein genug sind, damit die Berechnung stabil läuft. Ein Maß zur Sicherstellung der Stabilität ist die Courantzahl  $Co$ . Sie ist folgendermaßen definiert:

$$Co = \frac{\Delta t \cdot |\vec{v}|}{\Delta x}$$

$\Delta t$  ist die Zeitschrittweite,  $\Delta x$  die Ausdehnung der Gitterzelle in Richtung der Gasgeschwindigkeit. Damit das Verfahren stabil ist, muss für die Courantzahl gelten:  $Co < 1$ . Für Abmessungen der Zellen in Nanometerbereich und Geschwindigkeiten von  $1 \frac{m}{s}$  müssen zur Wahrung dieser Beziehung Schrittzeiten von  $< 1$  ns angesetzt werden. Für unstrukturierte, tetraedrische Gitter verschlechtern sich diese Verhältnisse auf Grund spitz zulaufender Seiten der Kontrollvolumina noch einmal drastisch.

## A.2 Darstellung der Differentialgleichungen in OpenFOAM

Der Kern der Finiten Volumen Methode ist die Diskretisierung der partiellen Differentialgleichungen, vor Allem der Navier-Stokes-Gleichungen. Die Temperaturtransportgleichung

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla)T - \frac{\lambda_G}{\rho c} \cdot \Delta T = 0 \quad (\text{Temperaturtransportgleichung}) \quad (\text{A.1})$$

wird in OpenFOAM folgendermaßen dargestellt:

```

1     fvScalarMatrix TEqn
2     (
3         fvm::ddt(T)
4         + fvm::div(phi, T)
5         - fvm::laplacian(DT, T)==0
6     );

```

Der Typ `fvScalarMatrix` zeigt an, dass es sich um eine skalare Größe handelt, deren Gleichung in diesem Kommando diskretisiert wurde. Aus der Temperaturtransportgleichung wird in diesem Schritt also ein lineares Gleichungssystem, welches anschließend gelöst werden kann. Der Namespace `fvm::` gibt an, dass es sich um eine implizite Diskretisierung handelt, d.H. die Beiträge in der Steifigkeitsmatrix berücksichtigt werden. Der erste Term `fvm::ddt` stellt die Zeitableitung dar. Der zweite Term `fvm::div(phi, T)` bildet den konvektiven Term  $(\vec{v} \cdot \nabla)T$ . Aus numerischen Gründen wird nicht die Geschwindigkeit  $\vec{v}$  zur Produktbildung genutzt, sondern das Skalarprodukt aus der Fläche des Kontrollvolumens und der Geschwindigkeit (face flux field). Der dritte Term stellt den diffusiven Term dar. Tabelle A.1 zeigt die Terme, die in OpenFOAM implizit diskretisiert werden können.

Zusätzlich können in Differentialgleichungen auch Terme auftreten, deren Diskretisierung nicht in der Steifigkeitsmatrix erfolgt, sondern die aus den aktuell berechneten Feldwerten gewonnen werden (explizite Terme). Ein Beispiel hierfür ist der Druckgradient, der in der Impulserhaltungsgleichung erhalten ist:

**Tabelle A.2:** Terme, die in OpenFOAM (OF) explizit berechnet werden

Beschreibung	Ausdruck	Darstellung in OF
Divergenz	$\nabla \cdot \mathbf{Q}$	<code>fvc::div(Q)</code>
Rotation	$\nabla \times \mathbf{Q}$	<code>fvc::curl(Q)</code>
Gradient	$\nabla \mathbf{Q}$	<code>fvc::grad(Q)</code>
Quelle	$Q$	<code>Q</code>

$$\rho \cdot \left( \frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v} \right) - \nu \cdot \Delta \vec{v} = -\nabla p \quad (\text{A.2})$$

Diese Gleichung hat in OpenFOAM die folgende Darstellung:

```
1         fvScalarMatrix UEqn
2         (
3             fvm::ddt(rho U)
4             + fvm::div(phi, U)
5             - fvm::laplacian(nu, U) == -fvc::grad(p)
6         );
```

Die explizite Implementierung wird durch Verwendung des Namespaces `fvc::` gekennzeichnet. Der Druckgradient wird demnach aus dem aktuellen Druckfeld direkt berechnet. Tabelle A.2 zeigt die Terme, die explizit berechnet werden können.

Die Darstellung der Differentialgleichungen im Quellcode entspricht demnach annähernd den Klartextgleichungen, so dass der Quellcode gut verständlich und damit modifizierbar ist.

---

### A.3 Kopplung von Druck und Geschwindigkeit, Druckkorrekturverfahren

---

Zur Lösung der inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen werden sowohl das Druck- als auch das Geschwindigkeitsfeld gelöst. Neben der Impulserhaltungsgleichung (Gleichung (A.2)) ist dies zusätzlich die Äquivalenzgleichung (Massenerhaltung):

$$\nabla \cdot \vec{v} = 0 \quad (\text{A.3})$$

Hierbei handelt es sich eher um eine Bedingung, als um eine lösbare Gleichung, der Druck ist als Variable in dieser Gleichung nicht enthalten. Daher sind besondere Algorithmen notwendig, die die Impulserhaltungsgleichung (Gleichung (A.2)) unter Berücksichtigung der Äquivalenzgleichung (Gleichung (A.3)) lösen. Diese Algorithmen bezeichnet man i.A. als Druckkorrekturverfahren.

In dieser Arbeit wird der sog. PISO-Algorithmus (Pressure-implicit split operator) dafür verwendet, wenn die zeitabhängige (transiente) Lösung berechnet werden soll. Für die stationäre Lösung wird in dieser Arbeit der SIMPLE (Semi-implicit methods pressure-linked equations) - Algorithmus verwendet. Beide Algorithmen sind in [104] dargestellt.

---

### A.4 Implementierung des Photoakustischen Effektes

---

Wie oben beschrieben, lassen sich in OpenFoam die vorhandenen Gleichungen leicht modifizieren bzw. ergänzen. Das kann dazu genutzt werden, um den photoakustischen Effekt zu modellieren. Dazu wurde

der bereits vorhandene Solver rhoPisoFoam gemäß Abschnitt 4.4 modifiziert. In diesem Fall heißt das, dass ein Quellenterm  $s$ , der der absorbierten Lichtleistungsdichte entspricht, der Enthalpieerhaltungsgleichung zugefügt wird. Der Quellenterm wird explizit behandelt. Die Enthalpieerhaltungsgleichung hat damit die Form:

$$\frac{\partial \rho h}{t} + (\vec{v} \cdot \nabla) h - \Delta \frac{\lambda_G}{\rho c} h = \frac{Dp}{Dt} + s \quad (\text{A.4})$$

Sie wird in OpenFOAM folgendermaßen dargestellt:

```

1 {
2
3
4     solve
5     (
6         fvm::ddt(rho, h)
7         + fvm::div(phi, h)
8         - fvm::laplacian(turbulence->alphaEff(), h)
9
10    ==
11    absorbedEnergy + DpDt
12    );
13
14    thermo.correct();
15 }
```

Der Term `absorbedEnergy` steht für die absorbierte Lichtleistung und wird mittels der Lambert-Beer'schen Gesetzes  $s = \alpha \cdot I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot \Delta x}$  aus der Lichtintensität `lightIntensity`  $I_0$  ermittelt.

```

1 {
2     volScalarField lightIntensity
3     (
4         IOobject
5         (
6             "lightIntensity",
7             runtime.timeName(),
8             mesh,
9             IOobject::MUST_READ,
10            IOobject::AUTO_WRITE
11        ),
12        mesh
13    );
14
15    lightIntensity = lightIntensity*exp(-alpha*distance);
16    absorbedEnergy = (lightIntensity*alpha*sign(cos(constant::
17        mathematical::twoPi*frequency*runtime.time()))+lightIntensity*
18        alpha)/2;
19 }
```

Da in einer photoakustischen Messzelle die die Lichtleistung gepulst wird, wird dies auch in dem Solver implementiert. Die Parameter wie Absorptionsfaktor, Frequenz, durchstrahlte Länge etc. werden vor der Ausführung des Solvers eingestellt.

---

## A.5 Randbedingungen in OpenFOAM

---

Neben der Implementierung der eigentlichen Diskretisierung der DGLn sind die Randbedingungen von essentieller Bedeutung für die Lösung strömungstechnischer Probleme. Grundsätzlich gibt es drei Arten von Randbedingungen, die in Variablen vom Typ `fvPatchField<Type>` gespeichert werden:

1. Vorgabe eines festen Wertes für  $\mathbf{Q}_\Gamma$  am Rand des Rechengebietes (Dirichlet'sche Randbedingung), `fixedValue`
2. Vorgabe eines Gradienten normal zur Grenzfläche ( $\vec{n} \cdot \nabla \mathbf{Q}$ ) $_\Gamma$  (Neumann'sche Randbedingung), `fixedGradient`
3. Mischung aus der Vorgabe eines Festwertes und eines Gradienten (Cauchy'sche Randbedingung) , `mixed`

Zusätzlich gibt es noch Geometrische Bedingungen, wie z.B. Symmetrieflächen (`symmetryPlane`) oder zyklische Randbedingungen (`cyclic`). Sowohl die Basisrandbedingungen als auch die geometrischen Randbedingungen greifen direkt in die Diskretisierung der Differentialgleichungen ein und sollten vom Benutzer nicht verändert werden.

Basierend auf den beiden Basis-Randbedingungen gibt es in OpenFOAM abgeleitete Randbedingungen (derived boundary). Diese bieten die Möglichkeit die Werte auf dem Rand bzw. den Gradienten am Rand aus anderen Feldgrößen zu berechnen. Dazu wird die Funktion `updateCoeffs()` zur Verfügung gestellt, in welcher der Benutzer die gewünschte Rechenoperation implementieren kann. So kann z.B. die Slip-Randbedingung für die Temperatur implementiert werden, wenn die gemischte Randbedingung (`mixed`) folgendermaßen erweitert wird:

```
1 // Update the coefficients associated with the patch field
2 void smoluchowskiJumpTFvPatchScalarField::updateCoeffs()
3 {
4     if (updated())
5     {
6         return;
7     }
8
9     dimensionedScalar Pr = dimensionedScalar("Pr", dimless, 0.72);
10 //67e-9 -> mittlere freie Weglaenge von Luft
11     scalar C2 = lambda_
12         *2.0*gamma_/Pr.value()/(gamma_ + 1.0)
13         *(2.0 - accommodationCoeff_)/accommodationCoeff_;
14
15
16     valueFraction() = 1.0/(1.0 + patch().deltaCoeffs()*C2);
17
18
19     refValue() = Twall_;
20     refGrad() = 0.0;
21
22     mixedFvPatchScalarField::updateCoeffs();
```

Die nötigen Variablen werden samt Werten bereits in den Konstruktoren für die Klasse initialisiert. Das ist notwendig, wenn die Werte dafür in den Cases festgelegt werden sollen. In OpenFOAM wird die mixed-Randbedingung für die Temperatur folgendermaßen interpretiert:

$$T_{\Gamma} = w \cdot T_{\Gamma,\text{ref}} + (1 - w)(T_C + (\vec{n} \cdot \nabla T)_{\Gamma}) \cdot \Delta$$

$T_{\Gamma}$  = Temperaturrandbedingung zur Implementierung in der Steifigkeitsmatrix  
 $T_{\Gamma,\text{ref}}$  = vorgegebene Grenzflächentemperatur `refValue()`  
 $(\vec{n} \cdot \nabla T)_{\Gamma,\text{ref}}$  = vorgegebener Temperaturgradient  
 $T_C$  = Feldtemperatur im zur Grenzfläche gehörenden Kontrollvolumen `patch().internalField()`  
 $\Delta$  = Abstand zwischen Feldmitte und Grenzfläche `1/patch().deltaCoeffs()`  
 $w$  = Gewichtungsfaktor `valueFraction`

Für die Referenztemperatur  $T_{\Gamma,\text{ref}}$  wird die Wandtemperatur  $T_{\text{Wall}}$  eingesetzt, der Referenzgradient  $(\vec{n} \cdot \nabla T)_{\Gamma,\text{ref}}$  wird zu 0 gesetzt. Weiterhin wird der Gewichtungskoeffizient zu  $w = \frac{1}{1+C2/\Delta}$  gesetzt, mit  $C2 = \frac{2-\sigma_T}{\sigma_T} \left[ \frac{2\gamma}{\gamma+1} \right] \frac{\bar{l}}{Pr}$ , aus der von Smoluchowski'schen Slip-Randbedingung. Daraus ergibt sich

$$T_{\Gamma} = \frac{1}{1 + C2/\Delta} T_{\text{Wall}} + \left( 1 - \frac{1}{1 + C2/\Delta} \right) T_C$$

was wiederum nach einigem Umformen die v. Smoluchowski'sche Slip-Randbedingung für die Temperatur ergibt.

$$T_{\Gamma} - T_{\text{Wall}} = C2 \frac{T_C - T_{\Gamma}}{\Delta}$$

ergibt.

Die `updateCoeffs()`-Funktion ermöglicht eine einfache Implementierung von Randbedingungen, die Berechnungen aus den aktuellen Feldern benötigen. Dieser Umstand kann auch genutzt werden, um verschiedene Regionen zu koppeln.

