

Sven Ebschke



Entwicklung und Charakterisierung
von nanostrukturierten thermischen
MEMS-Flusssensoren

Sven Ebschke

Entwicklung und Charakterisierung von
nanostrukturierten thermischen
MEMS-Flusssensoren

Titelbild: Rasterelektronenmikroskop-Aufnahme eines nanoskaligen thermischen
Flusssensor mit freischwebenden Siliziumstegen

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund
genehmigte

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften

Von
Sven Ebschke
Dortmund, 2021

Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Horst L. Fiedler
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Oehm
Tag der mündlichen Prüfung: 26. Februar 2021

**Der Ziellose erleidet sein Schicksal
- der Zielbewusste gestaltet es.**

- Immanuel Kant

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Intelligente Mikrosysteme (IMS) an der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik der Technischen Universität Dortmund. Hierbei wurden nanostrukturierte thermische Flusssensoren entwickelt und untersucht. Das erfolgreiche Abschließen verdanke ich der Unterstützung von mehreren Personen.

Für die langjährige Betreuung, auch über die eigentliche Dienstzeit hinaus, bedanke ich mich recht herzlich bei Herrn Professor Dr.-Ing. Horst Fiedler. Für die Übernahme des Korreferats bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jürgen Oehm.

Als Ideengeber, Mentor, Laborleiter und nicht zuletzt toller Mensch, gilt Herrn Dr.-Ing. Klaus Kallis ein ganz besonderer Dank. Die Zeit mit ihm werde ich immer in positiver Erinnerung behalten.

Für die umfangreiche Arbeit mit den Korrekturen und Anregungen zu meiner schriftlichen Ausarbeitung bedanke ich mich außerdem recht herzlich bei Evelyn Drabiniok, Tobias Wolf, Jakob Zimmermann und Katharina Ebschke.

Ermöglicht wurde diese Arbeit auch durch die großartige Zusammenarbeit mit meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des Lehrstuhls. Vielen Dank dafür an Evelyn Drabiniok, Friederike Giebel, Karola Kolander, Ulrike Lippe, Stephan Brabender, Philipp Czyba, Dominik Merten, Alexander Gumprich, Marko Kremer, Andre Löchte, Ashutosh Loyalka, Remigius Poloczek, Pongsak Sarapukdee, Marcel Müller, Pavithra Muralidharan, Thomas Seiler, Cordula Zimmer, Achim Wiggershaus, Boguslaw Wdowiak und Jakob Zimmermann.

Weiterhin bedanke ich mich für die gute Zusammenarbeit mit den Studentinnen und Studenten, die für diese Dissertation viele wichtige Erkenntnisse im Rahmen ihrer Abschlussarbeiten generiert haben. Ein herzlicher Dank geht dazu an Julian Singer, Philipp Lilienthal, Jonas Gerwin, Michael Wieker, Björn Polenz, Christian Leismann, Michael Steglich, Gina Frackmann, Anand Patel, Andreas Kiesel, Hendrik Schuh und Maximilian Mühlbauer.

Der größte Dank gilt jedoch meiner Familie, ohne die ich nicht der wäre, der ich heute bin. Dieser gilt besonders meinen Eltern Gabriele und Hartwig Ebschke, meiner Schwester Jennifer Ebschke, meinen Großeltern Paul und Ruth Kulla sowie meinem Opa Paul Ebschke. Auch meinen Schwiegereltern Andrea und Georg Wolf, meinem Onkel Dietmar Kulla und meiner Tante Martina Lange gilt ein Dank für ihre langjährige Unterstützung.

Von ganzem Herzen danke ich meinen Kindern Paulina und Hannah und meiner Frau Katharina. Eure Geduld und euer moralischer Rückhalt hat mir diese Arbeit erst ermöglicht. Dafür bin ich euch ewig dankbar.

Hagen, März 2021

Sven Ebschke

Inhalt

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	III
Liste der verwendeten Formelzeichen	IV
Abbildungen	VI
Tabellen	IX
1 Einleitung	1
2 Grundlagen zur Bestimmung von Durchfluss und Absolutdruck	6
2.1 Eigenschaften und Strömungsverhalten von Fluiden	8
2.2 Messprinzipien der Fluss- und Drucksensorik	12
2.2.1 Volumetrische Zähler	13
2.2.2 Momentane Durchflussmesser	13
2.3 Vorherige Entwicklungen und Stand der aktuellen Technik und Forschung	20
2.4 Prozesse zur Herstellung mikromechanischer Sensoren und Systeme	24
2.4.1 Grundbegriffe und Parameter von mikromechanischen Technologieprozessen	26
2.4.2 Grundlegende Verfahren zur Prozessierung von mikromechanischen Fluss- und Drucksensoren	27
2.4.3 Verwendete Mess- und Analyseverfahren zur Prozessentwicklung	33
3 Konzept eines integrierten Sensorsystems	38
3.1 Grundlegende Funktionsweise eines thermischen Flusssensors	40
3.2 Konzept eines Absolutdrucksensors mit Nanolochprozessierung	45
3.3 Anpassung von technologischen Prozessschritten	47
3.4 Fazit zum Konzept eines neuartigen Sensorsystems	48
4 Modellbildung und Simulation mittels FEM	49
4.1 Funktionale Simulationen mittels Finite-Volumen-Methode (FVM)	52
4.1.1 FVM-Modell zur Simulation des Temperaturprofils	53
4.1.2 Gewählte Parameter für die ANSYS-Simulation	54
4.1.3 Auswertung der ANSYS-Simulationen	55
4.2 Technologiesimulationen zur Prozessentwicklung	59
4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse	60
5 Entwicklung der Technologieprozesse	62
5.1 Überblick von technologischen Prozessen zur Herstellung eines fluidischen Sensorsystems	62
5.2 Detailbeschreibung der technologischen Prozesse	69
5.2.1 Silicon-on-Insulator als Ausgangssubstrat	70
5.2.2 Thermische Oxidationsprozesse zur Anpassung der obersten Siliziumschicht	71

5.2.3	Verbesserung der Bor- und Phosphor-Implantation zur Erzeugung von pn-Nanodioden	73
5.2.4	Implementierung von Elektronenstrahlolithographie-Prozessen	75
5.2.5	Untersuchungen von ESL-Fotolacken	78
5.2.6	Einstellung und Verbesserung von chemischen Strukturierungsprozessen .	81
5.2.7	Erstellung der Leiterbahnen und Kontaktflächen	82
5.2.8	Untersuchungen an einem HF-Ätzprozess zur Erzeugung von freistehenden Sensorstrukturen	84
5.2.9	Versuche zur Anpassung der Sensorstrukturen	85
5.3	Aufbau und Verbindungstechnik für ein Sensorsystem	88
5.4	Verkapselung eines fluidischen Sensorsystems	89
5.5	Zusammenfassung Prozessierung	91
6	Charakterisierung von thermischen Flusssensor-Prototypen	92
6.1	Einflussgrößen bei empirischen Messungen von Flusssensoren	93
6.2	Messumgebung zur Charakterisierung von Prototypen	94
6.3	Verhalten einzelner Sensor-Prototypen	96
6.3.1	Ermittlung des k-Faktors von thermischen Sensordioden	96
6.3.2	Konzept einer Ausleseschaltung	99
6.4	Charakteristik von Prototypen	99
6.5	Zusammenfassung der Messergebnisse	101
6.6	Vergleich zum aktuellen Stand der Technik	102
7	Zusammenfassung und Ausblick	104
	Betreute Abschlussarbeiten, Projektgruppen und Oberseminare	107
	Eigene Veröffentlichungen	108
	Literaturverzeichnis	119

Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
ALD	Atomic Layer Deposition
APCVD	Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition
AVT	Aufbau- und Verbindungstechnik
BOX	buried oxide
CAD	Computer Aided Design
CEL	CFX Expression Language
CFD	Computational Fluid Dynamics
COG	Chrome on Glas
CVD	Chemical Vapour Deposition
DIN	Deutsche Industrie Norm
DRIE	Deep Reactive Ion Etching
DIL	Dual in-line Package
ESL	Elektronenstrahlolithographie
EUV	Extreme-Ultra-Violett
FEM	Finite-Elemente-Methode
HMDS	Hexamethyldisilazan
HF	Flusssäure
LPCVD	Low Pressure Chemical Vapour Deposition
MEMS	Micro Electro Mechanical System
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MST	Mikrostrukturtechnik
MFC	Mass-Flow-Controller (Massefluss-Regler)
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition
PMMA	Polymethylmethacrylat
PE	Plasma Etching
PVD	Physical Vapour Deposition
REM	Raster Elektronen Mikroskop
RIE	Reactive Ion Etching
Si	Silizium
SiO₂	Siliziumdioxid
SOI	Silicon-on-Insulator
TCAD	Technology Computer Aided Design
TToF	Thermal Time of Flight
UV	Ultra Violet
WF	Write Field
WHO	World Health Organisation

Liste der verwendeten Symbole und Einheiten

Symbol	Einheit	Bedeutung
A	mm^2	Fläche
A_{Fil}	μm^2	Filamentquerschnitt
A_Q	m^2	Querschnittsfläche eines Körpers
$\Delta A'$	m^2	kleinstmögliches Flächenelement
c	J/K	Wärmekapazität
c_S	m/s	Schallgeschwindigkeit
d	nm	Strukturauflösung
d_{AB}	m	Distanz A zu B
d_{Ae}	nm	Schichtabtrag beim Ätzen von Strukturen
DOF	μm	Tiefenschärfe (<i>engl. Depth of Focus</i>)
f	-	Isotropie
F_n	N	Normalkraft
I_{Fil}	A	Filamentstrom
L	m	charakteristischer Längenparameter
l_{Fil}	μm	Filamentlänge
m	kg	Masse eines Körpers
\dot{m}	kg/s	Massenstrom pro Zeiteinheit
M	-	Machzahl zur Beschreibung der Kompressibilität
n	-	Brechungsindex
n	$1/\text{m}^3$	Ladungsträgerdichte von Löchern
p	Pa	Druck
p	$1/\text{m}^3$	Ladungsträgerdichte von Elektronen
P_{El}	W	elektrische Leistung
P_v	W	momentane Verlustleistung

$P_{V_{Fil}}$	W	Verlustleistung eines Filaments
P_{Th}	W	thermische Leistung
\dot{Q}	m/s	Strömungsgeschwindigkeit
R_{Fil}	Ω	Filamentwiderstand
Re	-	Reynoldszahl
Re_{krit}	-	kritische Reynoldszahl
S	-	Selektivität von Ätzraten zweier Materialien
t	s	Zeiteinheit
t_{Ae}	min	zeitliche Dauer eines Ätzprozesses
T_C	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur in Grad Celsius
T_K	K	Temperatur in Kelvin
U_{Fil}	V	Filamentspannung
U_F	V	Flussspannung einer Diode
V	m^3	Volumen eines Körpers
$\Delta V'$	m^3	kleinstmögliches Volumenelement
\dot{V}	m^3/s	Volumenstrom pro Zeiteinheit
ν	m^2/s	kinematische Viskosität
\bar{v}	m/s	mittlere Geschwindigkeit eines Fluides
v_{Fluid}	m/s	Fluidgeschwindigkeit
$v_{Partikel}$	m/s	relative Geschwindigkeit eines Partikels
v_{Schall}	m/s	Schallgeschwindigkeit
α	$^{\circ}$	halber Öffnungswinkel
ϵ	$\mu\text{m}/\text{min}$	Ätzrate eines Materials
η	m/s	dynamische Viskosität
λ	nm	Wellenlänge
μ_n	cm^2/Vs	Elektronenbeweglichkeit
μ_p	cm^2/Vs	Löcherbeweglichkeit
ρ	$\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$	spezifischer elektrischer Widerstand
ρ	kg/m^3	Dichte
ρ_{Fl}	kg/m^3	Fluiddichte
σ	$1/\Omega \cdot \text{m}$	spezifische elektrische Leitfähigkeit