---

## A.6 Solver für 2-Regionen-Simulation

---

Zur Berechnung von Temperaturen sowohl im Gas (Fluid) als auch im Festkörper (Solid) werden in dieser Arbeit `solver` verwendet, die über die Randbedingung an der Grenzfläche gekoppelt sind. Dazu werden nacheinander die Gleichungen für die Berechnung der Felder im Solid und im Fluid aufgerufen. Die Gleichungen für das Druck- bzw. Geschwindigkeitsfeld werden aus externen Dateien aufgerufen (`#include "UEqn.C"` bzw. `#include "pEqn.C"`).

```

1 {
2 Info << "\nSolving_temperature_in_fluid" << endl;
3
```

```

4         fvScalarMatrix TEqn
5     (
6
7         fvm::div(phi, T)
8     - fvm::laplacian(DTFluid, T)
9     );
10         for (int count = 1; count < 2; count++)
11         {
12             Info << "Iteration_Cycle:_" << count << endl;
13             TEqn.relax();
14             TEqn.solve();
15         }
16         Info << "Solving_pressure_/velocity_field_in_fluid
17             \n" << endl;
18
19         p.storePrevIter();
20         #include "UEqn.H"
21         #include "pEqn.H"
22
23         Info << "Solving_Temperature_in_solid\n" << endl;
24
25
26
27
28     fvScalarMatrix TEqn_solid
29     (
30         -fvm::laplacian(DTSolid, T_solid) == DTSolid*powerDensity/
31         KSolid
32     );
33     for (int count = 1; count < 2; count++)
34     {
35         Info << "Iteration_Cycle:_" << count << endl;
36         TEqn_solid.relax();
37         TEqn_solid.solve();
38     }

```

Es findet also nur ein aufeinander folgendes Aufrufen der Gleichungen statt. Die Kopplung wird ausschließlich über die Randbedingungen durchgeführt. Dazu stellt OpenFoam eine abgeleitete Randbedingung `mappedPatch` zur Verfügung, die auf Feldgrößen im jeweils anderen Rechengebiet zugreifen kann. Ein Blick auf die `updateCoeffs()`-Methode zeigt die Funktionsweise der Randbedingung. Es sind ausschließlich die Temperaturfelder gekoppelt, so dass nur die Temperaturrandbedingung angepasst werden muss.

```

1 {
2 void turbulentTemperatureCoupledBaffleMixedFvPatchScalarField::updateCoeffs
   ()
3 {
4     if (updated())
5     {

```

```

6     return ;
7 }
8
9 // Since we're inside initEvaluate/evaluate there might be processor
10 // comms underway. Change the tag we use.
11 int oldTag = UPstream::msgType();
12 UPstream::msgType() = oldTag+1;
13
14 // Get the coupling information from the mappedPatchBase
15 const mappedPatchBase& mpp = refCast<const mappedPatchBase>
16 (
17     patch().patch()
18 );
19 const polyMesh& nbrMesh = mpp.sampleMesh();
20 const fvPatch& nbrPatch = refCast<const fvMesh>
21 (
22     nbrMesh
23 ).boundary()[mpp.samplePolyPatch().index()];
24
25 // Force recalculation of mapping and schedule
26 const mapDistribute& distMap = mpp.map();
27
28 tmp<scalarField> intFld = patchInternalField();
29
30
31 // Calculate the temperature by harmonic averaging
32 // ~~~~~
33
34 const turbulentTemperatureCoupledBaffleMixedFvPatchScalarField&
35     nbrField =
36     refCast
37     <
38         const turbulentTemperatureCoupledBaffleMixedFvPatchScalarField
39     >
40     (
41         nbrPatch.lookupPatchField<volScalarField, scalar>
42         (
43             neighbourFieldName_
44         )
45     );
46
47 // Swap to obtain full local values of neighbour internal field
48 scalarField nbrIntFld(nbrField.patchInternalField());
49 distMap.distribute(nbrIntFld);
50
51
52     scalarField nbrGrad(nbrField.snGrad());
53     distMap.distribute(nbrGrad);
54

```

```

55 // Swap to obtain full local values of neighbour K*delta
56 scalarField nbrK(nbrField.K(nbrField));
57 distMap.distribute(nbrK);
58
59 tmp<scalarField> myK = K(*this);
60
61     scalarField nbrFld(nbrField);
62     distMap.distribute(nbrFld);
63
64     scalarField nbrDelta(nbrPatch.deltaCoeffs());
65     distMap.distribute(nbrDelta);
66
67
68
69 // Both sides agree on
70 // - temperature : (myKDelta*fld + nbrKDelta*nbrFld)/(myKDelta+
71 //                 nbrKDelta)
72 // - gradient    : (temperature-fld)*delta
73 // We've got a degree of freedom in how to implement this in a mixed bc
74 // (what gradient, what fixedValue and mixing coefficient)
75 // Two reasonable choices:
76 // 1. specify above temperature on one side (preferentially the high
77 //    side)
78 //    and above gradient on the other. So this will switch between pure
79 //    fixedvalue and pure fixedgradient
80 // 2. specify gradient and temperature such that the equations are the
81 //    same on both sides. This leads to the choice of
82 //    - refGradient = zero gradient
83 //    - refValue = neighbour value
84 //    - mixFraction = nbrKDelta / (nbrKDelta + myKDelta())
85
86
87 this→refValue() = nbrFld;
88
89 this→refGrad() = -nbrK/myK*nbrGrad;
90
91
92     if (patch().boundaryMesh().mesh().name() == "solid")
93     {
94         scalarField nbrQr = nbrPatch.lookupPatchField<volScalarField,
95             scalar>("Qr");
96         distMap.distribute(nbrQr);
97         this→refGrad() = -nbrK/myK*nbrGrad + nbrQr;
98     };
99
100 //this→valueFraction() = nbrKDelta / (nbrKDelta + myKDelta());
101
102     scalar C2 = 0;

```

```

101
102     if (slip_ != 0)
103     {
104         //const dictionary& thermophysicalProperties = db().
105         //lookupObject<IOdictionary>("thermophysicalProperties");
106
107         scalar Pr = 0.72;
108
109         C2 = lambda_
110         *2.0*gamma_/Pr/(gamma_ + 1.0)
111         *(2.0 - accommodationCoeff_)/accommodationCoeff_;
112
113         this->refGrad() = 0;
114         this->refValue() = nbrFld;
115         this->valueFraction() = 1.0/(1.0 + patch().deltaCoeffs()*C2
116         );
117     }
118     mixedFvPatchScalarField::updateCoeffs();
119     {
120         scalar Q = gSum(K(*this)*patch().magSf()*snGrad());
121
122         Info<< patch().boundaryMesh().mesh().name() << ': '
123         << patch().name() << ': '
124         << this->dimensionedInternalField().name() << " _<-_"
125         << nbrMesh.name() << ': '
126         << nbrPatch.name() << ': '
127         << this->dimensionedInternalField().name() << " _:"
128         << " _heat[W]:" << Q
129         << " _walltemperature_"
130         << " _min:" << gMin(*this)
131         << " _max:" << gMax(*this)
132         << " _avg:" << gAverage(*this)
133         << " _slip_coefficient_C2_" << C2
134         << endl;
135         //Info << snGrad() << endl;
136     }
137     // Restore tag
138     UPstream::msgType() = oldTag;
139 }
140 }

```

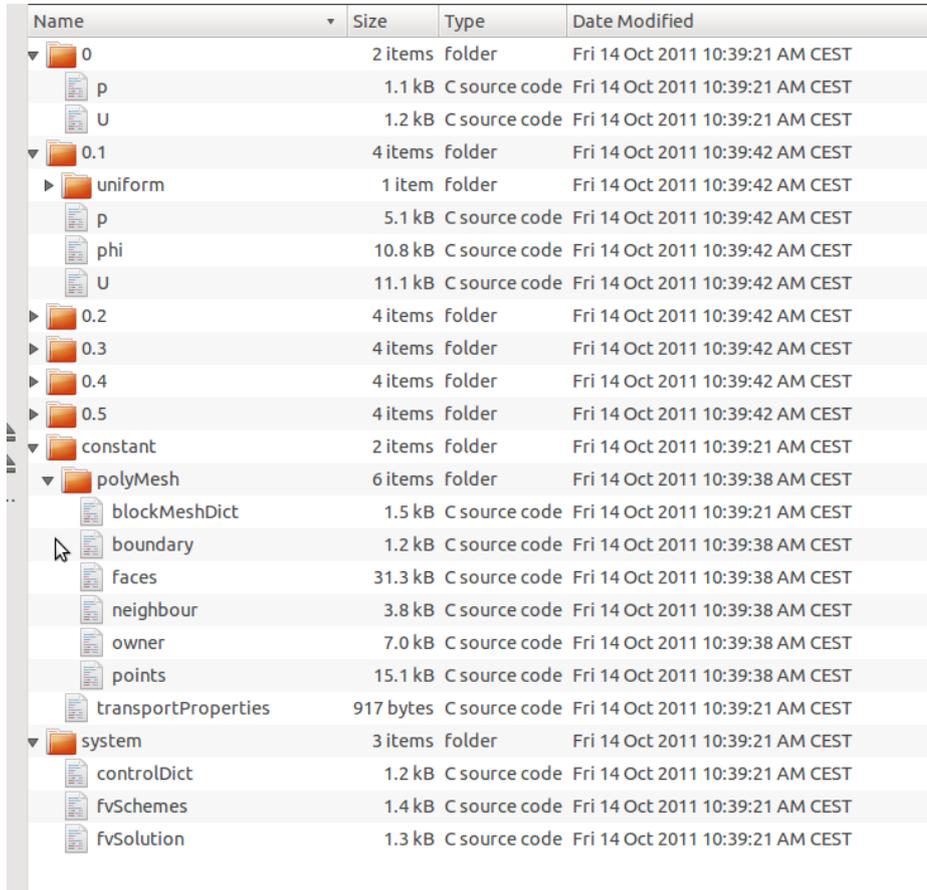
Neben der Kopplung beinhaltet diese Randbedingung zusätzlich die Berücksichtigung der Slip-Randbedingungen für die Temperatur und den Wärmefluss durch die Strahlung. Selbst implementierte Solver müssen kompiliert werden, damit sie verwendet werden können. Mit `wmake` stellt OpenFOAM eine einfache Routine zur Kompilierung von OpenFOAM Quellcode zur Verfügung.

---

## A.7 Aufbau von OpenFOAM-Cases

---

Berechnungen von OpenFOAM sind in sog. *cases* organisiert. Dazu sind alle nötigen Informationen in in einer bestimmten Ordnerstruktur abgespeichert (siehe Abbildung A.2). Das Verzeichnis 0 beinhaltet alle Randbedingungen, bzw. Startbedingungen. Die anderen numerischen Verzeichnisse sind die Berechnungsergebnisse.



Name	Size	Type	Date Modified
0	2 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
p	1.1 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
U	1.2 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
0.1	4 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
uniform	1 item	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
p	5.1 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
phi	10.8 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
U	11.1 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
0.2	4 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
0.3	4 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
0.4	4 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
0.5	4 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:42 AM CEST
constant	2 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
polyMesh	6 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
blockMeshDict	1.5 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
boundary	1.2 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
faces	31.3 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
neighbour	3.8 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
owner	7.0 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
points	15.1 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:38 AM CEST
transportProperties	917 bytes	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
system	3 items	folder	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
controlDict	1.2 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
fvSchemes	1.4 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST
fvSolution	1.3 kB	C source code	Fri 14 Oct 2011 10:39:21 AM CEST

**Abbildung A.2:** Dateistruktur eines OpenmFOAM cases

Im Verzeichnis `constant/polyMesh` ist das Rechenetz abgespeichert. In diesem Verzeichnis in der Datei `boundary` werden die Randbedingungstypen (z.B. `patch`, `cyclic`, `symmetryPlane`, `mappedPatch`). Zusätzlich werden noch einige Modelldaten festgelegt, im Beispiel in Abbildung A.2 die Viskosität in der Datei `transportProperties`. Im Unterverzeichnis `system` wird die Steuerung der Solver vorgenommen. Dazu gehört die Zeitschrittsteuerung, Speicherformate, Parallelisierung usw. Aber auch die Diskretisierungsschemata sowie die Einstellungen zum Lösen der resultierenden Gleichungssysteme werden hier festgelegt. Die möglichen Einstellungsmöglichkeiten sind im *OpenFoam Userguide* [56] dargestellt.

---

## A.8 Parameter der in der Arbeit durchgeführten Simulationen

---

Im nachfolgenden Abschnitt werden die Einstellungen der Solver für einige der in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen vorgestellt. Dies dient der Bewertung der Ergebnisse und numerischen Stabilität der Berechnungen. Vor allem bei komplexen Geometrien, wie den Nanodrahtarrays, wo mit Zellen gearbeitet wird die eine gewisse Nichtorthogonalität als auch Verzerrung (*skewness*) aufweisen, führen nicht alle Diskretisierungsschemata zum Erfolg.

## A.8.1 Modellierung des Piranisensors nach Abschnitt 4.3.6

Nachfolgend sind alle Parameter zur Durchführung der Simulation des Piranisensors aufgeführt.

### Randbedingungen

Im Verzeichnis 0 sind die Start- und Randbedingungen für alle Felder hinterlegt. Da es sich bei der Modellierung des Piranisensors um eine 2-Regionen-Simulation handelt, werden auch für beide Regionen Rand- und Startbedingungen benötigt. Von besonderem Interesse sind die Randbedingungen an den Grenzflächen zwischen den beiden Regionen, über die beide miteinander gekoppelt sind. Das Rechengebiet mit den Rändern ist in Abbildung dargestellt.

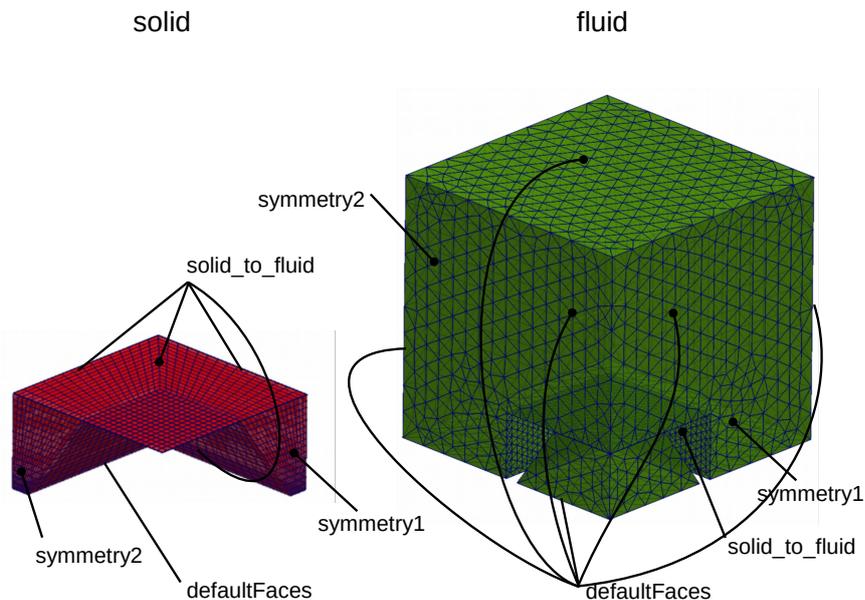


Abbildung A.3: Rechengebiet und Ränder für die Simulation des Pirani-Sensors

### Randbedingungen im Festkörper

Im Festkörper wird nur die Temperatur berechnet. Zusätzlich wird die Wärmeleitfähigkeit ( $K_{Solid}$ ) sowie die Leistungsdichte ( $powerDensity$ ) zur Erzeugung der Heizleistung, als Feld hinterlegt. Die beiden letztgenannten werden während der Berechnung jedoch nicht verändert.

Name	Size	Type
$K_{Solid}$	49.4 kB	C source code
$powerDensity$	35.0 kB	C source code
T	1.6 kB	C source code

Abbildung A.4: Konfigurations-Dateien für Felder, für die Start- bzw. Randbedingungen benötigt werden

*Randbedingungen für die Temperatur T:* Das Keyword `dimensions` legt die Einheiten (SI-System, vgl. [56]) fest, das Keyword `internalField` legt sie Startbedingung fest.

```
1  
2 dimensions [0 0 0 1 0 0 0];
```

```

3
4 internalField    uniform 300;
5
6 boundaryField
7 {
8     defaultFaces
9     {
10         type            fixedValue;
11         value            uniform 300;
12     }
13     symmetry1
14     {
15         type            symmetryPlane;
16     }
17     symmetry2
18     {
19         type            symmetryPlane;
20     }
21     solid_to_fluid
22     {
23         type            turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
24         neighbourFieldName T;
25         K                lookup;
26         KName            KSolid;
27         refValue         uniform 300;
28         refGradient      uniform 0;
29         valueFraction    0;
30         slip              0;
31         gamma            1.4;
32         accommodationCoeff 0.77;
33         lambda           1e-30;
34         value            uniform 300;
35     }
36 }

```

An der Grenzfläche `solid_to_fluid` wird die Kopplung zwischen den Rechengebieten durchgeführt. Der Wert für die mittlere Freie Weglänge `lambda` wird auf einen unendlich kleinen Wert gesetzt, der Wert für `valueFraction` wird auf 0 gesetzt, damit die Randbedingung zu einer reinen Gradientenrandbedingung wird. Die restlichen Angaben sorgen dafür, dass die korrespondierende Randbedingung im Gas (fluid) gefunden wird, damit die Werte zur Berechnung genutzt werden können.

### Randbedingungen im Gas

Bei dem Piranisor befindet sich das Gas in Ruhe, daher wird ebenfalls nur die Temperatur berechnet. Zusätzlich wird jedoch ein Strahlungsmodell berechnet (P1-Modell), welche zusätzliche Feldberechnungen (Strahlungsintensität  $G$  und Strahlungswärmefluss  $Q_r$ ) erforderlich macht. Zusätzlich müssen die Konstanten für die Wärmeleitfähigkeit ( $K_{\text{fluid}}$ ) sowie für den Absorptionsfaktor ( $a$ ) festgelegt werden, deren Werte aber im Verlauf der Berechnungen nicht verändert werden.

Name	Size	Type
a	1.3 kB	C source code
cellToRegion	1.3 kB	C source code
G	1.6 kB	C source code
KFluid	1.3 kB	C source code
p	1.3 kB	C source code
Qr	1.3 kB	C source code
T	1.7 kB	C source code
U	1.3 kB	C source code

**Abbildung A.5:** Konfigurations-Dateien für Felder, für die Start- bzw. Randbedingungen benötigt werden. Das Druck- und Temperaturfeld werden nicht benötigt, und werden nur aus Kompatibilitätsgründen mitgeführt

*Randbedingungen für die Temperatur T*

```

1 dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 300;
4
5 boundaryField
6 {
7     symmetry1
8     {
9         type      symmetryPlane;
10    }
11    symmetry2
12    {
13        type      symmetryPlane;
14    }
15    defaultFaces
16    {
17        type      smoluchowskiJumpT;
18        accomodationCoeff 0.95;
19        Twall     uniform 300;
20        gamma     1.4;
21    lambda 1e-7;
22        value     uniform 300;
23    }
24    fluid_to_solid
25    {
26        type      turbulentTemperatureCoupledBaffleMixed;
27        neighbourFieldName T;
28        K         lookup;
29        KName     KFluid;
30        refValue  uniform 300;
31        refGradient uniform 0;
32        valueFraction 1;
33        slip      1;

```

```

34         gamma          1.4;
35         accommodationCoeff 0.95;
36 lambda 1e-7;
37         value          uniform 300;
38     }
39 }

```

Auch hier ist wieder die Randbedingung an der Grenzfläche zwischen Festkörper und Gas von besonderem Interesse. Der Wert für `valueFraction` ist auf 1 festgelegt, so dass die Randbedingung einer Dirichlet'schen Randbedingung entspricht. Der Wert für `slip` ist eins, was bedeutet dass der Slip-Randbedingung berechnet wird. Zusätzlich sind der Akkommodationskoeffizient `accommodationCoeff` sowie die mittlere freie Weglänge `lambda` auf die entsprechenden Werte gesetzt.

*Randbedingung für den Strahlungsintensität G*

```

1 dimensions      [1 0 -3 0 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 0;
4
5 boundaryField
6 {
7     symmetry1
8     {
9         type          symmetryPlane;
10    }
11    symmetry2
12    {
13        type          symmetryPlane;
14    }
15    defaultFaces
16    {
17        type          MarshakRadiation;
18        T              T;
19        emissivityMode lookup;
20        emissivity    uniform 1;
21        Trad          uniform 300;
22        value         uniform 0;
23    }
24    fluid_to_solid
25    {
26        type          MarshakRadiationCoupledFixedT;
27        T              T;
28        emissivityMode lookup;
29        emissivity    uniform 0.25;
30        Trad          uniform 300;
31        value         uniform 0;
32    }
33 }

```

Auch hier ist die Kopplung wieder von besonderem Interesse, da die Strahlungsintensität von der Temperatur des Festkörpers abhängt.

*Strahlungswärmefluss  $Q_r$*

---

Der Strahlungswärmefluss wird aus der Strahlungsintensität berechnet. Die Berechnung wird nur an Grenzflächen durchgeführt.

### Diskretisierungsschemata

Um die Navier-Stokes-Gleichungen numerisch zu lösen, müssen sie diskretisiert werden. Die Schemata dafür werden in der Datei `fvSchemes` festgelegt. Dabei wird für jeden in den DGLn auftretenden Term die Diskretisierung einzeln festgelegt. Die Bedeutung ist im *OpenFoam Userguide*, der dem Programm beiliegt, dargestellt. Nachfolgend sind die Diskretisierungsschemata für den Festkörper (solid region) und das Gas (fluid region) dargestellt.

Diskretisierung für den Festkörper (Solid): Prinzipiell werden nur Diffusionsterme (`laplacian`) und die Zeitableitung (`ddt`) diskretisiert, die jedoch in der zeitunabhängigen stationären Lösung nicht benötigt wird (Keyword `steadyState`).

```
1
2 ddtSchemes
3 {
4     default          steadyState;
5 }
6
7 gradSchemes
8 {
9     default          Gauss linear;
10    grad(T)          Gauss linear;
11 }
12
13 divSchemes
14 {
15     default          none;
16 }
17
18 laplacianSchemes
19 {
20     default          none;
21     laplacian(DTSolid,T) Gauss linear corrected;
22     laplacian(KSolid,T) Gauss linear corrected;
23 }
24
25 interpolationSchemes
26 {
27     default          linear;
28 }
29
30 snGradSchemes
31 {
32     default          limited 0.5;
33 }
34
35 fluxRequired
36 {
37     default          no;
```

```
38     T           ;
39 }
```

Für das Gas (fluid region) wird zusätzlich noch die Strahlung benötigt. Da sich das Gas für die Berechnung beim Piranisenor in Ruhe befindet, wird keine Konvektion berücksichtigt.

```
1
2 ddtSchemes
3 {
4     default         steadyState;
5 }
6
7 gradSchemes
8 {
9     default         Gauss linear;
10    grad(p)          Gauss linear;
11 }
12
13 divSchemes
14 {
15     default         none;
16    div(phi,U)       Gauss linear;
17    div(phi,T)       Gauss linear;
18 }
19 laplacianSchemes
20 {
21     default         none;
22    laplacian(nu,U)   Gauss linear corrected;
23    laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear corrected;
24    laplacian(DTFluid,T) Gauss linear uncorrected;
25        laplacian(KFluid,T) Gauss linear uncorrected;
26        laplacian(gammaRad,G) Gauss linear uncorrected;
27 }
28
29 interpolationSchemes
30 {
31     default         linear;
32    interpolate(HbyA) linear;
33 }
34
35 snGradSchemes
36 {
37     default         litted 0.5;
38 }
39
40 fluxRequired
41 {
42     default         no;
43    p;
44 }
```

## Wahl und Steuerung der Lösungsalgorithmen für die resultierenden Gleichungssysteme

Aus der Diskretisierung ergeben sich Gleichungssysteme, die gelöst werden müssen. Die Algorithmen zur Lösung dieser Gleichungssysteme werden in der Datei `fvSolution` festgelegt. Welche Solver für welche Gleichungssysteme verwendet werden können ist im OpenFOAM Userguide beschrieben. Zusätzlich werden die Anzahl der Korrekturschleifen für die Druckkorrekturverfahren sowie die Relaxationsfaktoren für die Gleichungssysteme festgelegt. Im Fall des Piranisenors wird nur das Temperaturfeld im ruhenden Gas berechnet, was die Verwendung eines Druckkorrekturverfahrens obsolet macht.

Einstellungen für den Festkörper:

```
1 solvers
2 {
3     T
4     {
5         solver          PCG;
6         preconditioner  DIC;
7         tolerance       0;
8         relTol          1e-2;
9     }
10 }
11
12 SIMPLE
13 {
14     nNonOrthogonalCorrectors 0;
15 }
16
17 relaxationFactors
18 {
19     fields
20     {
21     }
22     equations
23     {
24         T                0.9995;
25     }
26 }
```

Einstellungen für das Fluid:

```
1 solvers
2 {
3     p PCG
4     {
5         preconditioner  DIC;
6         tolerance       1e-06;
7         relTol          0;
8     };
9
10 // T BICCG 1e-07 0;
11     T
12     {
13         solver          PCG;
```

```

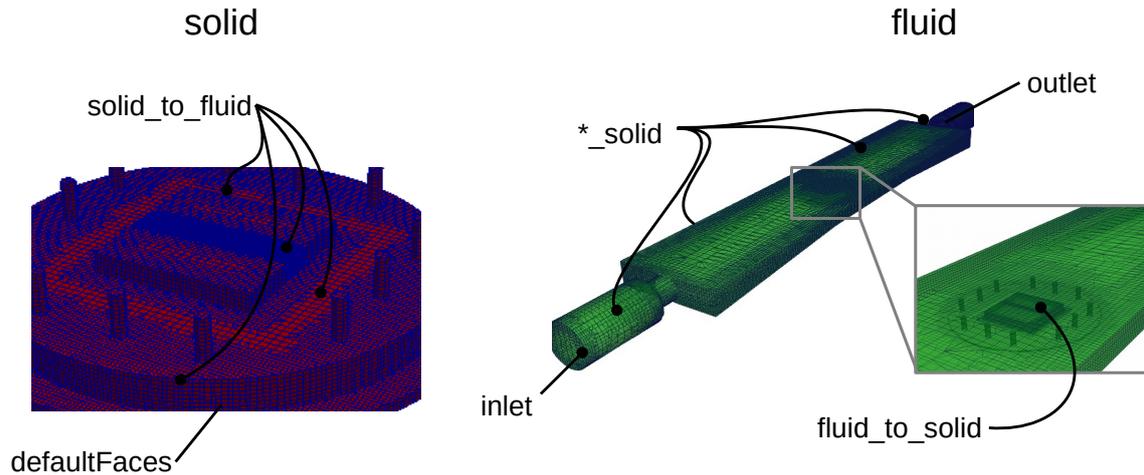
14     preconditioner  DIC;
15     tolerance      0;
16     relTol         1e-2;
17 }
18
19
20 U PBiCG
21 {
22     preconditioner  DILU;
23     tolerance      1e-3;
24     relTol         0;
25 };
26 G
27 {
28     solver          PCG;
29     preconditioner  DIC;
30     tolerance      0;
31     relTol         1e-1;
32 }
33 }
34
35 PISO
36 {
37     nCorrectors     2;
38     nNonOrthogonalCorrectors 2;
39     pRefCell        0;
40     pRefValue       0;
41 }
42
43 SIMPLE
44 {
45     nNonOrthogonalCorrectors 0;
46 }
47
48 relaxationFactors
49 {
50     fields
51     {
52     }
53     equations
54     {
55         T           0.9995;
56     }
57 }

```

Die gleichen Einstellungen müssen für jede Simulation die durchgeführt werden soll, gemacht werden.

## A.8.2 Modellierung des Strömungskanals der ersten Generation nach Abschnitt 6.4.1

Bei der Modellierung des Strömungssensors handelt es sich ebenfalls um eine stationäre 2-Regionen-Simulation. Zusätzlich zum Temperaturfeld, wird jedoch die Strömung im Gas berechnet. Hierzu kommt ein inkompressibles Modell gemäß Abschnitt 4.3.1 zum Einsatz. Die Namen der Grenzflächen sind in Abbildung A.6 dargestellt, die dazugehörigen Randbedingungen sind in den Konfigurationsdatei-Auszügen nachfolgend dargestellt. Der Solver zur Berechnung der Felder wird mit `chtMultiRegionIcoTempSlipSIMPLEFoam` aufgerufen.



**Abbildung A.6:** Rechengebiet und Ränder für die Simulation Sensors im Strömungskanal der ersten Generation. Die Grenzflächen `*_solid` beschreiben die durch die Kanalwände repräsentierten Ränder

### Randbedingungen im Festkörper

Nachfolgend sind die Rand- und Startbedingungen in Auszügen der Konfigurations-Dateien dargestellt. Die Randbedingungen, die sich aus den Wänden des Kanals ergeben sind in Abbildung A.6 unter dem Keyword `*_solid` zusammengefasst, werden aber in den Konfigurationsdateien einzeln angesprochen. In Abbildung A.7 sind die Felder, für die Start- und Randbedingungen benötigt werden, dargestellt.

	DTSolid	2,7 MB	Text	Aug 28 2014
	KSolid	1,7 MB	Text	Aug 28 2014
	powerDensity	1,0 MB	Text	Aug 28 2014
	T	1,4 kB	Text	Jul 23 2014

**Abbildung A.7:** Felder, für die Start- und Randbedingungen benötigt werden

Die Felder `KSolid` und `DTSolid` stellen die Materialkonstanten Wärmeleitfähigkeit und Wärmediffusionskoeffizient dar, und werden während der Berechnung nicht verändert. Das Feld `powerDensity` stellt die Leistungsdichte  $p$  dar, und ist überall 0 außer im Heizelement. Auch sie wird während der Berechnung nicht verändert. Daher werden nur die Randbedingungen für die Temperatur im Folgenden dargestellt.