Abbildungen

1.1	Übersicht Marktentwicklung Micro Electro Mechanical Systems	3
2.1	Parameter zur Beschreibung der Strömung in einem Rohr	7
2.2	Darstellung laminares Strömungsverhalten	9
2.3	Darstellung turbulentes Strömungsverhalten	9
2.4	Übersicht verschiedener Durchflussmessverfahren	12
2.5	Skizze Flügelradzähler	13
2.6	Durchflusssensor mit Dopplermessverfahren	15
2.7	Messprinzip der thermischen Anemometrie	17
2.8	Mikroflusssensor basierend auf thermischer Anemometrie	18
2.9	Messprinzip Kalorimetrie	19
2.10	Kalorimetrischer Flusssensor mit Thermopiles	19
2.11	Skizze eines Thermal Time of Flight-Sensorprinzips	20
2.12	Historischer Zeitstrahl Entwicklung von Druck- und Flusssensoren	21
2.13	Silizium Anemometer aus dem Jahr 1974	21
2.14	Auslesebrückenschaltung für ein Anemometer	21
2.15	Multi-SOI Sensorsystem	23
2.16	Profil Bulk-Mikromechanik	25
2.17	Anodisch gebondeter Glaswafer mit einer geschlossenen Kavität	25
2.18	Oberflächenmikromechanik	26
2.19	Darstellung eines Reactive Ion Etching-Prozesses	29
2.20	Aufbau einer Elektronenstrahlithographie-Anlage	32
2.21	Prinzip eines Ellipsometer-Messsystems	34
3.1	Einflussfaktoren neuartiges Sensorsystem aus Fluss- und Absolutdrucksensor	38
3.2	Konzept für ein neuartiges Sensorsystem	39
3.3	Konzept für einen thermischen Durchflusssensor	40
3.4	Skizze zur Berechnung einer thermischen Signalausbreitung	42
3.5	Sensormembran in Silicon-on-Insulator mit Nanolöcher-Array	46
3.6	Darstellung neuartiger Absolutdrucksensor	46
3.7	Pseudo-MOSFET als Ausleseeinheit eines Absolutdrucksensors	47
4.1	Zusammenhang von analytischem Modell, Simulation und Experiment	50
4.2	Computer Aided Design-Modell eines Flusssensors für eine Simulation	52
4.3	Reduziertes CAD-Modell eines Fluidkanals von einem Flusssensor	54
4.4	FEM-basierende Lösung einer Temperaturverteilung im Wasser	55
4.5	FEM-basierende Lösung eines Geschwindigkeitsprofils im Fluidkanal	56
4.6	Temperaturabhängigkeit Heizfilament zu Flussgeschwindigkeit.	56
4.7	Temperaturabhängigkeit Diode 1 zu Flussgeschwindigkeit.	57
4.8	Temperaturabhängigkeit Diode 2 zu Flussgeschwindigkeit.	57

4.9	Simulationsergebnis für $2\mu m$ Abstand der Dioden vom Filament.	58
4.10	Simulationsergebnis für $5\mu m$ Abstand der Dioden vom Filament.	58
4.11	Diodenmodell für eine Diffusionssimulation in TCAD	60
5.1	Initiale Darstellung eines Silicon-on-Insulator-Substrates	63
5.2	SOI-Substrat nach thermischer Oxidation	63
5.3	Wafer mit thermischer Oxid- und fotosensitiver Lackschicht	64
5.4	Fotolackmaske mit Öffnungen für Justiermarker	64
5.5	Übertragung von Justiermarkern in ein Streuoxid	65
5.6	Abbildung von Justiermarkern in einer obersten Silizium-Schicht	65
5.7	Fotolackmaske für Implantation eines n-dotierten Bereichs	66
5.8	N-dotierter Bereich nach der Implantation	66
5.9	Fotolackmaske zur Strukturierung von nanoskaligen Sensorelementen	66
5.10	Strukturierte Sensorelemente nach zweistufigen RIE-Prozess	66
5.11	Darstellung einer Aluminium-Schicht für eine Kontaktierungsebene	67
5.12	Strukturierte Aluminium-Schicht für eine Ankontaktierung des Flusssensors . . .	67
5.13	SOI-Wafer	70
5.14	Prinzip von Channeling bei der Ionenimplantation	73
5.15	Aufnahme einer Sensorstruktur	76
5.16	Übersicht Maskenlayout für dem Flusssensor mit Aluminium-Kontaktpads . . .	76
5.17	Vergrößerte Darstellung des Sensorbereichs eines Flusssensors	76
5.18	Angepasstes Maskenlayout mit $2\mu m$ zwischen Dioden und Heizfilament	77
5.19	Angepasstes Maskenlayout mit $5\mu m$ zwischen Dioden und Heizfilament	77
5.20	Angepasstes Maskenlayout mit $8\mu m$ zwischen Dioden und Heizfilament	77
5.21	Maskenlayout eines Absolutdrucksensors mit Nanoloch-Array	77
5.22	Maskenlayout eines Fluss- und Absolutdrucksensorsystem	78
5.23	Entwickelte Positiv-Maske für die Justiermarker	79
5.24	Abbildung einer Maske für die n-Gebiet Dotierung des Flusssensors	79
5.25	Positive Fotolackmaske für Fluidkanal	79
5.26	REM-Abbildung eines Aluminium-Kontaktpads	83
5.27	Aufnahme Kontaktpads einer Kontaktierungsseite	83
5.28	Übergangsbende Aluminiumleiterbahn und Sensorstruktur	84
5.29	Eine freistehende Sensorstruktur eines Flusssensors	84
5.30	Aufnahme der Ablösung einer Siliziumdioxidschicht	85
5.31	Maskenlayout zur Erzeugung von Nanolöchern und -stegen	86
5.32	REM-Abbildung eines sub-60nm-Steges für einen themischen Flusssensor . . .	86
5.33	Spinkurve AR-N 7520.07v	87
5.34	Abbildung einer Sensorstruktur von einem Flusssensor	87
5.35	Aufnahme eines gebondeten Chips vor Verkapselung der Bonddrähte.	88
5.36	Aufnahme gebondeter Chip in einem Gehäuse	89
5.37	Verkapselter Prototyp mit Fluidkanal	89
5.38	Aufnahme Versuchsaufbau zur Untersuchung der Viskosität.	90
5.39	Versuchsergebnisse Kleber	90
6.1	Messrohr	94
6.2	Schematische Darstellung der Messumgebung.	95
6.3	Schematische Darstellung der Messumgebung mit angeschlossenen Spritzen. .	95

6.4	Kalibrationsmessaufbau K-Faktor	96
6.5	Messaufbau K-Faktor	97
6.6	Charakterisierung Temperaturabhängigkeit	98
6.7	Ausleseschaltung für einen thermischen Flusssensor als SPICE-Modell	99
6.8	Ausleseschaltung Flusssensor	100
6.9	Darstellung einer Messreihe eines Flusssensorprototypen	101

Tabellen

2.1 Vergleich turbulente und laminare Strömung	10
2.2 Analogie fluidische und elektrotechnische Parameter	11
2.3 Vergleich thermischer Messverfahren zur Durchflussmessung	16
2.4 Vergleich Bulk- und Oberflächenmikromechanik	24
2.5 Vergleich von Depositionsverfahren der Mikrostrukturtechnik	28
2.6 Übersicht nass- und trockenchemische Strukturierungsprozesse der MST	30
2.7 Analyseverfahren in der Halbleitertechnologie	33
4.1 Parameter Silizium-Substrat	54
4.2 TCAD Resultate	60
5.1 Eigenschaften von hier eingesetztem SOI-Substrat	71
5.2 Übersicht der angepassten Dotierstoffparameter	73
5.3 Parameter für ESL-Prozesse für einen thermischen Flusssensor	75
5.4 Übersicht Parameter für eine rotierende Lackdispensierungsanlage	80
5.5 Parameterübersicht für einen „pre-bake“-Prozess	81
5.6 Standardparameter für ein RIE-Prozess	82
5.7 Prozessablauf eines Magnetronspütvorgangs	82
5.8 Eigenschaften Klebstoffe	90
6.1 Dimensionen eines Flusssensor-Prototypen	100

1 Einleitung

Die Entdeckung von halbleitenden Eigenschaften verschiedener chemischer Elemente, wie insbesondere von Silizium im Jahr 1822 [1, S. 455 ff.], führte zu einem immensen technischen Fortschritt. Dieser trägt zur Erforschung und Entwicklung diverser gegenwärtiger und zukünftiger Technologien bei, wie auch in der Mikrofluidik. Eine Eigenschaft von halbleitenden Materialien und daraus resultierenden Systemen ist dabei eine gegenüber nicht-leitenden Elementen, also Isolatoren, verringerte Bandlücke im Kristall. Durch Einführung von Fremdatomen, einer sogenannten Dotierung, lassen sich die elektrischen Eigenschaften dieser Halbleiterwerkstoffe verändern [2, S. 89]. Dabei werden primär Elemente aus benachbarten Hauptgruppen des Periodensystems genutzt. Es ergibt sich hierbei eine Skalierbarkeit verschiedener Parameter, wie die geometrischen Abmessungen und eine dadurch resultierende Steigerung der Leistungsfähigkeit und Integrationsdichte von aktiven und passiven elektrischen Bauelementen [3]. Eine Schlüsseltechnologie, welche aus dieser Entwicklung hervorging, ist die Mikrostrukturtechnik (MST). Dabei werden unter anderem halbleitende Eigenschaften verschiedener Elemente und deren technologische Herstellungsprozesse angewendet, um ein breites Spektrum an Aktoren und Sensoren mit Abmessungen im Mikro- und Nanometerbereich herzustellen. Die fortschreitende Miniaturisierung mit einer Möglichkeit der monolithischen Integration mehrerer Sensorelemente auf einem Chip bietet hiermit immer neue Anwendungsgebiete und Einsatzmöglichkeiten in verschiedensten Technologiebereichen. [4, 5, 6] Einer dieser Technologiebereiche ist die Mikrosensorik. Ihren Einsatz hat diese bei der Erfassung von verschiedenen physikalischen Phänomenen und ist somit ein fester Bestandteil der gegenwärtigen Industrie und Forschung. Neuartige Technologien in diesem Sektor helfen bei der Lösung unterschiedlichster Anforderungen, für die makroskopische Verfahren entweder zu kostenintensiv oder technisch limitiert sind. Ein Grund ist die kostengünstige Produzierbarkeit von Mikrosensoren und die Möglichkeit, mehrere sensitive Elemente auf kleinstem Bauraum zu integrieren. Dieses erfolgt bei gleichzeitiger Nutzung von Skalierungseffekten [7].

Hierbei gibt es die Mikrofluidik mit der Erfassung von Durchflussmengen und Fluidgeschwindigkeiten. Beispielhaft ist der Einsatz von solchen mikroskaligen Flusssensoren in der Bio- und Medizintechnik möglich. Ihre Relevanz zeigt auch eine Mitteilung der World Health

Organisation (WHO), nach der kardiovaskuläre Störungen und Herz-Kreislauf-Erkrankungen die weltweite häufigste Todesursache für Menschen sind. In einem Trendbericht von 2014 werden, bezogen auf eine im Rahmen des Berichtes durchgeführte Studie für 2012, 17,5 Millionen zugeordneter Todesfälle angenommen. Dies ergibt einen Anteil von 31% aller repräsentativen Fälle weltweit. [8] Dabei sind typische Indikatoren eine Stenose¹, welche zu einem Gefäßverschluss und somit zu einem Herzinfarkt oder Schlaganfall führen kann [10] oder Bluthochdruck mit den möglichen Folgeindikationen einer Gefäßverkalkung, also Arteriosklerose. [11]

Neuartige Entwicklungen im Bereich der Medizintechnik helfen, diese Art von Erkrankungen frühzeitig zu diagnostizieren und präventive Maßnahmen für die betroffenen Personen einzuleiten. Die damit zusammenhängende Grundlagenforschung von relevanten Diagnosemitteln ist somit ein wichtiger Bestandteil, die Lebensqualität und Lebensdauer von Risikopatienten zu verbessern. Unabdingbar ist dabei ein umfassendes und permanentes Monitoring der Vitalfunktionen, ohne eine Einschränkung der Bewegungsfreiheit zu verursachen². Hierbei ist insbesondere der herznahe Blutdruck relevant, was durch eine Erfassung von dem selbigen und der Herzfrequenz als Momentanwert gewährleistet werden kann [13, 14, S. 97-102]. Dabei sind die genannten mikro- und nanoskaligen Sensoren und Sensorsysteme³ eine Möglichkeit, die Diagnostik zu gewährleisten. Bei einem invasiven Messverfahren wird eine Arterie mittels einer Kanüle punktiert. Insbesondere die Detektion von Blutdruck und Blutfluß ist wichtig, um eine Belastbarkeitsanalyse des Herz-Kreislauf-Systems und somit Hinweise auf eine Arteriosklerose in großen arteriellen Gefäßen zu erhalten. [13] Dies ist ein möglicher Einsatzbereich für mikrofluidische Sensoren und Sensorsysteme, welche neuartige Durchfluss- und Drucksensoren vereinen.