*Randbedingungen für die Temperatur T*

```
1 dimensions [0 0 0 1 0 0 0];
```

```

2
3 internalField    uniform 300;
4
5 boundaryField
6 {
7     inlet
8     {
9         type      fixedValue;
10        value      uniform 300;
11    }
12
13    outlet
14    {
15        type      zeroGradient;
16        value      uniform 300;
17    }
18
19    defaultWalls
20    {
21        type      fixedValue;
22        value      uniform 300;
23    }
24    bottom_solid
25    {
26        type      fixedValue;
27        value      uniform 300;
28    }
29    inlet_solid
30    {
31        type      fixedValue;
32        value      uniform 300;
33    }
34
35    outlet_solid
36    {
37        type      fixedValue;
38        value      uniform 300;
39    }
40    top_solid
41    {
42        type      fixedValue;
43        value      uniform 300;
44    }
45    fluid_to_solid
46    {
47        type      temperatureSlipCoupledBaffleMixed;
48        neighbourFieldName T;
49        K         lookup;
50        KName     KFluid;
51        refValue  uniform 300;

```

```

52     refGradient      uniform 0;
53     valueFraction    1;
54     slip              1;
55     value             uniform 300;
56         gamma        1.4;
57         accommodationCoeff 0.9;
58         lambda        60e-9;;
59     }
60 }

```

Auch in dieser Simulation wurde die Möglichkeit implementiert, eine Slip-Randbedingung an der Grenzfläche zwischen solid und fluid zu implementieren.

### Randbedingungen im Fluid

Abbildung A.8 zeigt die Konfigurationsdateien für die zu berechnenden Felder. DTFluid und KFluid bezeichnen wieder die Wärmediffusion bzw. Wärmeleitfähigkeit des Gases. Da das Geschwindigkeits-, das Druck- und das Temperaturfeld berechnet werden sollen, ist es notwendig, für diese Größen Start- und Randbedingungen vorzuhalten.

Name	Size	Type	Modified
DTFluid	1,5 kB	Text	Jul 23 2014
KFluid	1,5 kB	Text	Jul 23 2014
p	1,5 kB	Text	Jul 23 2014
T	2,0 kB	Text	Jan 24
U	1,7 kB	Text	Aug 28 2014

**Abbildung A.8:** Felder, für die Start- und Randbedingungen benötigt werden

*Randbedingung für die Temperatur T*

```

1 dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 300;
4
5 boundaryField
6 {
7     inlet
8     {
9         type      fixedValue;
10        value      uniform 300;
11    }
12
13    outlet
14    {
15        type      zeroGradient;
16        value      uniform 300;
17    }
18    bottom_solid
19    {

```

```

20     type          fixedValue;
21         value          uniform 300;
22     }
23     inlet_solid
24     {
25         type          fixedValue;
26         value          uniform 300;
27     }
28
29     outlet_solid
30     {
31         type          fixedValue;
32         value          uniform 300;
33     }
34     top_solid
35     {
36         type          fixedValue;
37         value          uniform 300;
38     }
39     fluid_to_solid
40     {
41         type          temperatureSlipCoupledBaffleMixed;
42         neighbourFieldName T;
43         K              lookup;
44         KName          KFluid;
45         refValue       uniform 300;
46         refGradient    uniform 0;
47         valueFraction  1;
48         slip           1;
49         value          uniform 300;
50             gamma          1.4;
51             accommodationCoeff 0.9;
52             lambda         60e-9;;
53     }
54 }

```

Die Slip-Randbedingung ist eingeschaltet, sie wird also bei der Berechnung mit berücksichtigt. Da die Nanostrukturen in diesem Fall nicht mit modelliert werden, hat sie jedoch keinen nennenswerten Einfluss.

*Randbedingungen für die Geschwindigkeit U*

```

1 dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
2
3 internalField   uniform (0 0 0);
4
5 boundaryField
6 {
7     inlet
8     {
9         type          fixedValue;
10    value          uniform (0 0 0); //changeVelocity

```

```

11     }
12
13     outlet
14     {
15         type          zeroGradient;
16         value          uniform (0 0 0);
17     }
18
19     bottom_solid
20     {
21         type          fixedValue;
22         value          uniform (0 0 0);
23     }
24     inlet_solid
25     {
26         type          fixedValue;
27         value          uniform (0 0 0);
28     }
29
30     outlet_solid
31     {
32         type          fixedValue;
33         value          uniform (0 0 0);
34     }
35     top_solid
36     {
37         type          fixedValue;
38         value          uniform (0 0 0);
39     }
40     fluid_to_solid
41     {
42         type          fixedValue;
43         value          uniform (0 0 0);
44     }
45
46 }

```

Zu erkennen ist, dass an allen Rändern eine no-slip Randbedingung implementiert wurde. Lediglich am Outlet (Auslass) wurde ein Nullgradient angenommen. Die Einlassgeschwindigkeit wird variiert, um das Temperatur- und Geschwindigkeitsfeld in Abhängigkeit der Einlassgeschwindigkeit zu berechnen. Der Kommentar `//changeVelocity` dient zur Identifikation der Einlasrandbedingung für ein externes Skript. Damit kann die Geschwindigkeitsvariation automatisch durch ein Skript durchgeführt werden.

*Randbedingung für den Druck p*

```

1 dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 0;
4
5 boundaryField
6 {
7     inlet

```

```

8      {
9          type          zeroGradient;
10         value          uniform 0;
11     }
12
13     outlet
14     {
15         type          fixedValue;
16         value          uniform 0;
17     }
18
19     defaultWalls
20     {
21         type          zeroGradient;
22     }
23     bottom_solid
24     {
25         type          zeroGradient;
26     }
27     inlet_solid
28     {
29         type          zeroGradient;
30     }
31     outlet_solid
32     {
33         type          zeroGradient;
34     }
35
36     top_solid
37     {
38         type          zeroGradient;
39     }
40     fluid_to_solid
41     {
42         type          zeroGradient;
43     }
44
45 }

```

Zur Berechnung des Geschwindigkeitsfeldes ist auch die Berechnung des Druckfeldes nötig. Zur einfacheren Berechnung wird für inkompressible Solver der dynamische Druck  $p_{\text{dyn}} = \frac{\rho}{2} v^2$  berechnet. Wird die Dichte als Konstante betrachtet, kann der Druck  $p$  aus dem dynamischen Druck berechnet werden. Am auslass wird eine Festwert-Randbedingung appliziert. Der absolute Wert spielt keine Rolle, für das resultierende Geschwindigkeitsfeld sind nur die Druckdifferenzen von Interesse. Wichtig anzumerken ist, dass immer nur eine Festwert-Randbedingung am Aus- bzw. Einlass appliziert werden darf (für Geschwindigkeit und Druck). Sonst ist das resultierende Gleichungssystem nicht lösbar.

### Konfiguration der Diskretisierungsschemata

Festkörper:

```
1 ddtSchemes
```

```

2 {
3     default           Euler;
4 }
5
6 gradSchemes
7 {
8     default           Gauss linear;
9     grad(T)            Gauss linear;
10 }
11
12 divSchemes
13 {
14     default           none;
15 }
16
17 laplacianSchemes
18 {
19     default           none;
20     laplacian(DTSolid,T) Gauss linear uncorrected;
21     laplacian(KSolid,T) Gauss linear uncorrected;
22 }
23
24 interpolationSchemes
25 {
26     default           linear;
27 }
28
29 snGradSchemes
30 {
31     default           corrected;
32 }
33
34 fluxRequired
35 {
36     default           no;
37     T                   ;
38 }

```

Gas (Fluid):

```

1 ddtSchemes
2 {
3     default           Euler;
4 }
5
6 gradSchemes
7 {
8     default           Gauss linear;
9     grad(p)            Gauss linear;
10 }
11

```

```

12 divSchemes
13 {
14     default           none;
15     div(phi,U)         Gauss upwind;
16     div(phi,T)         Gauss upwind;
17 }
18
19 laplacianSchemes
20 {
21     default           none;
22     laplacian(nu,U)     Gauss linear uncorrected;
23     laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear uncorrected;
24     laplacian(DTFluid,T) Gauss linear uncorrected;
25     laplacian(KFluid,T) Gauss linear uncorrected;
26 }
27
28 interpolationSchemes
29 {
30     default           linear;
31     interpolate(HbyA)   linear;
32 }
33
34 snGradSchemes
35 {
36     default           corrected;
37 }
38
39 fluxRequired
40 {
41     default           no;
42     p                   ;
43     T                   ;
44 }

```

Für die Diskretisierung des diffusiven Terms `laplacian` werden die Gradienten ohne orthogonale Korrektur diskretisiert, was die Stabilität des Verfahrens erhöht, aber die Genauigkeit senkt. Das ist notwendig, wenn das Rechenetz für die Berechnung ungünstige Bereiche aufweist. Insbesondere bei der Berücksichtigung der Nanodrahtarrays (siehe nächster Abschnitt) muss diese Einstellung so vorgenommen werden.

### Wahl und Steuerung der Lösungsalgorithmen für die resultierenden Gleichungssysteme

Festkörper:

```

1 solvers
2 {
3     T
4     {
5         solver           PCG;
6         preconditioner   DIC;
7         tolerance        0;

```

```

8         relTol          1e-2;
9     }
10 }
11
12 SIMPLE
13 {
14     nNonOrthogonalCorrectors 4;
15 }
16
17 relaxationFactors
18 {
19
20     fields
21     {
22         p                0.3;
23     }
24     equations
25     {
26         T                0.99;
27     }
28 }

```

Gas (Fluid):

```

1 solvers
2 {
3     p
4     {
5         solver          GAMG;
6         tolerance       1e-06;
7         relTol          0.1;
8         smoother        GaussSeidel;
9         nPreSweeps      0;
10        nPostSweeps     2;
11        cacheAgglomeration on;
12        agglomerator     faceAreaPair;
13        nCellsInCoarsestLevel 100;
14        mergeLevels     1;
15    }
16
17    U
18    {
19        solver          GAMG;
20        tolerance       1e-06;
21        relTol          0.1;
22        smoother        GaussSeidel;
23        nPreSweeps      0;
24        nPostSweeps     2;
25        cacheAgglomeration on;
26        agglomerator     faceAreaPair;
27        nCellsInCoarsestLevel 100;

```

```

28     mergeLevels      1;
29 }
30
31     T
32 {
33     solver            BICCG;
34     preconditioner    DILU;
35     tolerance         0;
36     relTol            1e-2;
37 }
38 }
39
40 PISO
41 {
42     nCorrectors       2;
43     nNonOrthogonalCorrectors 0;
44     pRefCell          0;
45     pRefValue         0;
46 }
47
48 relaxationFactors
49 {
50     p                 0.3;
51     U                 0.7;
52     T                 0.99;
53     epsilon           0.7;
54     R                 0.7;
55     nuTilda           0.7;
56 }

```

Die Besonderheit ist die Wahl der Multigrid-Solver für die Geschwindigkeit und den Druck. Diese rentieren sich, wenn eine große Anzahl an Kontrollvolumina zur Berechnung vorliegt, und die Größenskalen stark variieren. Sie basieren darauf, dass hochfrequente Änderungen auf dem feinen Gitter berechnet werden. Die niederfrequenten Anteile, deren Berechnung langsam konvergiert, werden auf einem größeren Netz berechnet. *Frequent* bezieht sich auf räumliche Änderungen.

### Skript zur automatischen Variation der Einlassgeschwindigkeit

Um die Sensor Kennlinie in Abhängigkeit der Einlassgeschwindigkeit zu berechnen, muss diese variiert werden. Dies geschieht durch ein Shell-Skript, welches die Einlassgeschwindigkeit in `0/fluid/U` anpasst und dann die Berechnung startet. Anschließend wird das Ergebnis abgespeichert. Eine Verteilung des Rechengebietes auf mehrere Prozesskerne (in diesem Fall 6) wird ebenfalls durchgeführt, unter Zuhilfenahme des OpenFOAM Tools `decomposePar`.

```

1
2 # sweeping lambda values
3 #
4 # number of steps
5 t=1000;
6
7 for z in $(cat velocityValues)

```

```

8 do
9 echo "
    *****
"
10 echo "lambda_zur_Berechnung:_" $z
11
12 # changing inlet velocity
13 l=$(grep -n "changeVelocity" 0/fluid/U | cut -f1 -d:)
14 sed -i -e "$l" c"value_ uniform_(0_"$z"_0);_//changeVelocity" 0/fluid/U
15
16
17 # remove old decomposition
18 rm -r proc*
19
20 #decompose case
21 decomposePar -region solid
22 decomposePar -region fluid
23
24 # run solver
25 mpirun -np 2 chtMultiRegionIcoTempSlipSIMPLEFoam -parallel > logSolver
26
27 # reconstruct regions
28 reconstructPar -region solid
29 reconstructPar -region fluid
30
31 #rename logfile
32 mv logSolver $z
33
34 # mapping of values as new start condition for faster convergence
35 # mapFields -consistent -sourceTime $t -sourceRegion solid -targetRegion
    solid .
36 # mapFields -consistent -sourceTime $t -sourceRegion fluid -targetRegion
    fluid .
37
38
39 mv $t results/$z
40
41
42 echo "
    *****
"
43 done

```

In einer zusätzlichen Datei werden alle zu simulierenden Werte für die Einlassgeschwindigkeit abgespeichert, die dann aufgerufen wird. Es ist darauf zu achten, dass die Variable t der der in der Datei controlDict festgelegten Simulationsendzeit entspricht.

---

### A.8.3 Modellierung des Strömungssensors unter Berücksichtigung der Drahtarrays nach Abschnitt 6.4.3

---

Sowohl Randbedingungen als auch Solversteuerung und Diskretisierung sowie die zu lösneden Gleichungen entsprechen den in vorhergehenden Abschnitt A.8.2 dargestellten. Eine Besonderheit stellt die Erstellung des CAD Modells für die Berechnung dar. Die Erstellung<sup>Erstellung</sup> der Arrays wird mittels eines Skriptes durchgeführt.

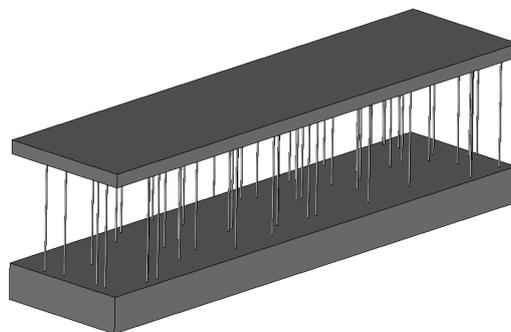
```
1 //random distribution
2
3
4 unix("rm_-f_script")
5
6 //Arrayeinstellungen
7 maxX = 30; //um
8 maxY = 120; //um
9 dens = 1.5e6; //Desity in 1/cm2
10
11 //Position des Arrays
12 n0Vert = 3;
13 n0Cyl = 0;
14 x0 = 0;
15 y0 = 0;
16 z = 7;
17
18
19 Vertex = "";
20 addVertex = "";
21 Cylinder = "";
22 addCylinder = "";
23 Fuse = "";
24 addFuse = "";
25 n = 0;
26 x = 0;
27 y = 0;
28
29
30
31 n = dens*(maxX*1e-4*maxY*1e-4);
32
33 for i = 1:n
34     x(i)=maxX*rand()+x0;
35     y(i)=maxY*rand()+y0;
36 end
37
38
39 plot(x,y)
40 a = gca();
41 a.children.children.line_mode = "off"
42 a.children.children.mark_mode = "on"
```

```

43 a.children.children.mark_style = 0;
44 a.children.children.mark_size = 4;
45
46 for i = 1:n
47     Vertex(i) = "Vertex_"+string(i+n0Vert)+"_=_geompy.MakeVertex("+string(x
        (i))+", "+string(y(i))+", "+string(z) + ")")
48     addVertex(i) = "geompy.addToStudy(Vertex_"+string(i+n0Vert)+"_,"+ char
        (39) +"Vertex_"+string(i+n0Vert)+char(39)+")";
49     Cylinder(i) = "Cylinder_"+string(i+n0Cyl)+"_=_geompy.MakeCylinder(
        Vertex_"+string(i+n0Vert)+"_,"_OZ,0.2,25)";
50     addCylinder(i) = "geompy.addToStudy(Cylinder_"+string(i+n0Cyl)+"_,"+
        char(39) +"Cylinder_"+string(i+n0Cyl)+char(39)+")";
51     if i==1 then
52         Fuse(i) = "Fuse_"+string(i)+"_=_geompy.MakeFuse(Box_2"+"_,"_Cylinder_" +
            string(i)+")";
53     else
54         Fuse(i) = "Fuse_"+string(i)+"_=_geompy.MakeFuse(Fuse_"+string(i-1)+"_,"_
            Cylinder_" +string(i)+")";
55     end
56     addFuse(i) = "geompy.addToStudy(Fuse_"+string(i)+"_,"+ char(39) +"Fuse_"
        "+string(i)+char(39)+")";
57
58 end
59
60
61 write("script",[Vertex,addVertex,Cylinder,addCylinder,Fuse,addFuse]);
62
63 unix("sed_i_" +char(39)+"s/_//g" + char(39) + "_script")

```

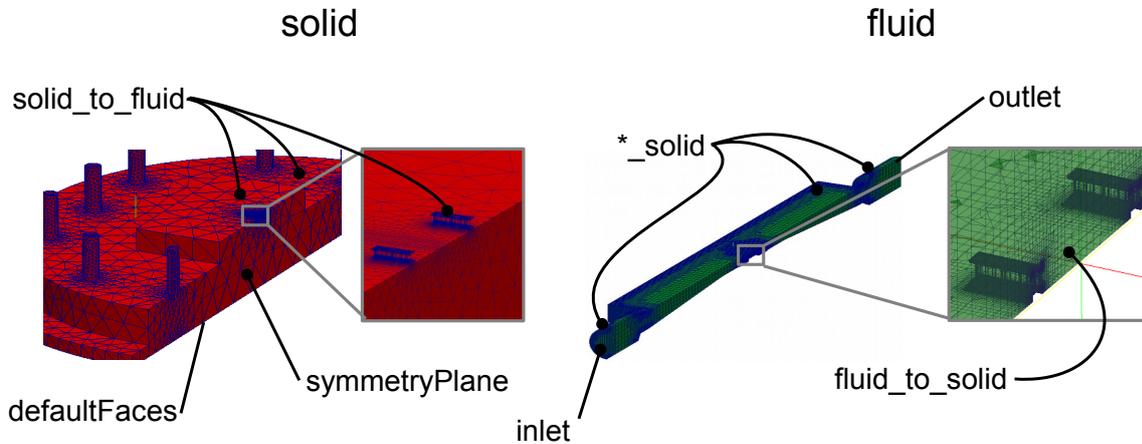
Der oben dargestellte Quellcode erzeugt mittels der Software *Scilab* ein Python-Skript. Dieses kann wiederum von der Software *Salome* weiter verarbeitet werden. *Salome* erzeugt mit dem Skript ein Drahtarray mit den gewünschten Parametern. Das Array kann in der CAD-Geometrie dann wie gewünscht platziert werden. Abbildung A.9 zeigt ein Array, welches mit o.g. Skript erstellt wurde. Die Platzierung im Sensorsystem ist in Abbildung 6.16 in Abschnitt 6.4.3 dargestellt.



**Abbildung A.9:** Mit Hilfe des Scilab- und Python-Skriptes in Salome erstelltes Drahtarray. Der Sockel, der sich prozesstechnisch aus der Kavität in der Adhäsionsschicht entsthtent

## Randbedingungen

Die Randbedingungen entsprechen weitgehend den im vorgehenden Abschnitt beschriebenen. Die Rechennetze mit den Bezeichnungen der Ränder sind in Abbildung A.10 dargestellt. Da das System symmetrisch ist, muss nur eine Hälfte modelliert werden.



**Abbildung A.10:** Rechengebiet und Ränder für die Simulation Sensors im Strömungskanal der ersten Generation unter Berücksichtigung der Drahtarrays. Die Grenzflächen \*\_solid beschreiben die durch die Kanalwände repräsentierten Ränder. Im Rechennetz treten Größenunterschiede von bis zu 350000:1 auf.

## Randbedingungen für den Festkörper

Die nötigen Felder entsprechen denen im Abschnitt A.8.2. Im Festkörper wird die Temperatur als Feld berechnet, die Wärmediffusion `DTSolid` sowie die Wärmeleitfähigkeit `KSolid` werden nicht verändert und sind konstant. Die Leitsungsdichte `powerDensity` ist überall 0, außer im Heizelement.

Name	Size	Type
<code>DTSolid</code>	6.7 MB	C source code
<code>KSolid</code>	2.5 MB	C source code
<code>powerDensity</code>	1.7 MB	C source code
<code>T</code>	1.5 kB	C source code

**Abbildung A.11:** Felder, für die Start- und Randbedingungen benötigt werden

*Randbedingung für die Temperatur T*

```

1 dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 300;
4
5 boundaryField
6 {
7     symmetryPlane
8     {
9         type      symmetryPlane;
10    }

```

```

11  outside
12  {
13      type          fixedValue;
14      value          uniform 300;
15  }
16  solid_to_fluid
17  {
18      type          temperatureSlipCoupledBaffleMixed;
19      neighbourFieldName T;
20      K             lookup;
21      KName         KSolid;
22      refValue      uniform 300;
23      refGradient   uniform 0;
24      valueFraction 0;
25      slip          0;
26      value         uniform 300;
27      gamma         1.4;
28      accommodationCoeff 0.9;
29      lambda        1e-30;
30  }
31 }

```

Die Randbedingung für die Grenzfläche zwischen Gas und Festkörper `solid_to_fluid` wird als Gradientenrandbedingung realisiert (`valueFraction = 0`).

### Randbedingung im Gas (Fluid)

Es werden sowohl Geschwindigkeit  $U$ , als auch Druck  $p$  und Temperatur  $T$  berechnet. Als Konstanten werden die Wärmediffusion `DFluid` und -leitfähigkeit `KFluid` benötigt.

 <code>DFluid</code>	1.5 kB	C source code
 <code>KFluid</code>	1.5 kB	C source code
 <code>p</code>	1.5 kB	C source code
 <code>T</code>	2.0 kB	C source code
 <code>U</code>	1.7 kB	C source code

**Abbildung A.12:** Felder, für die Start- und Randbedingungen benötigt werden

Randbedingung für die Geschwindigkeit  $U$

```

1  dimensions      [0 1 -1 0 0 0 0];
2
3  internalField   uniform (0 0 0);
4
5  boundaryField
6  {
7      inlet
8      {
9          type          fixedValue;
10     value      uniform (0 0 0); //changeVelocity
11     }

```

```

12
13 outlet
14 {
15     type          zeroGradient;
16     value         uniform (0 0 0);
17 }
18
19 symmetryPlane
20 {
21     type          symmetryPlane;
22 }
23 bottom_solid
24 {
25     type          fixedValue;
26     value         uniform (0 0 0);
27 }
28 inlet_solid
29 {
30     type          fixedValue;
31     value         uniform (0 0 0);
32 }
33
34 outlet_solid
35 {
36     type          fixedValue;
37     value         uniform (0 0 0);
38 }
39 top_solid
40 {
41     type          fixedValue;
42     value         uniform (0 0 0);
43 }
44 fluid_to_solid
45 {
46     type          maxwellSlipU;
47     Uwall         uniform (0 0 0);
48     accommodationCoeff 0.9;
49     value         uniform (0 0 0);
50 }
51
52 }

```

An der Grenzfläche wird für die Geschwindigkeit die Maxwell'sche Slip-Randbedingung (vgl. Abschnitt 4.3.5) appliziert. Die dafür notwendige mittlere freie Weglänge ist mit  $\bar{l} = 60 \text{ nm}$  fest im Code des Solvers hinterlegt.

Randbedingung für den Druck p

```

1
2 dimensions      [0 2 -2 0 0 0 0];
3
4 internalField   uniform 0;

```

```

5
6 boundaryField
7 {
8     inlet
9     {
10         type          zeroGradient;
11         value          uniform 0;
12     }
13
14     outlet
15     {
16         type          fixedValue;
17         value          uniform 0;
18     }
19
20     symmetryPlane
21     {
22         type          symmetryPlane;
23     }
24     bottom_solid
25     {
26         type          zeroGradient;
27     }
28     inlet_solid
29     {
30         type          zeroGradient;
31     }
32     outlet_solid
33     {
34         type          zeroGradient;
35     }
36
37     top_solid
38     {
39         type          zeroGradient;
40     }
41     fluid_to_solid
42     {
43         type          zeroGradient;
44     }
45
46
47 }

```

Auch hier wird wieder der dynamische Druck berechnet. Es gelten alle Annahmen des vorhergehenden Abschnitts.

Randbedingung für die Temperatur T

```

1 dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
2
3 internalField   uniform 300;

```

```

4
5 boundaryField
6 {
7     inlet
8     {
9         type          fixedValue;
10        value          uniform 300;
11    }
12
13    outlet
14    {
15        type          zeroGradient;
16        value          uniform 300;
17    }
18
19    symmetryPlane
20    {
21        type          symmetryPlane;
22    }
23
24    bottom_solid
25    {
26        type          fixedValue;
27        value          uniform 300;
28    }
29
30    inlet_solid
31    {
32        type          fixedValue;
33        value          uniform 300;
34    }
35
36    outlet_solid
37    {
38        type          fixedValue;
39        value          uniform 300;
40    }
41
42    top_solid
43    {
44        type          fixedValue;
45        value          uniform 300;
46    }
47
48    fluid_to_solid
49    {
50        type          temperatureSlipCoupledBaffleMixed;
51        neighbourFieldName T;
52        K              lookup;
53        KName          KFluid;
54        refValue       uniform 300;
55        refGradient    uniform 0;
56        valueFraction  0;
57        slip           1;

```

```

54     value          uniform 300;
55     gamma          1.4;
56     accommodationCoeff 0.9;
57     lambda         60e-9;;
58 }
59 }

```

An der Grenzfläche zwischen Festkörper und Gas `solid_to_fluid` wird die Slip-Randbedingung appliziert. In diesem Fall ist dies notwendig, da die Drähte in den Arrays Abmessungen aufweisen, die im Bereich der mittleren freien Weglänge liegen.

### Konfiguration der Diskretisierungsschemata

Gerade für so komplexe Geometrien, wie die Sensoren mit den Drähten, ist die Wahl der Diskretisierungsschemata essentiell dafür, ob eine stabile numerische Lösung erreicht werden kann.

Festkörper:

```

1 ddtSchemes
2 {
3     default      Euler;
4 }
5
6 gradSchemes
7 {
8     default      Gauss linear;
9     grad(T)      Gauss linear;
10 }
11
12 divSchemes
13 {
14     default      none;
15 }
16
17 laplacianSchemes
18 {
19     default      none;
20     laplacian(DTSolid,T) Gauss linear uncorrected;
21     laplacian(KSolid,T) Gauss linear uncorrected;
22 }
23
24 interpolationSchemes
25 {
26     default      linear;
27 }
28
29 snGradSchemes
30 {
31     default      uncorrected;
32 }
33
34 fluxRequired

```

```

35 {
36     default          no;
37     T                  ;
38 }

    Gas (Fluid):
1  ddtSchemes
2  {
3     default          Euler;
4  }
5
6  gradSchemes
7  {
8     default          Gauss linear;
9     grad(p)           cellLimited Gauss linear 1;
10 }
11
12 divSchemes
13 {
14     default          none;
15     div(phi,U)        Gauss upwind;
16     div(phi,T)        Gauss upwind;
17 }
18
19 laplacianSchemes
20 {
21     default          none;
22     laplacian(nu,U)    Gauss linear uncorrected;
23     laplacian((1|A(U)),p) Gauss linear uncorrected;
24     laplacian(DTFluid,T) Gauss linear uncorrected;
25     laplacian(KFluid,T) Gauss linear uncorrected;
26 }
27
28 interpolationSchemes
29 {
30     default          upwind phi;
31     interpolate(HbyA) linear;
32 }
33
34 snGradSchemes
35 {
36     default          uncorrected;
37 }
38
39 fluxRequired
40 {
41     default          no;
42     p                  ;
43     T                  ;
44 }

```

## Wahl und Steuerung der Lösungsalgorithmen für die resultierenden Gleichungssysteme

Festkörper:

```
1 solvers
2 {
3     T
4     {
5         solver          GAMG;
6         preconditioner  DILU;
7             mergeLevels          1;
8             smoother              GaussSeidel;
9             agglomerator    faceAreaPair;
10            nCellsInCoarsestLevel  5000;
11        tolerance          1e-08;
12        relTol              0;
13    }
14 }
15
16 SIMPLE
17 {
18     nNonOrthogonalCorrectors 4;
19 }
20
21 relaxationFactors
22 {
23
24     fields
25     {
26         p          0.3;
27     }
28     equations
29     {
30         T          0.99999;
31     }
32 }
```