Weitere Anwendungsbeispiele in der Biomedizin sind Beatmungsgeräte, Inhalatoren und die Sensorik bei der Infusionstherapie, welche eine Erfassung der Flussgeschwindigkeit benötigen [15, S. 676-698]. Auch hier ist die geringe Bauform von Mikrosensoren ein entscheidender Faktor, um eine möglichst portable und effiziente Lösung für den Patienten zu generieren. Weiterhin benötigen sie eine geringere Leistungsaufnahme, haben eine hohe Langzeitstabilität und eine hohe Sensitivität bei niedrigen Flussraten [16].

Ein aktuelles Beispiel ist auch eine Sensorentwicklung zur Überwachung des Liquorabflusses in den Bauchraum, welche aufgrund der geringen Flussraten und der Biokompatibilität mittels eines Thermal Time of Flight (TToF)-Flusssensors realisiert wird [17].

Bisweilen sind mikroskalige Flusssensoren ebenfalls in anderen Bereichen, wie in der Prozessautomatisierung und weiteren technischen Anwendungen relevant. So dienen sie zum Beispiel

¹Eine Stenose ist eine Verengung einer Arterie. [9]

²Ca. 5 % der dt. Bevölkerung sind betroffen. [12]

³engl. *Micro Electro Mechanical System (MEMS)*

bei der Erfassung von Gasflüssen unter anderem zu einer Luftüberwachung für Reinräume oder in Verbrennungsmotoren als Gasflussmessung [18].

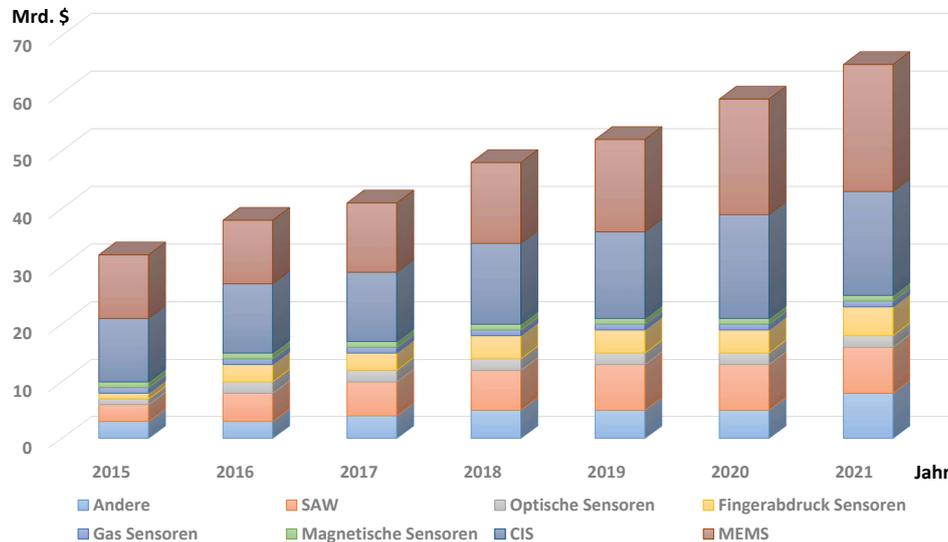


Abb. 1.1: Übersicht der historischen, aktuellen und voraussichtlichen Marktentwicklung von MEMS und anderen Sensoren.[19]

Eine Übersicht für den Bedarf von Mikrosensoren ist durch eine Studie von Yole Développement für die Jahre 2015 bis 2021 in dem Diagramm 1.1 dargestellt. Hierbei wird deutlich, dass insgesamt ein Markt von über 60 Milliarden U. S. Dollar erwartet wird, bei der ein Einsatz von mikrofluidischen Sensoren und Sensorsystemen zusammen mit Drucksensoren einen erheblichen Anteil abbilden und jede Entwicklung in diesem Bereich eminent wichtig für die aktuelle Industrie und Gesellschaft ist.

Somit gibt es im Bereich der MEMS neben medizinischen und technologischen Aspekten, auch eine ökonomische Relevanz durch einen prosperierenden Markt mit einem Schwerpunkt auf Sensorsystemen, so wie es in dieser Arbeit vorgestellt wird.

Um einen technischen Fortschritt in den oben genannten Bereichen zu ermöglichen, gilt es, durch den Einsatz von Halbleitertechnologien, neue Ansätze für mikrofluidische Sensorsysteme zu untersuchen. Diese zeigen Lösungsansätze auf, um aktuelle und zukünftige medizintechnische Aufgabenstellungen zu bewältigen und neue Therapiemöglichkeiten einzusetzen.

Aufbau und Ziele der Arbeit

Ein Ziel dieser Arbeit ist es deshalb, Halbleitertechnologieprozesse zu entwickeln, um einen mikro- bis nanoskaligen, thermischen Flusssensor zu realisieren. Als Substrattechnologie soll hierzu Silicon-on-Insulator (SOI) genutzt werden, da diese prozesstechnische und thermische Vorteile bringt. Ein weiteres Ziel dieser Arbeit ist eine Untersuchung des Einflusses von Skalierungseffekten auf thermische Flusssensorprinzipien. Dies erfolgt mittels des zu entwickelten Sensors. Hierzu basiert dieser auf einem TToF-Messprinzip und beinhaltet entsprechende Funktionseinheiten für eine thermische Durchflusserfassung. Weiterhin soll dieser hinsichtlich eines anemometrischen Messprinzips untersucht werden, welches ebenfalls mit der gleichen Struktur realisiert wird. Maßstab der Untersuchung ist die Erfassung von einem Durchfluss bei kleinsten Volumina in unterschiedlichen Aggregatzuständen. Dabei soll das gemessene Medium maximal gering manipuliert werden. Schlussendlich erfolgt darauf basierend eine Bewertung beider Verfahren.

Wie bereits erwähnt sind die dafür erforderlichen Halbleitertechnologieprozesse zu entwickeln. Hierzu wird insbesondere ein Elektronenstrahlithographie-Prozess angepasst, um eine Skalierung der Sensorelemente bis in den *sub* – 100 nm Bereich zu realisieren. Ein Konzept der zusätzlichen Integration eines Absolutdrucksensors, welcher die Möglichkeit einer CMOS-kompatiblen Integration der Ausleseschaltung auf der Membranoberfläche bietet, wird ebenfalls vorgestellt. Dieses basiert dabei auf bereits vorliegenden Arbeiten und Veröffentlichungen [20, 21, 22, 23, 24, 25].

Zur allgemeinen Beschreibung werden zunächst in Kapitel 2 - Grundlagen zur Bestimmung von Durchfluss und Absolutdruck - die selbigen definiert. Weiterhin werden in diesem Kapitel bereits bestehende Sensoren und Sensorsysteme sowie ein aktueller Stand der Technik präsentiert. Schließlich werden auch bestehende Halbleitertechnologieprozessgrundlagen aufgeführt. Für die Erfüllung dieser Kriterien und zur weiteren Verbesserung der Parameter, wird im darauffolgenden Kapitel 3 - Konzept eines integrierten Sensorsystems - zunächst ein analytisches Modell eines thermischen Fluss- und Absolutdrucksensors konzipiert. Dies bietet eine grundlegende Beschreibung des Systems und dessen physikalischer Funktionsweise. Außerdem dient es zur Plausibilisierung und Bewertung von experimentellen Messergebnissen. Der Flusssensor wird dann in Kapitel 4 - Modellbildung und Simulation mittels FEM - iterativ, mittels verschiedener FEM- und FVM-Simulationen, bezüglich seiner Funktion, insbesondere im Bezug auf dessen Temperaturansprechempfindlichkeit⁴, analysiert.

Die Ergebnisse der Simulationen ermöglichen die Entwicklung eines passenden Technologieprozesses. Dieser wird in Kapitel 5 - Entwicklung der Technologieprozesse - beschrieben.

⁴Gemessen in [$\frac{mV}{K}$].

Das dadurch entwickelte Layout wird genutzt, um die Prozessierung eines Prototypens zu gewährleisten. Die benötigten Prozessschritte werden in verschiedenen Vorversuchen evaluiert, um die Herstellung des Flusssensors zu realisieren.

In Kapitel 6 - Charakterisierung von thermischen Flusssensor-Prototypen - erfolgt die Konzipierung eines Messstandes und eine Charakterisierung von Prototypen des hier vorgestellten Flusssensors. Die Resultate werden wiederum zur iterativen Verbesserung des Technologieprozesses, in Zusammenhang mit dem Simulationsmodell, genutzt. Eine abschließende Auswertung dieser und ein Ausblick für aufbauende Entwicklungen finden sich im letzten Kapitel 7 - Zusammenfassung und Ausblick.

Nach der Einleitung werden nun zunächst physikalische Grundlagen zur Hydrodynamik und deren Messprinzipien vorgestellt. Dies dient als Grundlage für einen Einstieg in die Thematik.

2 Grundlagen zur Bestimmung von Durchfluss und Absolutdruck

In diesem einleitenden Kapitel sind Motivation, Anwendungen und Zielsetzung für Untersuchungen von mikro- und nanofluidischen Effekten anhand der Entwicklung eines nanoskaligen Sensorsystems beschrieben. Dieses beinhaltet einen thermischen Durchfluss- und einen Absolutdrucksensor. Es erfasst die strömungsabhängigen Parameter Druck und Durchfluss. In dieser Arbeit liegt der Fokus primär auf einer Messung des Durchflusses. Er wird generell als Volumen- oder Massenstrom erfasst und in diesem Kapitel werden die Definitionen dieser Parameter aufgeführt. Dabei folgt eine Darstellung von deren Zusammenhängen und Abhängigkeiten zu weiteren physikalischen Konstanten und Variablen. Außerdem werden einige grundlegende Randbedingungen in einer mikrofluidischen Messumgebung definiert. Weiterhin sind konventionelle Messprinzipien, eine kurze historische Entwicklung der Flusssensorik und ein aktueller Stand der Technik beschrieben. Abschließend werden mikromechanische Herstellungsverfahren für Fluss- und Drucksensoren vorgestellt. Zunächst folgt eine Zusammenfassung der Definitionen bezüglich der Messparameter Druck, Volumenstrom und Massenstrom. Der Volumenstrom pro Zeiteinheit (\dot{V}) wird mit

$$\dot{V} = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \int_{A_Q} \bar{v} \cdot dA \quad (2.1)$$

beschrieben und vergleichbar wird der Massenstrom pro Zeiteinheit (\dot{m}) durch

$$\dot{m} = \frac{\Delta m}{\Delta t} = \int_{A_Q} \rho \cdot \bar{v} \cdot dA = \rho \cdot \dot{V} \quad (2.2)$$

definiert, wobei jeweils die mittlere Geschwindigkeit eines Fluides (\bar{v}) erfasst wird, bei der die Masse eines Körpers (m) oder äquivalent das Volumen eines Körpers (V) pro Zeiteinheit (t) eine Querschnittsfläche eines Körpers (A_Q) passiert. Aus Gleichung 2.2 wird ersichtlich, dass die Messung eines Massenstroms unabhängig von Temperatur und Druck ist, während bei der eines Volumenstroms, wie in Gleichung 2.1 dargestellt, insbesondere das Volumen von

der Temperatur abhängig ist. Dies gilt auch für inkompressible Fluide und gilt es bei einer Messung zu berücksichtigen. [26, S. 13] [27, S. 10-12] Dabei wird ein Volumenstrom in

$$\dot{V} = \frac{m^3}{s}; \frac{m^3}{h}; \frac{l}{s}; \frac{l}{h}. \quad (2.3)$$

angegeben und ein Massenstrom analog mit

$$\dot{m} = \frac{kg}{s}; \frac{g}{s}; \frac{kg}{h}. \quad (2.4)$$

definiert. [28] Somit sind die grundlegenden Einheiten und deren Zusammenhänge beschrieben.

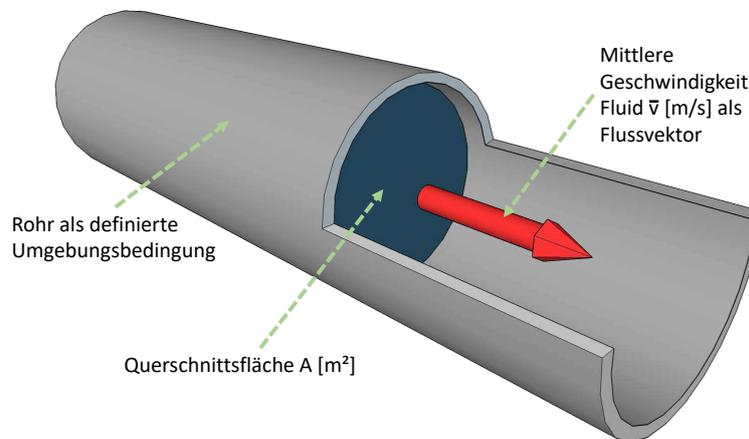


Abb. 2.1: Parameter zur Beschreibung der Strömung in einem Rohr.

In Abbildung 2.1 sind diese Parameter schematisch für eine Strömung in einem Rohr dargestellt, um die Zusammenhänge zu visualisieren. Dies zeigt eine grundlegende Definition der Flussparameter auf.

Für die Erfassung des Durchflusses wird zwischen Masse- und Volumenflusssensoren unterschieden. Diese basieren auf unterschiedlichen Verfahren und Technologien. Eine Übersicht dieser ist in Abschnitt 2.2 dargestellt. Der Zusammenhang des Masse- mit dem Volumenstrom wird über die Dichte (ρ) des zu messenden Mediums hergestellt, welche mit

$$\rho = \lim_{\Delta V \rightarrow \Delta V'} \frac{\Delta m}{\Delta V} \quad (2.5)$$

in einem Punkt beschrieben ist. Die Grenzwertbetrachtung hierbei liefert die Dichte für ein kleinstmögliches Volumenelement ($\Delta V'$). [26, S. 13] [27, S. 3-8] Im Vergleich dazu wird der Druck (p) in einem ruhenden Fluid definiert durch den Betrag der Normalkraft (F_n), welche

senkrecht auf eine Fläche (A) wirkt, also mit

$$p = \lim_{\Delta A \rightarrow \Delta A'} \frac{\Delta F_N}{\Delta A}. \quad (2.6)$$

Auch hierbei erfolgt eine Grenzwertbetrachtung, um den Druck für ein kleinstmögliches Flächenelement ($\Delta A'$) zu betrachten. Er wird in der gesetzlichen Einheit

$$p = Pa. \quad (2.7)$$

angegeben. [29, S. 3] [27, S. 9-10] Einen direkten Zusammenhang zur Einheit der Kraft pro Fläche gibt es mit

$$1Pa = 1 \frac{N}{m^2}. \quad (2.8)$$

2.1 Eigenschaften und Strömungsverhalten von Fluiden

Nach der Definition der Messparameter folgt eine Beschreibung der Messumgebung eines fluidischen Systems, um einen Einfluss der Systemumgebung auf das Messverhalten des vorgestellten Sensorsystems zu bestimmen. Ein elementarer Bestandteil ist dabei das Strömungsverhalten eines Fluides. Um dieses zu beschreiben, bedarf es zunächst der Definition einiger Randbedingungen, wie Strömungsformen von Fluiden und deren Zusammenhängen mit dem Geschwindigkeitsprofil.

Strömungsformen eines Fluides

Entscheidend für das Verhalten von Fluiden und die anwendbaren physikalischen Gesetzmäßigkeiten ist die Strömungsform. Diese ist in einem fluidischen System entweder laminar oder turbulent. Abhängig von der Strömungsform muss ein entsprechendes Messverfahren ausgewählt werden. [27, S.111 ff.]

Haben alle Fluideteilchen einen parallel zueinander verlaufenden Geschwindigkeitsvektor, welcher ebenfalls parallel zu den umgebenen Grenzflächen eines Strömungskanals liegt, wird dies als laminare Strömung definiert. Dies ist in Abbildung 2.2 dargestellt. Dabei ist auch bei geringen Flüssigkeitsschichten keine gegenseitige Beeinflussung einzelner Teilchen beobachtbar. Der Geschwindigkeitsvektor von Fluidschichten bleibt somit konstant.

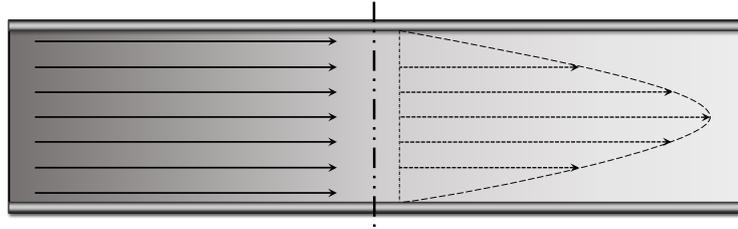


Abb. 2.2: Darstellung eines laminaren Strömungsverhaltens mit gleichgerichteten Geschwindigkeitsvektoren (links) und zugehörigem Geschwindigkeitsprofil (rechts).

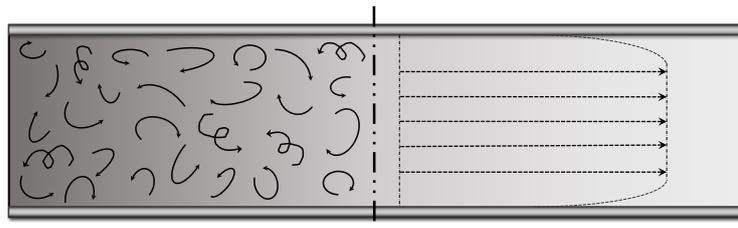


Abb. 2.3: Darstellung eines turbulenten Strömungsverhaltens mit überlagernden Geschwindigkeitsvektoren (links) und zugehörigem Geschwindigkeitsprofil (rechts).

Gibt es zusätzlich überlagernde Geschwindigkeitsvektoren in andere Richtungen, so wird die Strömung als turbulent bezeichnet. Dadurch ergibt sich eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils gegenüber der laminaren Strömung. Wie in Abbildung 2.3 gezeigt, bildet sich hierbei eine breitere Geschwindigkeitsfront aus und die Randbereiche enthalten Geschwindigkeiten von $> 0 \text{ m/s}$. [27, S. 111] [26]

Bei einer Erfassung der Fluidgeschwindigkeit gilt es die unterschiedlichen Strömungsprofile zu berücksichtigen. Sie bestimmen maßgeblich die Verteilung eines Geschwindigkeitsfeldes, bis hin zu der Randbedingung, sodass bei einer laminaren Strömung theoretisch eine Geschwindigkeit von 0 m/s in den Randbereichen gilt. Somit ist eine Messung in diesem Bereich nicht zielführend.

Reynoldszahl

Ein Parameter zur Definition eines Strömungsverhaltens ist die einheitenlose Reynoldszahl (Re). Sie gibt das Verhältnis der Reibungskraft zur Trägheitskraft an und wird mit

$$Re = \frac{\text{Trägheitskraft}}{\text{viskose Reibungskraft}} = \frac{\bar{v} \cdot \rho_{FL} \cdot L}{\eta} \quad (2.9)$$

definiert. Die Fluidichte (ρ_{FL}), mittlere Geschwindigkeit eines Fluides (\bar{v}), dynamische Viskosität (η) und ein charakteristischer Längenparameter (L) beschreiben diese dementsprechend.

[27, S. 107][28, S. 104] Das beschriebene Kräfteverhältnis bedingt unter gewissen Umständen Querbewegungen im Fluid und somit beschreibt es den Übergang von laminarer zu turbulenter Strömung. Als Grenzwert wird hierfür die kritische Reynoldszahl (Re_{krit}) eingeführt. Unterschreitet die Reynoldszahl in einem System diesen Grenzwert, welcher bei $Re_{krit} = 2300$ liegt, kann eine laminare Strömung angenommen werden. Sollte sie diesen überschreiten, liegt eine turbulente Strömung vor. Bei und um den Grenzwert gibt es Mischformen aus beiden Regimen. Da in einem mikroskaligen Sensorsystem, aufgrund der Dimensionen, von einem sehr kleinen Re ausgegangen wird, ergibt sich bei dem vorgestellten Sensorsystem überwiegend eine laminare Strömung. Dies wird auch in Gleichung 2.9 ersichtlich. Dadurch wird nur ein Geschwindigkeitsvektor in Flussrichtung relevant, was analytische Betrachtungen signifikant vereinfacht. In Tabelle 2.1 ist der Unterschied zwischen laminarer und turbulenter Strömung zusammengefasst.

Tab. 2.1: Vergleich zwischen turbulenter und laminarer Strömung. [26]

Art der Strömung	laminar	turbulent
Reynoldszahl	< 2300	> 2300
Geschwindigkeitsprofil	parabolisch	annähernd rechteckig

Viskosität

Eine weitere Eigenschaft eines Fluides ist die Viskosität. Diese beschreibt das Verhalten eines Stoffes, welche die Reibungsspannung bei Bewegung beeinflusst und resultiert aus einer internen Reibung zwischen den Molekülen in einem Stoff. Dabei wird diese unterschieden in dynamische Viskosität (η) und kinematische Viskosität (ν). Abhängig vom Fließverhalten wird ein Fluid in Nicht-Newton'sche und Newton'sche Fluide unterteilt, wobei die Viskosität bei Newton'schen Fluiden unabhängig von der Geschwindigkeit ist. [27, S. 10][28, S. 15] Dies wird bei der Betrachtung der Navier-Stokes-Gleichungen relevant [28, S. 216]. Beschrieben wird der Zusammenhang zwischen den Viskositätsarten mit

$$\nu = \frac{\eta}{\rho} \quad (2.10)$$

und ist somit über die Dichte (ρ) verknüpft. Die kinematische Viskosität (ν) ist definiert mit

$$\nu = \frac{Pa \cdot s \cdot m^3}{kg} = \frac{m^2}{s}. \quad (2.11)$$

Vgl.: [26, S. 15] [27, S.11].

Kompressibilität

Eine weitere elementare Eigenschaft eines Fluides ist dessen Kompressibilität. Kompressible Fluide benötigen in der Regel mehr Randbedingungen zur Berechnung ihrer Eigenschaften und werden für andere Anwendungen genutzt, als bei dem hier zu betrachtenden System. Ein Fluid wird als inkompressibel angenommen, sobald die einheitenlose Machzahl zur Beschreibung der Kompressibilität (M) kleiner als 0,3 ist. Die Machzahl wird definiert durch das Verhältnis

$$M = \frac{v_{Partikel}}{v_{Schall}}, \quad (2.12)$$

also relative Geschwindigkeit eines Partikels ($v_{Partikel}$) zu Schallgeschwindigkeit (v_{Schall}). [28, S. 106-107]

Analogie zwischen Fluidik und Elektrotechnik

Weiterhin lässt sich ein System mit fluidischen Elementen näherungsweise auch mit einem elektrotechnischen System vergleichen. Dafür sind die jeweils elektrotechnischen und die fluidischen Grundbegriffe in Zusammenhang gebracht.

Tab. 2.2: Analogie zwischen fluidischen und elektrotechnischen Parametern. [30]

Elektrischer Strom	I	\Leftrightarrow	Volumenstrom	Q
Elektrische Spannung	U	\Leftrightarrow	Druckabfall	δp
Elektrischer Widerstand	$R = \frac{U}{I}$	\Leftrightarrow	Reibungswiderstand	$R_{Fluid} = \frac{\Delta p}{Q}$
Elektrische Kapazität	$I = C \cdot \frac{dU}{dt}$	\Leftrightarrow	Kompressibilität	$\Delta p = C_{Fluid} \cdot \frac{dp}{dt}$
Induktivität	$U = L \cdot \frac{dI}{dt}$	\Leftrightarrow	Trägheitsverluste	$\Delta p = L_{Fluid} \cdot \frac{dQ}{dt}$

In Tabelle 2.2 sind relevante Parameter aufgeführt und dienen einer besseren technischen Verständlichkeit für die Betrachtung in den folgenden Abschnitten und Kapiteln. Entscheidend ist hierfür das Vorliegen eines laminaren Strömungsregimes, welches in der Regel bei Mikrokanälen gegeben ist. [31]

Mit den aufgeführten Parametern erfolgt in den Kapiteln 3 und 4 eine analytische und numerische Berechnung des Sensorsystems. Zunächst wird eine Übersicht von konventionellen Sensoren zur Bestimmung von Durchfluss und Druck dargestellt. Dies ermöglicht eine Zusammenfassung von aktuellen Verfahren und somit eine Vergleichbarkeit zu dem hier vorgestellten Sensorsystem. Dazu wird einleitend ein Überblick von bereits vorhanden Messprinzipien in

der Flusssensorik gegeben und als grundlegender Erkenntnisgewinn für diese Arbeit genutzt.

2.2 Messprinzipien der Fluss- und Drucksensorik

Zur Erfassung von Durchfluss und Druck gibt es diverse Messverfahren, welche auf unterschiedlichen Messprinzipien basieren. Diese werden nun zunächst dargestellt, um eine Übersicht bezüglich verschiedener Sensorarten und derer physikalischer Eigenschaften zu geben.