Gas (Fluid):

```
1 solvers
2 {
3     p
4     {
5         solver          GAMG;
6         preconditioner  FDIC;
7             mergeLevels          1;
8             smoother              GaussSeidel;
9             agglomerator    faceAreaPair;
10            nCellsInCoarsestLevel  5000;
11        tolerance          1e-03;
12        relTol              0;
13    }
```

```

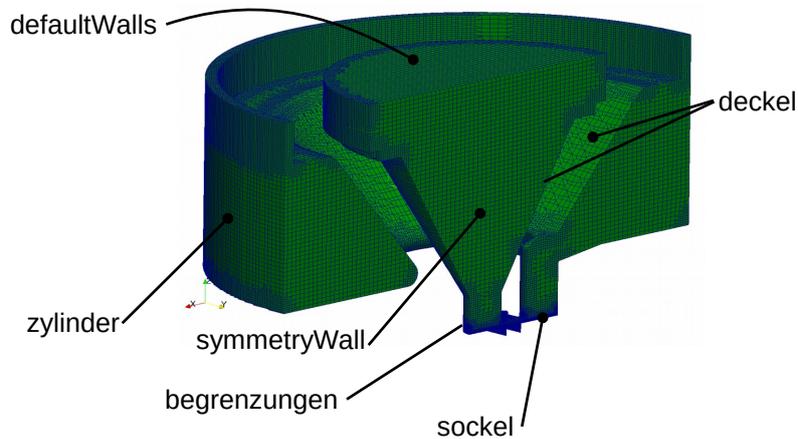
14
15 U
16 {
17     solver          GAMG;
18     preconditioner  DILU;
19         mergeLevels      1;
20         smoother         GaussSeidel;
21         agglomerator     faceAreaPair;
22         nCellsInCoarsestLevel  5000;
23     tolerance       1e-03;
24     relTol          0;
25 }
26 T
27 {
28     solver          GAMG;
29     preconditioner  DILU;
30         mergeLevels      1;
31         smoother         GaussSeidel;
32         agglomerator     faceAreaPair;
33         nCellsInCoarsestLevel  5000;
34     tolerance       1e-8;
35     relTol          0;
36 }
37
38 }
39
40 PISO
41 {
42     nCorrectors      2;
43     nNonOrthogonalCorrectors  0;
44     pRefCell         0;
45     pRefValue        0;
46 }
47
48 relaxationFactors
49 {
50     p                0.7;
51     U                0.3;
52     T                0.99999;
53     epsilon          0.7;
54     R                0.7;
55     nuTilda          0.7;
56 }

```

Mit diesen Einstellungen werden einige hundert Berechnungsschritte benötigt, damit das ganze Verfahren konvergiert.

## A.8.4 Modellierung des Photoakustischen Effektes nach Abschnitt 4.4

Für die Modellierung des photoakustischen Effektes wird das von Emerson Process vorgegebene System verwendet. Es wird eine 1-Regionen-Simulation durchgeführt, was die Verwendung konventioneller Randbedingungen ermöglicht.



**Abbildung A.13:** Rechengebiet und Ränder für die Simulation des photoakustischen Effektes

In Abbildung A.13 ist das Rechengebiet mitsamt den Rändern und ihren Bezeichnungen dargestellt. Abbildung A.14 zeigt die Konfigurationsdateien für die Start- und Randbedingungen.

Name	Size	Type
lightIntensity	934.1 kB	C source code
p	1.4 kB	C source code
T	1.7 kB	C source code
U	1.6 kB	C source code

**Abbildung A.14:** Konfigurations-Dateien für Felder, für die Start- bzw. Randbedingungen benötigt werden

Die Lichtintensität `lightIntensity`  $I_0$  bezeichnet die Intensität des einfallenden Lichtes in  $\frac{\text{W}}{\text{m}^2}$  was in SI Einheiten  $\frac{\text{kg}}{\text{s}^3}$  entspricht. Sie ist nur im Anregungsvolumen (vgl. Abbildung 4.21 in Abschnitt 4.4) von 0 verschieden. Im Verlaufe des Berechnungsvorgangs wird dieser Wert mit dem Lambert-Beer'schen Gesetz bewertet und daraus die absorbierte Energie berechnet. Das Feld `lightIntensity` wird während der Berechnung nicht verändert. Der Absorptionskoeffizient  $\alpha$  wird der Datei `constant/pAProperties` festgelegt.

### Rand und Startbedingungen

*Randbedingung für die Geschwindigkeit U*

- 1 dimensions [0 1 -1 0 0 0 0];
- 2
- 3 internalField uniform (0 0 0);
- 4
- 5 boundaryField

```

6 {
7   symmetryWall
8   {
9     type          symmetryPlane;
10  }
11  defaultWalls
12  {
13    type          fixedValue;
14    value         uniform (0 0 0);
15  }
16  sockel
17  {
18    type          fixedValue;
19    value         uniform (0 0 0);
20  }
21  deckel
22  {
23    type          fixedValue;
24    value         uniform (0 0 0);
25  }
26  begrenzung
27  {
28    type          fixedValue;
29    value         uniform (0 0 0);
30  }
31  zylinder
32  {
33    type          fixedValue;
34    value         uniform (0 0 0);
35  }
36 }

```

Da es sich um ein vollständig geschlossenes System handelt, wird an allen Rändern die Geschwindigkeit zu 0 gesetzt.

*Randbedingung für den Druck p*

```

1
2 dimensions      [1 -1 -2 0 0 0 0];
3
4 internalField   uniform 1e5;
5
6 boundaryField
7 {
8   symmetryWall
9   {
10    type          symmetryPlane;
11  }
12  defaultWalls
13  {
14    type          zeroGradient;
15  }

```

```

16  sockel
17  {
18      type          zeroGradient;
19  }
20  deckel
21  {
22      type          zeroGradient;
23  }
24  heizdraht
25  {
26      type          zeroGradient;
27  }
28  begrenzungen
29  {
30      type          zeroGradient;
31  }
32  zylinder
33  {
34      type          zeroGradient;
35  }
36  messchip
37  {
38      type          zeroGradient;
39  }
40 }

```

Im Gegensatz zum inkompressiblen Modell wird hier der absolute Druck berechnet. Da an allen Rändern eine Geschwindigkeit fest vorgegeben wurde, muss eine Gradientenrandbedingung für den Druck an allen Rändern appliziert werden.

*Randbedingung für die Temperatur T*

```

1  dimensions      [0 0 0 1 0 0 0];
2
3  internalField   uniform 300;
4
5  boundaryField
6  {
7      symmetryWall
8      {
9          type          symmetryPlane;
10     }
11     defaultWalls
12     {
13         type          fixedValue;
14         value         uniform 300;
15     }
16     sockel
17     {
18         type          fixedValue;
19         value         uniform 300;
20     }

```

```

21  deckel
22  {
23      type          fixedValue;
24      value          uniform 300;
25  }
26  begrenzung
27  {
28      type          fixedValue;
29      value          uniform 300;
30  }
31  zylinder
32  {
33      type          fixedValue;
34      value          uniform 300;
35  }
36  }

```

Für kompressible Modelle wird immer die innere Energie bzw. die Enthalpie benötigt, so dass zusätzlich die Temperatur als Feldgröße mit allen Randbedingungen benötigt wird. Alle Ränder werden auf Raumtemperatur gesetzt. Während des photoakustischen Vorgangs verändert sich dementsprechend die Temperatur des Gases.

#### Konfiguration der Diskretisierungsschemata

```

1  ddtSchemes
2  {
3      default      Euler;
4  }
5
6  gradSchemes
7  {
8      default      Gauss linear;
9      grad(p)      Gauss linear;
10 }
11
12 divSchemes
13 {
14     default      none;
15     div(phi,U)   Gauss upwind;
16     // div(phiD,p) Gauss upwind;
17     div(phiU,p)  Gauss upwind; //Wird in der totalen Ableitung benutzt
18     div(phi,h)   Gauss upwind;
19     //div(phi,k) Gauss upwind;
20     //div(phi,epsilon) Gauss upwind;
21     //div(phi,R) Gauss upwind;
22     //div(phi,omega) Gauss upwind;
23     //div((rho*R)) Gauss upwind;
24     //div(R)     Gauss upwind;
25     //div(U)     Gauss upwind;
26     div((muEff*dev2(T(grad(U)))))) Gauss linear;
27

```

```

28 }
29
30 laplacianSchemes
31 {
32     default          none;
33     laplacian(muEff,U) Gauss linear corrected;
34     laplacian(mut,U) Gauss linear corrected;
35     laplacian(DkEff,k) Gauss linear corrected;
36     laplacian(DepsilonEff,epsilon) Gauss linear corrected;
37     laplacian(DREff,R) Gauss linear corrected;
38     laplacian(DomegaEff,omega) Gauss linear corrected;
39     laplacian((rho*(1|A(U))),p) Gauss linear corrected;
40     laplacian(alphaEff,h) Gauss linear corrected;
41 }
42
43 interpolationSchemes
44 {
45     default          linear;
46 }
47
48 snGradSchemes
49 {
50     default          corrected;
51 }
52
53 fluxRequired
54 {
55     default          no;
56     p                  ;
57 }

```

### Wahl und Steuerung der Lösungsalgorithmen für die resultierenden Gleichungssysteme

```

1 solvers
2 {
3     rho
4     {
5         solver          PCG;
6         preconditioner  DIC;
7         tolerance       1e-09;
8         relTol          0;
9     }
10
11     h
12     {
13         solver          PBiCG;
14         preconditioner  DILU;
15         //smoother      GaussSeidel;
16         tolerance       1e-15;
17         relTol          0;
18     }

```

```

19
20 p
21 {
22     solver          PCG;
23     preconditioner  DIC;
24     //smoother      DICGaussSeidel;
25     tolerance       1e-09;
26     relTol          0;
27 }
28
29 /* p
30 {
31     solver          GAMG;
32     preconditioner  DIC;
33     smoother        GaussSeidel;
34     agglomerator    faceAreaPair;
35     nCellsInCoarsestLevel 2000;
36     mergeLevels     1;
37     tolerance       1e-09;
38     relTol          0;
39 }*/
40
41
42 U
43 {
44     solver          PBiCG;
45     preconditioner  DILU;
46     //smoother      DILU;
47     tolerance       1e-9;
48     relTol          0;
49 }
50
51 k
52 {
53     solver          PBiCG;
54     preconditioner  DILU;
55     tolerance       1e-05;
56     relTol          0;
57 }
58
59 B
60 {
61     solver          PBiCG;
62     preconditioner  DILU;
63     tolerance       1e-05;
64     relTol          0;
65 }
66
67 nuTilda
68 {

```

```

69     solver          PBiCG;
70     preconditioner  DILU;
71     tolerance       1e-05;
72     relTol          0;
73 }
74 }
75
76 PISO
77 {
78     nCorrectors      2;
79     nNonOrthogonalCorrectors 0;
80 }

```

Da die Komplexität des Systems nicht so hoch ist, werden weder für die Diskretisierung noch für die Gleichungslösung besondere Einstellungen benötigt.

### Zeitschrittsteuerung

```

1  application      rhoPisoSourceFoam;
2
3  startFrom        latestTime;
4
5  startTime        0;
6
7  stopAt           endTime;
8
9  endTime          10e-2;
10
11 deltaT           5e-07;
12
13 writeControl      runtime;
14
15 writeInterval     5e-4;
16
17 purgeWrite        0;
18
19 writeFormat       ascii;
20
21 writePrecision    12;
22
23 writeCompression  uncompressed;
24
25 timeFormat        general;
26
27 timePrecision     6;
28
29 runtimeModifiable yes;
30
31 adjustTimeStep    no;

```

Es wird eine feste Zeitschrittweite  $\Delta t$  von  $5 \cdot 10^{-7}$  s eingestellt.

---

## A.9 Aufteilung auf mehrere Prozessoren

---

Sämtliche Simulationen wurden auf sechs Prozessorkernen durchgeführt. Dazu wurde das Tool `decomposePar` verwendet, welches über die Datei `system/decomposeParDict` bzw. `system/region/decomposeParDict` gesteuert wird. Die Aufteilung wird vor der Ausführung des Solvers durchgeführt. Anschließend wird der Solver mit

```
mpirun -np 6 nameDesSolvers -parallel  
aufgerufen.
```

Nachfolgend das Beispiel einer `decomposeParDict`-Datei.

```
1 numberOfSubdomains 6;  
2  
3 method          hierarchical;  
4  
5 simpleCoeffs  
6 {  
7     n            ( 3 2 1 );  
8     delta        0.001;  
9 }  
10  
11 hierarchicalCoeffs  
12 {  
13     n            ( 3 2 1 );  
14     delta        0.001;  
15     order        xyz;  
16 }
```

---

## A.10 Erstellung der Rechennetze

---

Alle komplexen Rechennetze für die Fluide wurden mittels des Tools `snappyHexMesh` erstellt, welches über die Datei `system/snappyHexMeshDict` erzeugt wird. Hierbei handelt es sich um einen Octree-Algorithmus, dessen Funktion in [56] dargestellt ist. Nachfolgend die `snappyHexMeshDict`-Datei für die photoakustische Zelle aus Abschnitt 4.4. Alle CAD-Daten müssen dabei als `stl`-Dateien vorliegen.

```
1  
2  
3 // Which of the steps to run  
4 castellatedMesh true;  
5 snap          true;  
6 addLayers     false;  
7  
8  
9 // Geometry. Definition of all surfaces. All surfaces are of class  
10 // searchableSurface.  
11 // Surfaces are used  
12 // - to specify refinement for any mesh cell intersecting it  
13 // - to specify refinement for any mesh cell inside/outside/near  
14 // - to 'snap' the mesh boundary to the surface
```

```

15 geometry
16 {
17     SockelMitMesstraeger.stl
18     {
19         name sockel;
20         type triSurfaceMesh;
21     }
22     Deckel.stl
23     {
24         name deckel;
25         type triSurfaceMesh;
26     }
27     /*Heizdraht.stl
28     {
29         name heizdraht;
30         type triSurfaceMesh;
31     }*/
32     Begrenzungen.stl
33     {
34         name begrenzungen;
35         type triSurfaceMesh;
36     }
37     Zylinder.stl
38     {
39         name zylinder;
40         type triSurfaceMesh;
41     }
42     /*Messchip.stl
43     {
44         name messchip;
45         type triSurfaceMesh;
46     }*/
47
48
49
50 };
51
52
53
54 // Settings for the castellatedMesh generation.
55 castellatedMeshControls
56 {
57
58     // Refinement parameters
59     // ~~~~~
60
61     // If local number of cells is >= maxLocalCells on any processor
62     // switches from from refinement followed by balancing
63     // (current method) to (weighted) balancing before refinement.
64     maxLocalCells 20000000;

```

```

65
66 // Overall cell limit (approximately). Refinement will stop immediately
67 // upon reaching this number so a refinement level might not complete.
68 // Note that this is the number of cells before removing the part which
69 // is not 'visible' from the keepPoint. The final number of cells might
70 // actually be a lot less.
71 maxGlobalCells 20000000;
72
73 // The surface refinement loop might spend lots of iterations refining
74 // just a
75 // few cells. This setting will cause refinement to stop if <=
76 // minimumRefine
77 // are selected for refinement. Note: it will at least do one iteration
78 // (unless the number of cells to refine is 0)
79 minRefinementCells 100;
80
81 // Number of buffer layers between different levels.
82 // 1 means normal 2:1 refinement restriction, larger means slower
83 // refinement.
84 nCellsBetweenLevels 5;
85
86 // Explicit feature edge refinement
87 // ~~~~~
88
89 // Specifies a level for any cell intersected by its edges.
90 // This is a featureEdgeMesh, read from constant/triSurface for now.
91 features (
92     /*{
93     file "Heizdraht.eMesh";
94     level 6;
95     }*/
96     {
97     file "Deckel.eMesh";
98     level 0;
99     }
100
101 );
102
103
104
105 // Surface based refinement
106 // ~~~~~
107
108 // Specifies two levels for every surface. The first is the minimum
109 // level,
110 // every cell intersecting a surface gets refined up to the minimum
111 // level.
112 // The second level is the m

```

```

111 // outerChipWall.stlmaximum level. Cells that 'see' multiple
112 // intersections where the intersections make an
113 // angle > resolveFeatureAngle get refined up to the maximum level.
114
115 refinementSurfaces
116 {
117     sockel
118     {
119         // Surface-wise min and max refinement level
120         level (4 4);
121     }
122     deckel
123     {
124         // Surface-wise min and max refinement level
125         level (0 1);
126     }
127     begrenzung
128     {
129         // Surface-wise min and max refinement level
130         level (0 3);
131     }
132     zylinder
133     {
134         // Surface-wise min and max refinement level
135         level (0 1);
136     }
137
138
139
140
141 }
142
143 // Resolve sharp angles on fridges
144 resolveFeatureAngle 30;
145
146
147 // Region-wise refinement
148 // ~~~~~
149
150 // Specifies refinement level for cells in relation to a surface. One
151 // of
152 // - distance. 'levels' specifies per distance to the surface the
153 // wanted refinement level. The distances need to be specified in
154 // descending order.
155 // - inside. 'levels' is only one entry and only the level is used. All
156 // cells inside the surface get refined up to the level. The surface
157 // needs to be closed for this to be possible.
158 // - outside. Same but cells outside.
159

```

```

160 refinementRegions
161 {
162     /*refinementBox1
163     {
164         mode inside;
165         levels ((1E15 3));
166     } */
167 }
168
169
170
171 // Mesh selection
172 // ~~~~~
173
174 // After refinement patches get added for all refinementSurfaces and
175 // all cells intersecting the surfaces get put into these patches. The
176 // section reachable from the locationInMesh is kept.
177 // NOTE: This point should never be on a face, always inside a cell,
178 // even
179 // after refinement.
180 locationInMesh (0 -0.01 0.1);
181
182 // Whether any faceZones (as specified in the refinementSurfaces)
183 // are only on the boundary of corresponding cellZones or also allow
184 // free-standing zone faces. Not used if there are no faceZones.
185 allowFreeStandingZoneFaces true;
186 }
187
188
189
190 // Settings for the snapping.
191 snapControls
192 {
193     /*- Number of patch smoothing iterations before finding correspondence
194     // to surface
195     nSmoothPatch 5;
196
197     /*- Relative distance for points to be attracted by surface feature
198     // point
199     // or edge. True distance is this factor times local
200     // maximum edge length.
201     tolerance 4;
202
203     /*- Number of mesh displacement relaxation iterations.
204     nSolveIter 30;
205
206     /*- Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
207     // before upon reaching a correct mesh.
208     nRelaxIter 5;

```

```

208
209     nFeatureSnapIter 15;
210 }
211
212
213
214 // Settings for the layer addition.
215 addLayersControls
216 {
217     // Are the thickness parameters below relative to the undistorted
218     // size of the refined cell outside layer (true) or absolute sizes (
219     // false).
220     relativeSizes true;
221
222     // Per final patch (so not geometry!) the layer information
223     layers
224     {
225         "wing.*"
226         {
227             nSurfaceLayers 3;
228         }
229     }
230
231     // Expansion factor for layer mesh
232     expansionRatio 1.3;
233
234     //— Wanted thickness of final added cell layer. If multiple layers
235     // is the
236     // thickness of the layer furthest away from the wall.
237     // Relative to undistorted size of cell outside layer.
238     // is the thickness of the layer furthest away from the wall.
239     // See relativeSizes parameter.
240     finalLayerThickness 0.7;
241
242     //— Minimum thickness of cell layer. If for any reason layer
243     // cannot be above minThickness do not add layer.
244     // Relative to undistorted size of cell outside layer.
245     // See relativeSizes parameter.
246     minThickness 0.25;
247
248     //— If points get not extruded do nGrow layers of connected faces that
249     // are
250     // also not grown. This helps convergence of the layer addition
251     // process
252     // close to features.
253     nGrow 0;
254
255     // Advanced settings

```

```

255 //– When not to extrude surface. 0 is flat surface , 90 is when two
      faces
256 // make straight angle.
257 featureAngle 60;
258
259 //– Maximum number of snapping relaxation iterations. Should stop
260 // before upon reaching a correct mesh.
261 nRelaxIter 5;
262
263 // Number of smoothing iterations of surface normals
264 nSmoothSurfaceNormals 1;
265
266 // Number of smoothing iterations of interior mesh movement direction
267 nSmoothNormals 3;
268
269 // Smooth layer thickness over surface patches
270 nSmoothThickness 10;
271
272 // Stop layer growth on highly warped cells
273 maxFaceThicknessRatio 0.5;
274
275 // Reduce layer growth where ratio thickness to medial
276 // distance is large
277 maxThicknessToMedialRatio 0.3;
278
279 // Angle used to pick up medial axis points
280 // Note: changed(corrected) w.r.t 16x! 90 degrees corresponds to 130 in
      16x.
281 minMedianAxisAngle 90;
282
283 // Create buffer region for new layer terminations
284 nBufferCellsNoExtrude 0;
285
286
287 // Overall max number of layer addition iterations. The mesher will
      exit
288 // if it reaches this number of iterations; possibly with an illegal
289 // mesh.
290 nLayerIter 50;
291 }
292
293
294
295 // Generic mesh quality settings. At any undoable phase these determine
296 // where to undo.
297 meshQualityControls
298 {
299 //– Maximum non-orthogonality allowed. Set to 180 to disable.
300 maxNonOrtho 65;
301

```

```

302 //– Max skewness allowed. Set to <0 to disable.
303 maxBoundarySkewness 20;
304 maxInternalSkewness 4;
305
306 //– Max concaveness allowed. Is angle (in degrees) below which
      concavity
307 // is allowed. 0 is straight face, <0 would be convex face.
308 // Set to 180 to disable.
309 maxConcave 80;
310
311 //– Minimum pyramid volume. Is absolute volume of cell pyramid.
312 // Set to a sensible fraction of the smallest cell volume expected.
313 // Set to very negative number (e.g. -1E30) to disable.
314 minVol 1e-30;
315
316 //– Minimum tet volume. Is absolute volume of the tet formed by the
317 // face-centre decomposition triangle and the cell centre.
318 // Set to a sensible fraction of the smallest cell volume expected.
319 // Set to very negative number (e.g. -1E30) to disable.
320 minTetVol 1e-20;
321
322 //– Minimum face area. Set to <0 to disable.
323 minArea -1;
324
325 //– Minimum face twist. Set to <-1 to disable. dot product of face
      normal
326 //– and face centre triangles normal
327 minTwist 0.05;
328
329 //– minimum normalised cell determinant
330 //– 1 = hex, <= 0 = folded or flattened illegal cell
331 minDeterminant 0.001;
332
333 //– minFaceWeight (0 -> 0.5)
334 minFaceWeight 0.05;
335
336 //– minVolRatio (0 -> 1)
337 minVolRatio 0.01;
338
339 //must be >0 for Fluent compatibility
340 minTriangleTwist -1;
341
342 //– Minimum quality of the tet formed by the face-centre
343 // and variable base point minimum decomposition triangles and
344 // the cell centre. Set to very negative number (e.g. -1E30) to
345 // disable.
346 // <0 = inside out tet,
347 // 0 = flat tet
348 // 1 = regular tet
349 minTetQuality 1e-30;

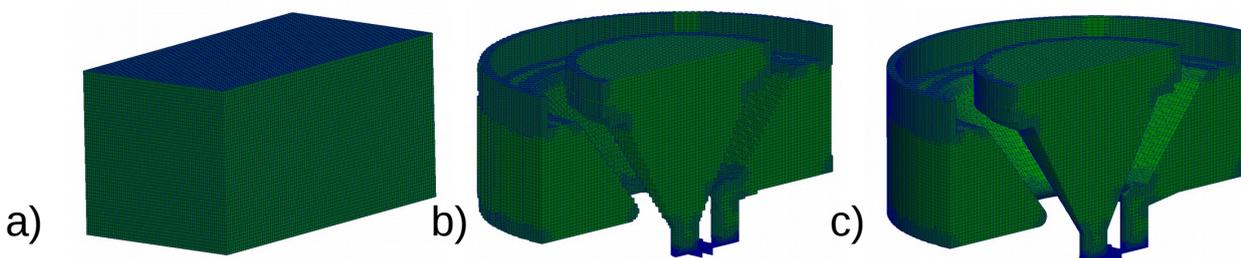
```

```

350
351 // Advanced
352
353 //– Number of error distribution iterations
354 nSmoothScale 4;
355 //– amount to scale back displacement at error points
356 errorReduction 0.75;
357 }
358
359
360 // Advanced
361
362 // Flags for optional output
363 // 0 : only write final meshes
364 // 1 : write intermediate meshes
365 // 2 : write volScalarField with cellLevel for postprocessing
366 // 4 : write current intersections as .obj files
367 debug 0;
368
369
370 // Merge tolerance. Is fraction of overall bounding box of initial mesh.
371 // Note: the write tolerance needs to be higher than this.
372 mergeTolerance 1E-10;
373
374
375 //
376 *****
377 //

```

In diesem Beispiel wird auf die Erstellung von Boundary-Layers verzichtet. Es wird zunächst die Verfeinerung des Hintergrundgitters durchgeführt, anschließend findet eine Geometrieanpassung statt. Abbildung A.15 zeigt den Ablauf der Vernetzung. Auch die Netzerstellung kann bei Bedarf auf mehrere Kerne verteilt werden, so dass auch große Rechennetze zügig erstellt werden können.



**Abbildung A.15:** Ablauf der Vernetzung mit snappyHexMesh, a) Hintergrundnetz, b) verfeinertes und zurechtgeschnittenes Netz (castellated), c) geometrieangepasstes (snapped) Netz

---

---

## **B Datenblätter**

---

### **B.1 Platilon**

---

Die ersten Versuche zur Lamination von Templatfolien auf feste Substrate wurde mit einer Schmelzklebefolie durchgeführt. Es wurde Platilon H5, eine Co-Polyesterfolie verwendet, da diese die einzige aus der Platilon-Familie ist, welche die nachfolgenden Prozesse übersteht. Nachfolgend ein Auszug aus dem Datenblatt, aus dem die chemischen und physikalischen Eigenschaften des Werkstoffs hervorgehen.



# Technische Daten PLATILON® H Schmelzklebefolien

## Typische Eigenschaften

Polymerbasis			Co-Polyamid	Polyurethan (Ester)	Co-Polyester
Typenbezeichnung			H 2	HU 2	H 5
Eigenschaften	Normen/Methoden	Einheit			
Dichte	errechnet	g/cm <sup>3</sup>	1,10 <sup>1)</sup>	1,16 <sup>1)</sup>	1,27 <sup>1)</sup>
Erweichungsbereich	TMA Onset	°C	≥ 100	≥ 75	≥ 120
	Koflerbank Skalpelle	°C	110 - 120	90 - 105	105 - 120
Wärmebeständigkeit	empirisch	°C	≤ 110	≤ 60 <sup>2)</sup>	≤ 90
Erscheinungsbild	visuell	-	klar	transluzent	transluzent
Weichmacherbeständigkeit	empirisch	-	sehr gut	gut	gut
Weichmacherbarriere	empirisch	-	ja	nein	nein
Waschbeständigkeit	empirisch	°C	≤ 60	≤ 40	≤ 80
Chemische Reinigungsverträglichkeit	empirisch	-	gut	begrenzt	gut
HF-Schweißbarkeit	empirisch	-	sehr gut	sehr gut	gut
Empfohlene Klebspalttemperatur	empirisch	°C	130	110	140

Alle Daten sind Richtwerte ohne Angaben von Toleranzen und eignen sich nicht als Grundlage für die Erstellung von Spezifikationen! Bitte kontaktieren Sie uns, bevor Sie eine Spezifikation für dieses Produkt abfassen.

- <sup>1)</sup> errechnet aus den Angaben der Rohstoffhersteller unter Berücksichtigung der Folienrezeptur  
<sup>2)</sup> bei kurzzeitiger geringer Belastung auf ebenen Flächen: 100 - 120°C

## Folienausführungen

Typ	Max. Breite (mm)	Flächengewicht (g/m <sup>2</sup> )	Farbe	Trägerfolie (PE)
H 2	1700 <sup>3)</sup>	30 - 110	natur	ja <sup>4)</sup>
HU 2	1700 <sup>3)</sup>	30 - 110	natur	ja
H 5	1700 <sup>3)</sup>	30 - 110	natur	ja <sup>4)</sup>

- <sup>3)</sup> Einschränkungen je nach Flächengewicht.  
<sup>4)</sup> PE-Träger kann auf Wunsch gegen Aufpreis ausgewickelt werden.

Es gelten im Übrigen unsere „Allgemeinen Verkaufsbedingungen“.

Seite 1 von 2 - Platilon H\_de\_Version 2012/12



## B.2 Als Adhäsionsschicht verwendete Photoresiste

Nachdem sich Platilon H5 als nicht geeignet herauskristallisiert hatte, wurden Resiste als Adhäsionsschicht verwendet. Für dünne Substrate mit hoher Drahtdichte wird ein dünner thermoplastischer Resist verwendet, für die Lösungsmitteldampflamination wird ein dickerer Positiv-Resist verwendet.