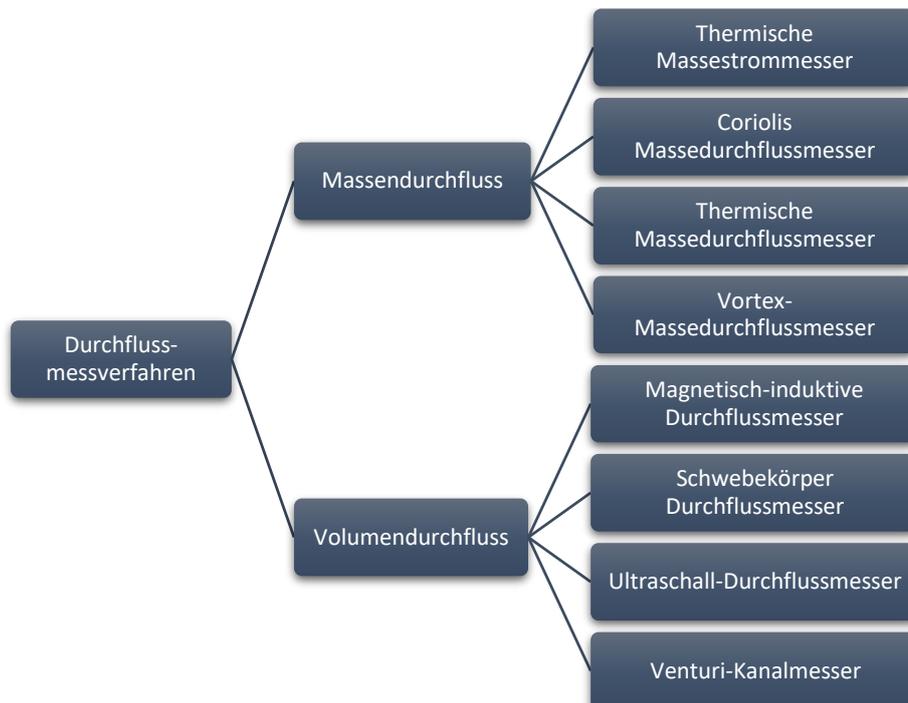


Abb. 2.4: Übersicht von verschiedenen Durchflussmessverfahren. [26]

Die Messverfahren der Flusssensorik unterscheiden sich in der Anwendung unterschiedlicher physikalischer Phänomene und bezogen auf ihre Messbereiche. So gibt es optische, thermische, auf Dichte basierende und mittels Corioliskraft messende Verfahren. Dabei gilt es grundlegend zwischen volumetrischen Zähler und momentanen Durchflussmessverfahren zu unterscheiden. Dies wird in den Abschnitten 2.2.1 und 2.2.2 gezeigt.

Eine Übersicht von Durchflussmessverfahren ist in Diagramm 2.4 dargestellt. Dabei hat jedes Messverfahren individuelle Vor- und Nachteile. Entscheidende Faktoren sind dabei unter anderem Umfang und Linearität des Messbereiches, aber Rahmenparameter sind auch der Einsatzbereich, das zu messende Medium und die Robustheit des Messverfahrens. Weiterhin ist für eine kommerzielle Bewertung die Komplexität einer Fertigung relevant. [26]

Um einen Überblick bezüglich des aktuellen Stand der Technik zu gewährleisten, werden in den kommenden Unterabschnitten einige dieser Messmethoden näher beschrieben. Dies dient zur Grundlage für neuartige Messverfahren und bietet weitere Impulse für Entwicklungen.

2.2.1 Volumetrische Zähler

Eine erste Kategorie von Flusssensoren sind die sogenannten volumetrischen Zähler. Diese gibt es in verschiedenen Bauformen und mit unterschiedlichen Funktionsweisen. Zu ihnen gehören beispielsweise Trommelzähler, Ringkolbenzähler, Ovalzähler, Flügelradzähler und Woltmannzähler. [26] Zur prinzipiellen Darstellung der Funktionsweise dieser Art von Flusssensoren wird hier exemplarisch das Prinzip eines Flügelzählers erläutert. Hierbei wird ein Schaufelrad über ein tangential passierendes, fluidisches Medium angetrieben. Dabei werden, mittels eines Magnetsensors, die Umdrehungen des Rades erfasst und aufsummiert. So ergibt sich für eine definierte Zeitspanne t eine bestimmte Anzahl von Umdrehungen n . Über diese lässt sich die Menge des vorbeifließenden Mediums bestimmen. Anschaulich ist dies in Abbildung 2.5 dargestellt. Diese Art der Volumenmessung kommt vorzugsweise in der Haustechnik zum Einsatz, wie bei der Erfassung des Wasserverbrauchs. Laut Deutsche Industrie Norm (DIN) 3260 liegen die Messbereiche zwischen 30 bis 3000 $\frac{l}{h}$ und 200 bis 30.000 $\frac{l}{h}$. [27, S. 326].

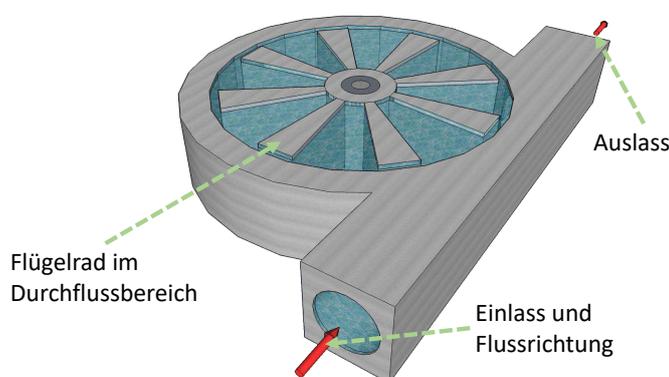


Abb. 2.5: Skizze eines Flügelradzählers zur Bestimmung einer Fluidmenge.

2.2.2 Momentane Durchflussmesser

Im Vergleich zu volumetrischen Zählern gibt es auch Durchflussmessungen, welche einen Momentanwert ermitteln und somit eine direkte Messung von einer Durchflussgeschwindigkeit ermöglichen. Eine Auswahl von Messprinzipien zur Durchflussmessung ist ebenfalls

in Abbildung 2.4 gezeigt. Im Folgenden wird eine Auswahl dieser Verfahren detaillierter erläutert, um einen Einblick in diese Messverfahren zu ermöglichen. Dabei werden auch Vor- und Nachteile aufgezeigt, welche den jeweiligen Einsatz der Messverfahren begründen.

Ultraschall basierte Durchflussmesser

Durchflussmesser basieren auf einer Detektion eines mit Schallgeschwindigkeit ausbreitenden Signals. Diese Messung gliedert sich in zwei Varianten:

1. Zeittransiente Methode
2. Doppler-Messmethode

Beide Verfahren nutzen die Beschreibung der Laufzeit eines solchen Signals mit

$$t = \frac{d_{AB}}{v_{Schall}} \quad (2.13)$$

aus, also eine Distanz A zu B (d_{AB}) dividiert durch die Schallgeschwindigkeit (v_{Schall}), mit welcher sich das Signal durch ein Medium bewegt. Die Laufzeit des Signals ergibt sich vom Sender zum Empfänger (A nach B) als t_1 mit

$$t_1 = \frac{d_{AB}}{v_{Schall} + v_{Fluid}} \quad (2.14)$$

und vom Empfänger zum Sender als t_2 mit

$$t_2 = \frac{d_{AB}}{v_{Schall} - v_{Fluid}} \quad (2.15)$$

bei einer als konstant angenommenen Fluidgeschwindigkeit (v_{Fluid})⁵ ergibt sich aus

$$v_{Schall} = \frac{d_{AB}}{t_1 - v_{Fluid}} \quad (2.16)$$

und

$$v_{Schall} = \frac{d_{AB}}{t_2 + v_{Fluid}} \quad (2.17)$$

die momentane Fluidgeschwindigkeit

⁵Konstant, da durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit des Signals keine Änderung anzunehmen ist.

$$v_{Fluid} = \frac{d_{AB}}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right). \quad (2.18)$$

Im praktischen Fall wird eine Messung über einen definierten Winkel α ermöglicht und durch

$$v_{Fluid} = \frac{d_{AB}}{2 \cdot \cos\alpha} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right) \quad (2.19)$$

bestimmt. [26, S. 137-139] [32] Eine Skizze eines solchen Sensors ist in Abbildung 2.6 gezeigt.

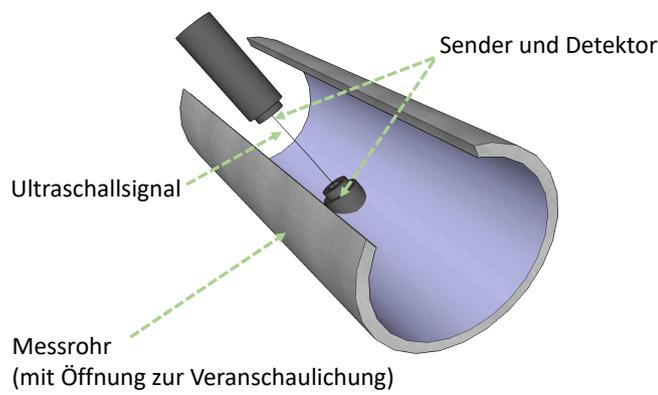


Abb. 2.6: Durchflusssensor basierend auf einem Ultraschallsensor.

Dieses Verfahren hat den Vorteil, dass unter anderem das Messsignal unabhängig von dem Druck, der Temperatur und der Dichte des Mediums ist. [33, S. 23-26]

Thermische Flusssensoren

Ein physikalisches Wirkungsprinzip, auf dem Flusssensoren basieren, ist die Nutzung von thermischen, thermo-elektrischen und thermo-mechanischen Effekten. Diese bieten diverse Vorteile, wie zum Beispiel, dass keine beweglichen Teile in einem solchen System notwendig sind und somit eine Ausfallwahrscheinlichkeit von mechanischen Komponenten reduziert wird. Bei passender Einstellung eines Systems ergibt sich dadurch eine erhöhte Langzeitstabilität. Weitere Vorteile sind eine reduzierte Leistungsaufnahme und eine gesteigerte Sensitivität bei geringeren Durchflussraten. Aktuelle Messverfahren ermöglichen zusätzlich eine kompaktere Bauform im Vergleich zu älteren Messverfahren, was neue Einsatzgebiete der Sensoren ermöglicht. So können hierbei hochintegrierte Analysesysteme entwickelt werden, welche mit kleinstmengen an Fluiden auskommen. [34] Diese können darüber hinaus auch kostengünstig

in einer Massenproduktion hergestellt werden. [35]

Thermische Flusssensoren basieren im Wesentlichen auf drei verschiedenen Arten:

- Thermische Anemometrie
- Kalorimetrische Flusssensoren
- Thermal Time of Flight

Dabei wird bei jedem Prinzip ein Heizelement als zentrale Funktionseinheit verwendet. Dieses erzeugt eine definierte Wärme über eine eingeprägte elektrische Leistung.

Tab. 2.3: Vergleich thermischer Messverfahren zur Bestimmung eines Durchflusses.

Messverfahren	Anemometrie	Kalorimetrie	Thermal Time of Flight
Komplexität	Gering	Mittel	Hoch
Messparameter	Wärmeenergie	Temperaturgradient	Laufzeit von Hitzepaketten
Vorteile	einfache Sensorstruktur hohe Messgenauigkeit große Messbereiche	proportional zum Massenfluss geeignet für geringe Geschwindigkeiten	direkte Erfassung der Geschwindigkeit unabhängig von Fluideigenschaften
Nachteile	geometrischen Parameter müssen kalibriert sein Nichtlinearität	komplexerer Aufbau als Anemometrie	bei geringer Flussgeschwindigkeit ist die Wärmeleitfähigkeit des Mediums zu groß

Die erzeugte Wärme wird durch das umgebene Medium mittels Konvektion und Konduktion abgeführt. Das Abführen der Wärme wird über die Zeit bei einer konstant eingepägten Leistung⁶ oder über separate Thermosensoren⁷ gemessen. Diese Verfahren weisen dabei unterschiedliche Randbedingungen und Anforderungen auf. Ein Vergleich der Vor- und Nachteile ist in Tabelle 2.3 aufgeführt.

Diese drei Verfahren sollen nun näher beschrieben und die einzelnen Anforderungen dargestellt werden. Weiterhin werden Anwendungsbeispiele aufgeführt, in welchen diese genutzt werden.

⁶Anemometrisches Prinzip, vgl. Abbildung 2.7.

⁷Kalorimetrie und TToF, vgl. Abbildungen 2.9 und 2.11.

Thermische Anemometrie

Bei der thermischen Anemometrie wird ein Heizelement mit einer konstanten Leistung betrieben und diese über das umströmende Medium abgeführt, wie in Abbildung 2.7 schemenhaft dargestellt ist.

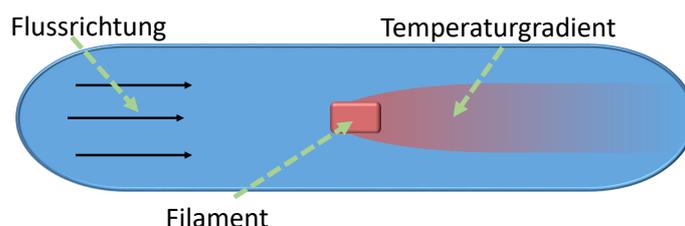


Abb. 2.7: Schematische Darstellung des Messprinzips einer thermischen Anemometrie, mit einem Heizelement (Filament) über dessen Abwärme die eines umgebenen Mediums ermittelt werden kann.

Die Änderung eines Wärmeübergangs wird zur Detektion der Strömungsgeschwindigkeit genutzt [36]. Dabei kann das Heizelement zum Beispiel aus einem Widerstandsdraht⁸ hergestellt werden. Zur Berechnung der Strömungsgeschwindigkeit wird die „King’sche Formel“ [37] genutzt,

$$\dot{Q} = (A + B \cdot c^{0,5}) \cdot (T_S - T_F), \quad (2.20)$$

die den Einfluss der Temperaturdifferenz zwischen Leiter (T_S) und umströmenden Fluid (T_F) auf den Wärmestrom $\dot{Q} = I_{Fil}^2 \cdot R_S$ beschreibt. Bei einem konstanten Filamentstrom I_{Fil} durch den Widerstandsdraht ändert sich somit der Widerstandswert R_S in Abhängigkeit der Temperatur. Dies wird hervorgerufen durch eine Fluidstromdifferenz. A und B sind hierbei Geometrie- und Materialkonstanten, welche auf das jeweilige System angepasst werden müssen.

Die Widerstandsänderung wird hierbei mit

$$R_S = R_0[1 + \alpha(T_S - T_0)] \quad (2.21)$$

beschrieben. In diesem Fall werden für die Werte R_0 und T_0 jeweils der Widerstand des Drahtes, beziehungsweise dessen Temperatur bei einem definierten Ursprungszustand angenommen. Weiterhin ist α der Wärmeübergangskoeffizient zwischen Fluid und Filament. [36]

⁸Auch Filament genannt.

Bei der Zusammenführung beider Gleichungen (2.20 und 2.21) und Umstellung nach der Strömungsgeschwindigkeit (\dot{Q}) ergibt sich:

$$\dot{Q} = \left[\frac{-A + \frac{I^2 \cdot R_0 [1 + \alpha_T (T_S - T_0)]}{T_S - T_F}}{B} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.22)$$

Mit diesem Prinzip lässt sich somit die Strömungsgeschwindigkeit über eine Temperaturänderung erfassen.

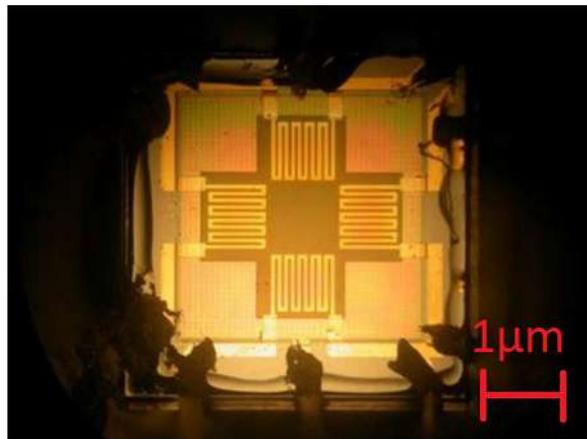


Abb. 2.8: Aufnahme eines in Planartechnologie gefertigten Mikroflusssensors, basierend auf dem Messprinzip der thermischen Anemometrie. [38]

Ein Beispiel für ein integriertes Messsystem ist von Adamec et al. realisiert [38] und in Abbildung 2.8 gezeigt. Dabei kommen selbst-heizende thermisch-resistive Elemente zum Einsatz, welche als Messbrücke angeordnet sind. Eine Verstimmung dieser lässt sich durch eine thermische Beeinflussung detektieren und letztendlich auf die Fluidgeschwindigkeit zurückführen. [16]

Kalorimetrie

Eine weitere Messmethode, welche thermische Effekte nutzt, ist die Kalorimetrie. Dabei ist die Dichte des Mediums entscheidend und es ergibt sich ein Zusammenhang über Flussgeschwindigkeit im Bezug auf den Massenstrom. Durch diesen wird letztendlich ein asymmetrisches Temperaturprofil oberhalb der Sensorfläche erzeugt, welche durch zwei Temperatursensoren ausgelesen wird.

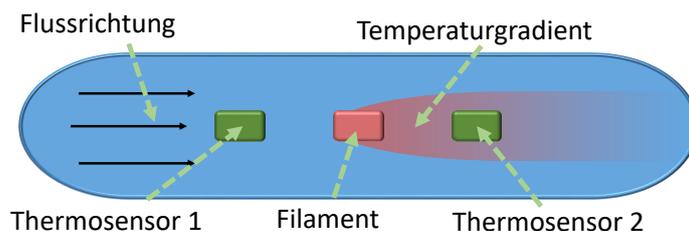


Abb. 2.9: Messprinzip der Kalorimetrie mit zentriertem Heizelement und Temperatursensoren zur Messung der Flussgeschwindigkeit.

Ein prinzipieller Aufbau dieser Anordnung ist in Abbildung 2.9 gezeigt. Es bietet einen Vorteil hinsichtlich der Messauflösung, da hier mit zwei Dioden, ein Differenzsignal ausgewertet wird und somit Störsignale rausgefiltert werden. Dieses Prinzip kommt auch bei einem TToF-Verfahren zum Einsatz, wie in dem nachfolgendem Abschnitt deutlich wird. Insgesamt ist dazu eine angepasste Signalauswertung erforderlich, welche in einer Ausleseschaltung integriert werden muss. Eine praktische Realisierung von einem solchen Sensor ist in Abbildung 2.10 dargestellt. [16]

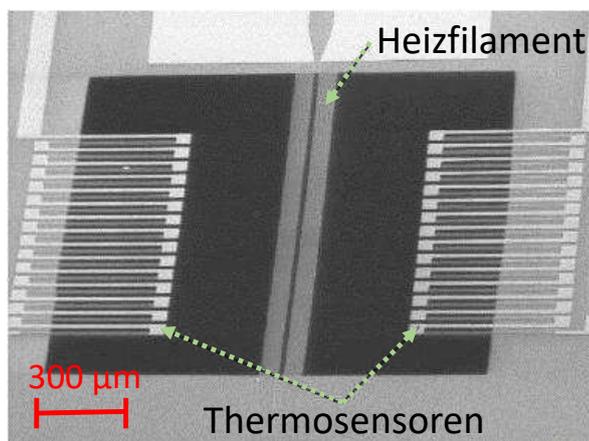


Abb. 2.10: Realisierung eines kalorimetrischen Flusssensors mit Thermosensoren. [39]

Thermal Time of Flight (TToF)

Eine weitere Variante ist das TToF-Verfahren. Dabei kann der Aufbau aus Abbildung 2.9 prinzipiell weiter genutzt werden, wie in Abbildung 2.11 gezeigt.

Über ein zentral liegendes Filament wird hierbei ein Hitzepaket erzeugt und über das umgebene Medium in Flussrichtung mitgetragen. Nach einer Zeit t_1 wird es einen ersten Temperatursensor passieren und diesen thermisch beeinflussen. Diese Zeit, beziehungsweise dieser Zeitpunkt t_1 wird messtechnisch erfasst. Ist eine weitere Zeit t_2 vergangen, hat das Hitzepaket

einen zweiten Temperatursensor erreicht und erzeugt auch hier eine thermische Reaktion, welche gemessen werden kann. Durch die Differenz der beiden Zeiten t_1 und t_2 wird nun die Laufzeit ermittelt. Mit der gegebenen Geometrie lässt sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_A berechnen. Eine ausführliche Beschreibung ist in Kapitel 3 aufgeführt.

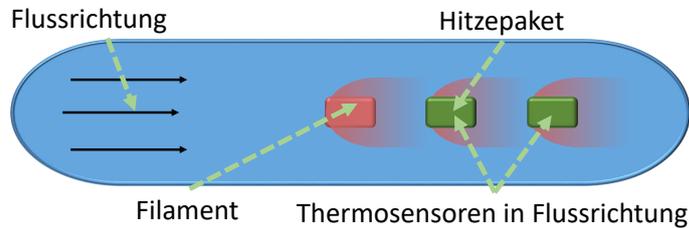


Abb. 2.11: Allgemeine Skizze eines auf dem TToF basierenden Flusssensor zur Detektion eines Hitzepakets in Flussrichtung mittels Temperatursensor.

Konventionelle Messverfahren in der Drucksensorik

Wie bereits Eingangs erwähnt, soll im Rahmen dieser Arbeit auch ein Konzept einer Integration von einem Absolutdrucksensor mit dem Flusssensor vorgestellt werden. Dazu sind verschiedene Verfahren der Drucksensorik aufgeführt. Prinzipiell wird unterschieden in

- Absolutdrucksensor
- Relativdrucksensor
- Differenzdrucksensor

Diese bieten unterschiedliche Vor- und Nachteile, wobei sich zur Integration in ein Silicon-Insulator (SOI)-Substrat insbesondere ein Absolutdrucksensor anbietet, wie nachfolgend deutlich wird. [40]

2.3 Vorherige Entwicklungen und Stand der aktuellen Technik und Forschung

Die Messverfahren zur Druck- und Durchflussmessung haben mehrere Entwicklungsschritte durchlaufen, welche hier durch einen Zeitstrahl in Abbildung 2.12 zusammengefasst sind.

Wie dargestellt wurde 1630 der Luftdruck zum ersten Mal wissenschaftlich von Galileo Galilei beschrieben [41, S. 474]. Darauf hin wurden verschiedenste Gesetzmäßigkeiten in dem Gebiet der Fluidik definiert, was auch in der Hydrodynamica von Bernoulli 1738 dargestellt wurde [42]. Weitere Entwicklungen von makroskopischen und insbesondere mechanischen Flusssensoren folgten darauf.

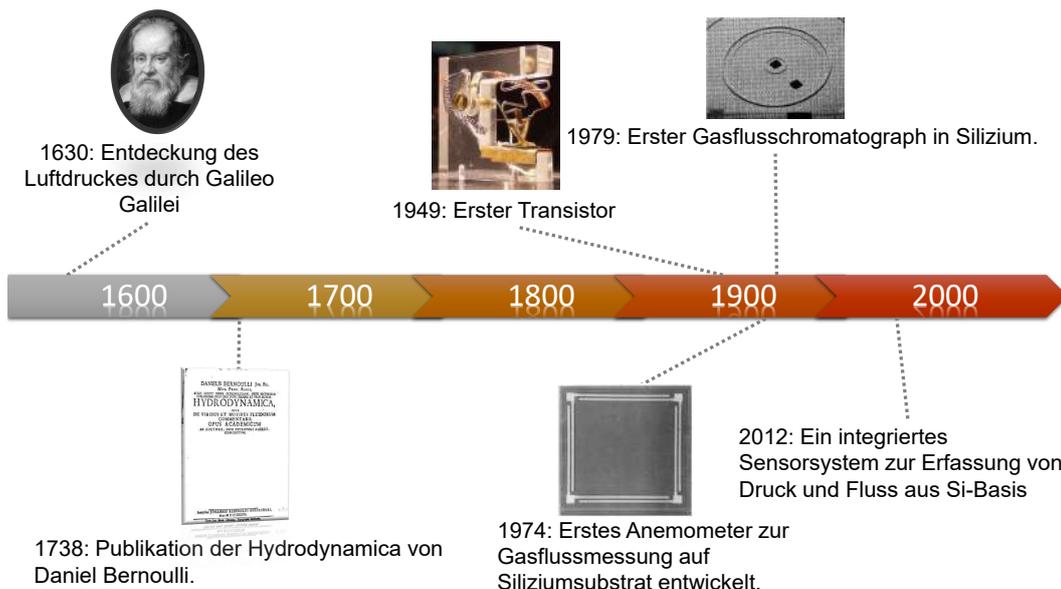


Abb. 2.12: Übersicht der zeitlichen Entwicklung von Druck- und Flusssensoren.