## B.2.1 ma-P 1215 zur thermischen Lamination

Der Photoresist ma-P 1215 gehört zur ma-P 1200 Familie, dessen Datenblatt nachfolgend dargestellt ist.

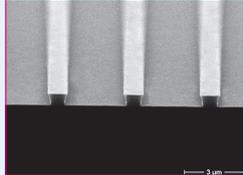
micro resist technology GmbH  
 Köpenicker Straße 325  
 12555 Berlin-Köpenick  
 Telefon 030 641670100  
 Fax 030 641670200  
 E-Mail mrt@microresist.de  
 www.microresist.de



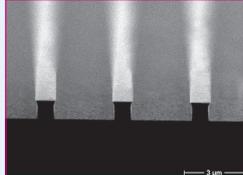
## ma-P 1200 — Positiv-Photoresistserie

### Resiste für die UV-Lithographie

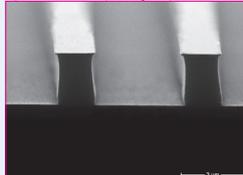
Resiststrukturierung mit Mask Aligner, Breitbandbelichtung



0,5 µm ma-P 1205, 1 µm Stege, 3 µm Gräben



1 µm ma-P 1210, 1 µm Stege, 3 µm Gräben



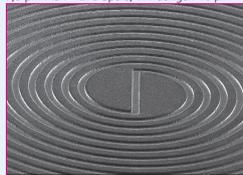
2,5 µm ma-P 1225, 2 µm Stege, 4 µm Gräben



4 µm ma-P 1240, 3 µm Stege, 5 µm Gräben



7,5 µm ma-P 1275 Spule, Windungen 10 µm



5 µm Ni-Spule, Windungen 10 µm

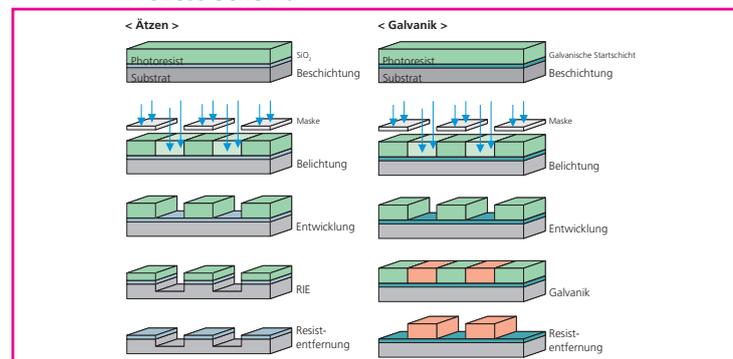
### Wichtigste Merkmale

- Hervorragende Strukturstabilität in Nassätzprozessen und in sauren und alkalischen Galvanikbädern
- Hohe Trockenätzresistenz z.B. in  $\text{CHF}_3$ ,  $\text{CF}_4$  und  $\text{SF}_6$
- Wässrig-alkalische Entwicklung
- Leicht entfernbar
- Resiste erhältlich in verschiedenen Viskositäten

### Anwendungen

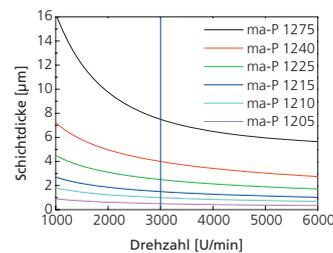
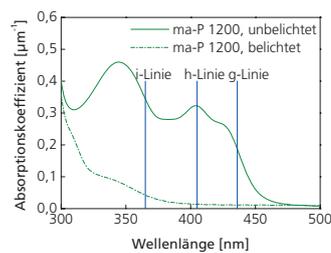
- Ätzmaske für z.B.
  - Si,  $\text{SiO}_2$
  - Metalle
  - Halbleiter
- Maske für Ionenimplantation
- Form für galvanische Abscheidung

### Prozess Schema



### Technische Daten

Resist		ma-P 1205	ma-P 1210	ma-P 1215	ma-P 1225	ma-P 1240	ma-P 1275
Schichtdicke	µm	0,5	1,0	1,5	2,5	4,0	7,5
Schleuderbeschichtung	U min <sup>-1</sup> s	3000 30					
Spektrale Empfindlichkeit		Breitband, g-, h-, i-Linie					
Dosis bei 365nm (Breitbandbelichtung)	mJ cm <sup>-2</sup>	35	35	45	55	110	210

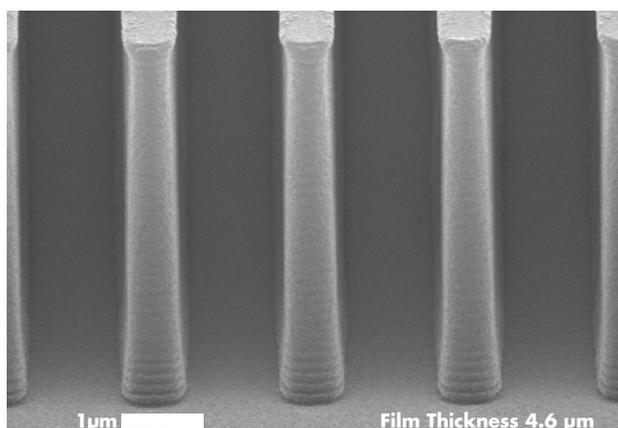


---

## B.2.2 AZ9260 zur Lösungsmitteldampflamination

---

Zur Lösungsmitteldampf-unterstützten Lamination empfiehlt es sich, die Dicke der Schicht etwas höher zu wählen, damit der Prozess des Erweichens im Lösungsmitteldampf robuster wird. Daher wird der Resist AZ9260 aus der AZ9200 Familie dafür verwendet.



## AZ<sup>®</sup> 9200 Photoresist

### High-Resolution Thick Resist

AZ<sup>®</sup> 9200 thick film photoresist is designed for the more demanding higher-resolution thick resist requirements. It provides high resolution with superior aspect ratios, as well as wide focus and exposure latitude and good sidewall profiles. AZ<sup>®</sup> 9200 photoresist is available in two viscosity grades for film thicknesses of 4 to 24 μm. Critical dimension resolutions range from < 1 μm lines and spaces at a film thickness of 4.6 μm, to 3.5 μm lines and spaces at a film thickness of 24 μm on silicon using today's standard broadband exposure tools. Aspect ratios of 5 – 7 can be achieved.

Under the guidance of leading thin film recording head manufacturers, AZ<sup>®</sup> 9200 photoresist is optimized for both coil plating and top pole recording head applications.

AZ<sup>®</sup> 9200 photoresist can be used as a higher resolution replacement for AZ<sup>®</sup> P4000 photoresist. It can be processed on the same exposure tools using similar processing conditions; it is developed from the same chemistry and has similar curing, electrical and thermal properties.

Sensitivity to both h- and i-line makes AZ<sup>®</sup> 9200 photoresist capable for both broadband and i-line steppers.

Recommended developers are inorganic based upon potassium hydroxide. The preferred developer is AZ<sup>®</sup> 400K Developer 1:4, a buffered developer designed to maximize bath life and process stability. For integrated circuit applications, TMAH developers such as AZ<sup>®</sup> 300 MIF developer can be used.



**Typical Process for 4.6 µm Film Thickness [AZ® 9245 Photoresist (220 CPS)]**

Coat	Dispense: static or dynamic @ 300 rpm Spin: 3 800 rpm, 60 sec
Softbake	110 °C, 120 sec hotplate
Edge Bead Removal	Rinse: 500 rpm, 10 sec Dry: 1 000 rpm, 10 sec
Exposure (10% bias)	900 mJ/cm <sup>2</sup> , broadband stepper
Post Exposure Bake	not recommended in most applications
Development	AZ® 400K Developer 1:4, 120 sec spray Dispense temp. 27 °C Rinse: 300 rpm, 20 sec. Dry: 4 000 rpm, 15 sec.

**Typical Process for 10 µm Film Thickness [AZ® 9260 Photoresist (520 CPS)]**

Coat	Dispense: static or dynamic @ 300 rpm Spin: 2 400 rpm, 60 sec
Softbake	110 °C, 165 sec hotplate
Edge Bead Removal	Rinse: 500 rpm, 10 sec Dry: 1 000 rpm, 10 sec
Exposure (10% bias)	1 500 mJ/cm <sup>2</sup> , broadband stepper
Post Exposure Bake	not recommended in most applications
Development	AZ® 400K Developer 1:4, 180 sec spray Dispense temp. 27°C Rinse: 300 rpm, 20 sec. Dry: 4 000 rpm, 15 sec.

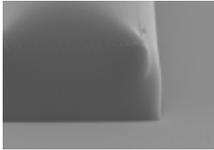
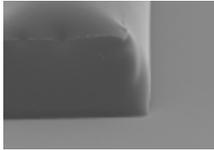
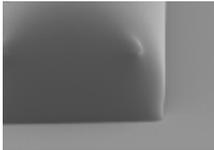
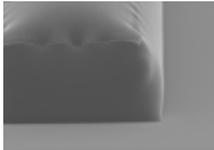
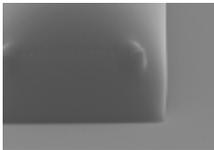
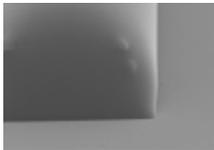
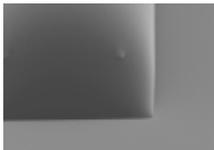
**Typical Process for 24 µm Film Thickness [AZ® 9260 Photoresist (520 CPS)]**

First Coat	Target: 10 µm film thickness Dispense: static or dynamic @ 300 rpm Spin: 2 400 rpm, 60 sec
Edge Bead Removal	Rinse: 500 rpm, 10 sec Dry: 1 000 rpm, 10 sec
First Softbake	110 °C, 80 sec hotplate
Second Coat	Target: 24 µm total film thickness Dispense: static or dynamic @ 300 rpm Spin: 2 100 rpm, 60 sec
Edge Bead Removal	Rinse: 500 rpm, 10 sec Dry: 1 000 rpm, 10 sec
Second Softbake	110 °C, 160 sec hotplate
Exposure Dose (10% bias)	2 100 mJ/cm <sup>2</sup> , broadband stepper
Post Exposure Bake	not recommended in most applications
Development	AZ® 400K Developer 1:4, 260 sec spray Dispense temp. 27°C Rinse: 300 rpm, 20 sec. Dry: 4 000 rpm, 15 sec.

Note: Recommendations on single-coat 24 µm processes are also available



AZ® 9200 Photoresist Functional Performance

Thermal Comparison		
Results after 2 Minutes at Temperature Vacuum Chuck Hotplate		
	AZ® 9260 Photoresist	AZ® P4620 Photoresist
No Bake		
110°C		
115°C		
120°C		
125°C		

Film Thickness = 24 µm on Si  
Softbake Hotplate 110 °C, 120 sec

Film Thickness	2 000 rpm	2 500 rpm	3 000 rpm	3 500 rpm
AZ® 9245 Photoresist 220 cP	6 600 Å	5 800 Å	5 200 Å	4 800 Å
AZ® 9260 Photoresist 520 cP	11 400 Å	9 600 Å	8 800 Å	7 900 Å
Electrical Properties	200 °C	225 °C	250 °C	
Dielectric Constant	4.03	4.37	4.90	
Breakdown Voltage (v/µm)	694	642	600	
Modeling Parameters				
Cauchy Coefficients (unexposed)	$N_1 = 1.61406$	$N_2 = -0.00087 \mu\text{m}^2$	$N_3 = -0.00196 \mu\text{m}^4$	
Cauchy Coefficients (exposed)	$N_1 = 1.60843$	$N_2 = 0.00994 \mu\text{m}^2$	$N_3 = -0.00165 \mu\text{m}^4$	

---

### B.2.3 Haftvermittler TI Prime

---

Zu Verbesserung der Haftung zwischen Substrat und Adhäsionsschicht wird der Haftvermittler TI Prime verwendet. Der Haftvermittler basiert auf Titan, was bei der Durchführung von CMOS Prozessen berücksichtigt werden muss.

---

MicroChemicals® TI PRIME technical data sheet – revised 12/2002

## TI PRIME adhesion promoter

Technical Data Sheet  
revised 12/2002

---



MicroChemicals GmbH  
Schillerstrasse 18  
D-89077 Ulm  
Fon +49 (0) 731 36080409  
Mobil +49 (0) 177 3332453  
Fax +49 (0) 731 1517024  
Email [info@MicroChemicals.com](mailto:info@MicroChemicals.com)  
Internet [www.microchemicals.com](http://www.microchemicals.com)

### General Information

The TI PRIME adhesion promoter improves resist adhesion on substrates like Si or glass



MicroChemicals GmbH Ulm – [www.microchemicals.com](http://www.microchemicals.com)

---



## Processing the TI PRIME

(in chronological order)

- **Substrate preparation:** After (optional, but recommended) cleaning the substrate with acetone and subsequently isopropyle, put the substrate on the hotplate at a minimum temperature of 120 °C for 10 minutes to remove adsorbed water from the substrates surface. Alternatively, you can use a furnace at same temperature for 30 min.
- **Spin coat the TI PRIME** at approx. 2000-4000 U/min for approx. 20 seconds. After spin-coating, no residual drops or film of TI PRIME should be visible.
- **Bake the substrate** at 120°C for 2 minutes on the hotplate (when using a furnace, 130°C for 10 min is recommended)
- **Proceed with spin-coating the resist immediately and proceed as usual.**

**Note:** TI Prime contains Titanium. For CMOS processes use (eg. RCA-) cleaning procedure of the substrates after lithography before you apply high-temperatures.



---

## Wissenschaftlicher Werdegang

---



### Sebastian Quednau

geboren am 12. September 1983 in Königs Wusterhausen

### Studium

---

10/2004-04/2010 Technische Universität Darmstadt,  
Elektrotechnik und Informationstechnik,  
Vertiefung: Mikro- und Feinwerktechnik,  
Abschluss: Diplom-Ingenieur

### Berufliche Tätigkeiten

---

seit 05/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter,  
Technische Universität Darmstadt,  
Institut für Elektromechanische Konstruktionen EMK,  
Fachgebiet Mikrotechnik und Elektromechanische Systeme

10/2005 - 09/2007 Werkstudent Siemens  
Schaltanlagenwerk Frankfurt / Main

### Praktika

---

05/2004 - 07/2004 Grundpraktikum,  
Siemens VDO, Wetzlar

07/2008 - 10/2008 Fachpraktikum,  
WIKA, Klingenberg

### Sonstiges

---

10/2007 - 09/2009 Stipendium,  
WIKA, Klingenberg