Seit der Entdeckung von halbleitenden Elementen und deren Eigenschaften und Vorteile für die Mikrosensorik wurden und werden verschiedenste Forschungen und derer Entwicklungen in diesem Themengebiet durchgeführt.

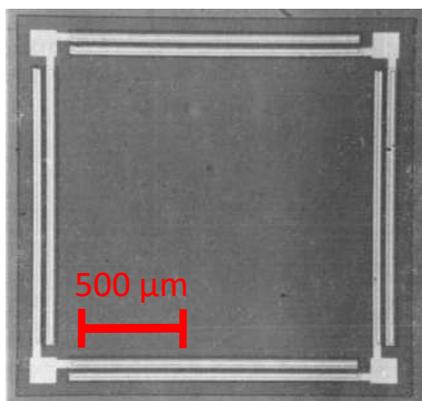


Abb. 2.13: Silizium Anemometer aus dem Jahr 1974. [43]

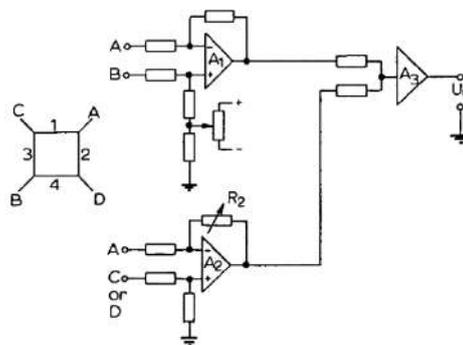


Abb. 2.14: Auslesebrückenschaltung für ein Silizium-Anemometer aus Abbildung 2.13.

Daraufhin folgten Konzepte von Sensoren, welche sich die Halbleitertechnologie zu Nutze machten. Dies führte zu einer Skalierung hin zu mikro- und nanoskaligen Strukturen. Dabei entstanden neue Gebiete, wie die sogenannten MEMS. Dabei sind erste Vorarbeiten seit dem Jahr 1973 im Bereich der Mikrodrucksensorik durch einen erstmals auf Silizium (Si)

integrierten Drucksensor [44] gezeigt. Im Jahr 1974 wird der Bereich der Mikrofluidik begründet. Dies geschieht durch Entwicklungen wie ein auf Silizium basierendes Anemometer, welches in Abbildung 2.13 gezeigt ist⁹, [43] und einem mikroskaligen Gas-Chromatograph [45, 46]. Wichtige zeitliche Abschnitte dieser Entwicklungen sind in der Abbildung 2.12 zusammengefasst. Erste integrierte Flusssensoren sind in einer Veröffentlichung von A. F. P. Van Putten und S. Middelhoek beschrieben [43].

Im Rahmen der stetigen Weiterentwicklung von Sensoren und der damit verbundenen wachsenden Diversifikation der einzelnen Sensorfunktionen (auch „Moore-than-Moore“ genannt, in Anlehnung an „Moore's Law“) entstanden Multi-Sensorsysteme, welche eine Integration von mehreren Sensoren auf einem Chip darstellen. Ein erstes Patent zu einem Thermal Time of Flight-Verfahren ist aus dem Jahre 1994 von Kang et. al. [47]. Hierbei wird ein makroskopischer TToF-Sensor beschrieben, welcher mit einem gepulsten Heizelement und einem einzelnen Thermoelement in Flussrichtung betrieben wird.

Stand der aktuellen Technik und Forschung

Gegenwärtig gibt es mehrere Sensorprinzipien zur Fluss- und Druckmessung, die zur Übersicht in Abbildung 2.4 dargestellt sind.

Wie schon im Abschnitt 2.3 beschrieben gibt es bereits mehrere Multi-Sensorsysteme. [48] Ein CMOS-kompatibles Sensorsystem, welches die Parameter Druck, Durchflussrate und Temperatur erfassen kann und gleichzeitig auf einem SOI-Substrat basiert, ist in der Veröffentlichung von M. Mansoor dargestellt [49]. Hierbei werden gängige Prozesse der Planartechnologie genutzt und mit einer konventionellen CMOS-Linie die Herstellung eines Sensorsystems realisiert. Wie in dem folgenden Abschnitt 2 näher erläutert wird gibt es einige Parameter, welche eine Charakterisierung hierbei ermöglichen. Diese sind insbesondere der Temperatur-, Druck- und Durchflussratenmessbereich sowie die thermische Ansprechempfindlichkeit, beziehungsweise der thermische Arbeitsbereich des Flusssensors. Laut den Untersuchungen aus der erwähnten Veröffentlichung ergibt sich bei dem Sensorsystem eine Temperaturansprechempfindlichkeit von $-1,6 \frac{mV}{K}$ bei einem Konstantstrom von $1 \mu A$. Der Drucksensor zeigte eine Sensitivität von $0,47 \frac{mV}{V} \cdot psi$.

Ein weiterer Flusssensor mittels eines thermischen Messverfahrens wird in einem Patent von Huang et al. beschrieben [50]. Hierbei wird auch ein mikroskaliges TToF-Verfahren genutzt, welches die kostengünstige Reproduzierbarkeit der Planartechnologie mit den Vorteilen der Skalierbarkeit, einer hohen Messauflösung und geringerer Leistungsaufnahme kombiniert. Allerdings wird bei diesem Sensorkonzept auf eine Nanometer-Skalierung der Sensorelemente

⁹Eine passende Ausleseschaltung ist in Abbildung 2.14 gezeigt.

verzichtet und die Vorteile von SOI-Substrat nicht genutzt. Durch die planare Integration der Sensorelemente mit der Möglichkeit einer thermischen Isolierung werden insbesondere Feuchtigkeitsschäden, wie sie bei herkömmlichen Flusssensoren auftreten können, vermieden.

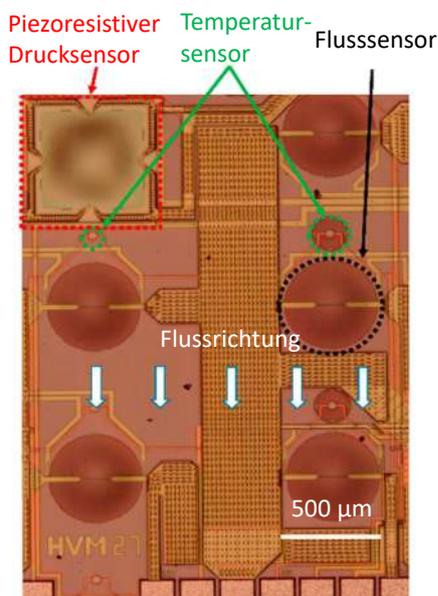


Abb. 2.15: Aufnahme eines integrierten Sensorsystems mit Temperatursensor, Flusssensor und Drucksensor. [49]

Des Weiteren werden Partikelkontaminationen verringert und somit die mechanische Stabilität erhöht. In diesem Sensorkonzept wird zum Auslesen der Messsignale ein Phasenshift detektiert, welches über ein eingepprägtes Sinussignal am Heizelement¹⁰ in Abhängigkeit von der Laufzeit in dem umgebenen Medium erfasst wird. Darüber wird die Flussgeschwindigkeit ermittelt.

Ein aktuelleres Beispiel ist ein MEMS, welches die Funktion eines Heizfilm-Anemometers abbildet. Dabei wird die abgeführte Wärmeenergie in Abhängigkeit von der Flussgeschwindigkeit gemessen. Im Vergleich zu einem TToF-Verfahren ist hierbei die spezifische Dichte des zu messenden Mediums relevant. Somit bildet dieses ein Massenflusssensor ab. Die Auswertung der Messsignale erfolgt über eine Wheatstone-Messbrücke. [51]

Ein nanofluidisches System wird hingegen in der Veröffentlichung von Shuyun Wu et al. beschrieben [52]. Dieses beinhaltet ein dotiertes, polykristallines Silizium-Heizelement, welches auf einen mikroskaligen Flusskanal prozessiert wird. Bei diesem Konzept handelt es sich um ein kalorimetrisches Messprinzip [53]. Alternativ gibt es auch elektro-chemische, thermische Flusssensoren [54].

¹⁰engl. heater

Weitere neuartige Flusssensoren zur Detektion von gasförmigem Stickstoffmonoxid werden auf Siliziumkarbid integriert, um den höheren Anforderungen an diese Umgebungsbedingung gerecht zu werden [55]. Dies ist neben einer Integration auf SOI für besondere Umgebungsanforderungen, wie zum Beispiel eine erhöhte Umgebungstemperatur, eine weitere Möglichkeit. Eine Übersicht verschiedener Flusssensoren für anspruchsvolle Umgebungsbedingungen sind in einer Veröffentlichung von Balakrishnan et. al. gegeben [56].

Eine weitere Arbeit beschreibt die Integration von dreidimensionalen Strukturen auf SOI zur Detektion einer Flussgeschwindigkeit. [57] Insgesamt gibt es vielfältige Möglichkeiten Fluss- und Drucksensoren mikro- und nanoskalig zu realisieren, welche nun dargestellt werden.

2.4 Prozesse zur Herstellung mikromechanischer Sensoren und Systeme

Bei den mikromechanischen Sensoren gibt es grundsätzlich zwei Herstellungsverfahren: Die Bulk-Mikromechanik, wobei in der Regel das Bulk rückseitig strukturiert und die Oberflächenmikromechanik, welche mit abgeschiedenen funktionalen und Opferschichten realisiert wird.

Tab. 2.4: Vergleich zwischen Bulk- und Oberflächenmikromechanik.

Verfahren	Bulk-Mikromechanik	Oberflächenmikromechanik
CMOS-Kompatibilität	eingeschränkt	uneingeschränkt
Veränderung des Substrates	ja	nein
Substratabhängiger Ätzstopp	ja	nein
Höchstintegration	nein	ja

Beide Techniken lassen sich kombinieren und für Mikrofluidik und Drucksensorik gleichermaßen anwenden. Ein Vergleich der beiden Herstellungsmethoden ist in Tabelle 2.4 dargestellt. [58, 59]

Im Folgenden werden die beiden Verfahren genauer erläutert, um einen Überblick zu gewährleisten.

Volumenmikromechanik

Eine Variante für die Volumenmikromechanik ist eine rückseitige Ätzung des Siliziumsubstrates mit KOH, wobei die <111>-Kristallebene des Siliziums als Ätzstopp agiert. Dabei

wird sich, abhängig von der Kristallorientierung, ein pyramidenförmiges oder senkrechtes Ätzprofil ergeben, wie in Abbildung 2.16 visualisiert. Hiermit bleibt in diesem Fall eine heruntergedünnte Membranfläche stehen, welche letztendlich zum Beispiel per Deformation durch einen Differenzdruck zwischen Ober- und Unterseite, zur Druckmessung genutzt werden kann. Dazu wird diese dann beispielsweise mit einem Pyrex-Glassubstrat verschlossen. Dies geschieht über eine Heizplatte mittels anodischem Bonden, wie in Abbildung 2.17 dargestellt.

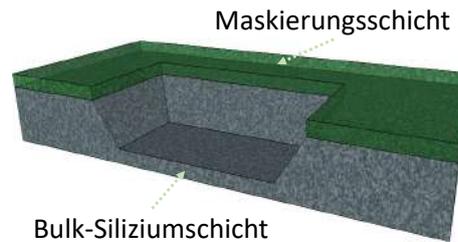


Abb. 2.16: Profil einer Bulk-Mikromechanik zur Erzeugung einer freigestellten Silizium-Fläche.

Analog lässt sich dieses Verfahren auch nutzen, um freischwebende Stege oder andere Strukturen für Flusssensoren herzustellen. [60, S. 85-90]

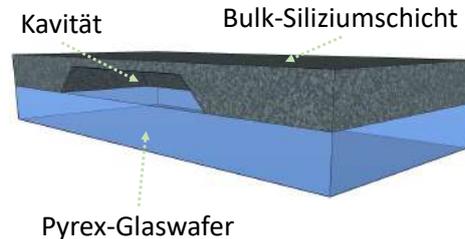


Abb. 2.17: Anodisch gebondeter Pyrex-Glaswafer auf einem strukturieren Siliziumwafer zur Erzeugung einer geschlossenen Kavität.

Oberflächenmikromechanik

Ein weiteres Verfahren zur Erzeugung von MEMS ist die Oberflächenmikromechanik, wobei durch verschiedene Abscheideverfahren funktionale und Opferschichten erzeugt werden. Diese werden anschließend durch Lithografie und Ätzprozesse gezielt strukturiert. Ein prinzipieller Aufbau ist in der Abbildung 2.18 gezeigt. Dabei besteht die Opferschicht meist aus einem Siliziumdioxid (SiO_2) und die funktionale Schicht aus einem polykristallinem Silizium, welches in einer Gasphase¹¹ erzeugt wird. Da diese Schicht kein einheitliches,

¹¹Bspw. Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition.

homogenes Kristallgitter aufweisen kann, also keine Monokristallinität, ist die direkte Integration von Ausleseeinheiten beschränkt. Dies lässt sich, wie in Abschnitt 3 gezeigt, durch eine vorgegebene, monokristalline Siliziumschicht verbessern. [60, S. 90-93]

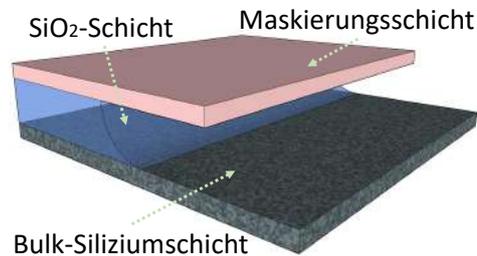


Abb. 2.18: Prinzipieller Aufbau einer Oberflächenmikromechanik.

2.4.1 Grundbegriffe und Parameter von mikromechanischen Technologieprozessen

Unabhängig davon, ob Oberflächen- oder Bulk-Mikromechanik zum Einsatz kommt, bedarf es der Definition verschiedener Parameter, um solche Technologieprozesse zu beschreiben. Wie bereits in den vorherigen Abschnitten dargestellt, ist die Manipulation von verschiedenen mikro- und nanoskaligen Schichten ein wesentliches Element bei diesen. Dabei sind insbesondere Parameter zur Bestimmung von geeigneten Strukturierungsprozessen elementar. So sind bestimmende Faktoren ein Ätzabtrag, eine Isotropie (f) und die Selektivität von Ätzraten zweier Materialien (S). Dazugehörige Prozesse werden in Abschnitt 2.4.2 vorgestellt. Zunächst folgt eine Einführung der Parameter.

Eine Ätzrate eines Materials wird dabei mit

$$\epsilon = \frac{\ddot{\text{Ätzabtrag}}}{\ddot{\text{Ätzzeit}}} \quad (2.23)$$

beschrieben und gibt an, welcher Schichtabtrag beim Ätzen von Strukturen sich über eine definierte zeitliche Dauer eines Ätzprozesses (t_{Ae}) einstellt. Diese wird in [$\mu\text{m}/\text{min}$] oder [mm/h] gemessen. Hierbei wird nicht nur ein chemischer Abtrag einer Schicht betrachtet, sondern ebenso ein physikalischer, zum Beispiel durch gezielten Ionenbeschuss einer Oberfläche. Soll eine Schicht um einen genauen Betrag verringert werden, so bedingt dies eine genaue Ermittlung der Ätzrate eines Materials. Weiterhin ist die Isotropie ein Faktor, welcher bei einem Schichtabtrag die Korrelation zwischen lateraler und vertikaler Ätzrate eines Materials definiert:

$$f = 1 - \frac{\epsilon_l}{\epsilon_v}. \quad (2.24)$$

Somit ergibt sich für eine homogene Ätzrate eines Materials in jede Raumrichtung, also $\epsilon_l = 1$ und $\epsilon_v = 1$ eine Isotropie von $f = 0$. Dies wird auch als isotrope Strukturierung interpretiert, was sich insbesondere bei nasschemischen Prozessen ergeben kann und zum Beispiel für eine Unterätzung beziehungsweise Freistellung von Sensorstrukturen eignet, wie in Abbildung 2.18 gezeigt. Weiterhin gibt es auch eine ideale anisotrope Strukturierung, wenn $f = 1$, also somit die laterale Ätzrate eines Materials vollständig abnimmt beziehungsweise es sich eine genaue Ätzrichtung ergibt, so wie in Abbildung 2.16. In diesem Fall werden maskierte Strukturen abbildungstreu übertragen, ergo lassen sich auch sub-100 nm Geometrien erstellen, wobei ein Faktor von 1 in der Realität nicht erreicht wird und somit immer ein Offset bleibt, welcher es in einem Prozessablauf zu bestimmen gilt. Weiterhin bedarf es bereits einer Berücksichtigung bei der Erstellung von Ätzmasken. Typischerweise sind trockenchemische Ätzverfahren für eine hohe Anisotropie in der Strukturierung notwendig. Für nanoskalige Sensoren ist ein solches Verfahren unabdingbar. [61, S.103] [58]

Eine Unterscheidung verschiedener Ätzraten von gleichzeitig strukturierten Schichten wird durch die Selektivität von Ätzraten zweier Materialien gegeben. Diese ist mit

$$S = \frac{\text{Ätzrate Material 1}}{\text{Ätzrate Material 2}} \quad (2.25)$$

definiert und ein weiterer Prozessparameter. Charakteristisch ist ein nasschemisches Ätzverfahren häufig wesentlich selektiver als ein trockenchemisches Ätzverfahren. Weitere Anwendungen dieser Prozessparameter werden im Folgenden gezeigt. [58]

2.4.2 Grundlegende Verfahren zur Prozessierung von mikromechanischen Fluss- und Drucksensoren

Grundsätzlich gibt es verschiedene Verfahren und Prozesse der Mikrostrukturtechnik, um mikro- und nanoskalige Sensoren zu realisieren. Halbleitertechnologieprozesse zur Realisierung solcher Strukturen und Bauelemente beinhalten verschiedene physikalische und chemikalische Depositions- und Ätzverfahren.

Tab. 2.5: Vergleich physikalische Depositionsverfahren der Mikrostrukturtechnik.

Bezeichnung	Schichtqualität	Anwendungsbereiche	technischer Aufwand
MBE ¹²	sehr hoch (Atomlage)	Hetero- oder homogener Schichten	sehr hoch
Aufdampfungsprozesse	gering ¹³	Kontaktflächen	mittel
Kathodenzerstäuben	hoch	Metallisierung	hoch

Bei den Depositionsverfahren sind Physical Vapour Deposition Verfahren unter anderem Prozessschritte wie Kathodenzerstäubung¹⁴, Aufdampfen und Molecular Beam Epitaxy (MBE). Hauptsächlich chemikalische Prozesse, also Chemical Vapour Deposition (CVD)-Verfahren mit Prozessen wie

- Atmospheric Pressure Chemical Vapour Deposition (APCVD),
- Low Pressure Chemical Vapour Deposition (LPCVD) und
- Plasma Enhanced Chemical Vapour Deposition (PECVD).

Diese sind jeweils unter anderem abhängig von den jeweiligen Umgebungsbedingungen, wie insbesondere der Druckverhältnisse und einer Plasmaunterstützung bei dem PECVD-Verfahren. Auch gibt es bei den chemischen Depositionsverfahren noch die Atomic Layer Deposition und die Silizium-Gasphasenepitaxie. [58, S. 123 ff.]

Jedes Verfahren hat bestimmte Vor- und Nachteile und kommt bei unterschiedlichen Prozessanforderungen zum Einsatz. So kann ein LPCVD- und ein PECVD-Verfahren genutzt werden, um Passivierungsschichten zu erzeugen. Diese können die Oberfläche einer mikroelektronischen Schaltung vor äußeren Einflüssen mechanisch schützen. So lässt sich ein Flusssensor passivieren, wobei eine ausreichende Sensitivität weiterhin gegeben sein muss, um eine zuverlässige Messung zu gewährleisten.

Eine Übersicht der verschiedenen Depositionsverfahren mit Beschreibung von jeweiligen Anwendungsbereichen sowie den technischen Aufwänden, ist in Tabelle 2.5 gezeigt. Hierbei wird deutlich, dass speziell für eine Metallisierungsschicht ein Aufdampfprozess oder ein Kathodenzerstäuben zielführend ist. Diese Prozesse werden im Rahmen dieser Arbeit im Sinne einer Parametervariation in Abschnitt 5.2.7 untersucht.

Neben Schichterzeugung ist auch ein definierter Schichtabtrag relevant. Da bei mikro- bis na-

⁸MBE =Molecular Beam Epitaxy

⁹ca. 0,1 eV

¹⁴Auch als Sputtern bezeichnet.

noskaligen Strukturen ein konventioneller Schichtabtrag mittels makroskopischen Verfahren nicht möglich ist, kommen hierbei verschiedene Ätzprozesse zum Einsatz. Diese ermöglichen eine kontrollierte Strukturierung von Schichten mit einer hohen Selektivität von Ätzraten zweier Materialien.

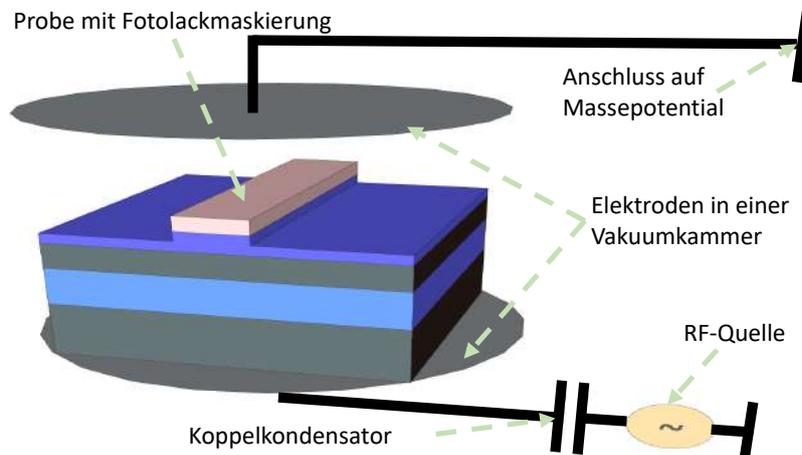


Abb. 2.19: Darstellung eines RIE-Prozesses, zur trockenchemischen und anisotropen Strukturierung von Schichten.

Tabelle 2.6 zeigt analog Ätzprozesse der Halbleitertechnologie mit verschiedenen Parametern. Diese kommen je nach Art und Eigenschaft der jeweiligen Anforderung und Material zum Einsatz. Vor einer Strukturierung wird dabei in der Regel ein Lithografieschritt benötigt, um eine passende Maskierung zu erzeugen. Dabei kommt in dieser Arbeit unter anderem eine Elektronenstrahlolithographie zum Einsatz.

In der Regel wird bei allen MEMS in das vorhandene Substrat oder eine abgeschiedene Opferschichten geätzt. Die Erzeugung der Sensorelemente erfolgt dann ebenfalls durch Abscheidung und Strukturierung weiterer Schichten. Dabei werden Methoden genutzt, welche reproduzierbar sind und präzise Strukturen im sub-Mikrometerbereich erzeugen, wie zum Beispiel ein trockenchemisches Ätzverfahren, wie das Reactive Ion Etching (RIE). Die prinzipielle Funktionsweise ist in Abbildung 2.19 dargestellt. Weiterhin werden Lithografieprozesse für eine Vorbereitung zur chemischen Strukturierung benötigt. Eine Methode wird im nächsten Abschnitt beschrieben.

Tab. 2.6: Übersicht von Strukturierungsprozesse der MST.

Bezeichnung	Kontrolle der Äztiefe	Selektivität	Anisotropie
Nasschemische Prozesse	Prozesszeit	sehr hoch	Isotrop ¹⁵
PE ¹⁶	Materialselektivität	hoch, aufgrund chemischer Reaktionen	
Ionenstrahlätzen	Prozesszeit	sehr gering, da rein physikalischer Prozess	über Prozessdruck einstellbar
RIE ¹⁷	Ätzstopps im Material	geringer wegen physikalischer Prozesse	hoch, abhängig von Prozessparametern
DRIE ¹⁸	Ätzstopps im Material	geringer wegen physikalischer Prozesse	sehr hoch, aufgrund Seitenpassivierung

Elektronenstrahlithographie

Die Elektronenstrahlithographie (ESL) kann mittels eines Elektronenstrahls Strukturen mit sub-100 nm Abmessungen erzeugen. Sie wird überwiegend im experimentellen Bereich eingesetzt, denn sie eignet sich, aufgrund der seriellen Belichtung und damit einhergehenden erhöhten Prozessdauer, nicht für eine Massenproduktion. [62]

Im Vergleich dazu erreichen konventionelle, optische Lithografieprozesse nur mit speziellen Erweiterungen sub-100 nm Strukturen, da diese durch die Wellenlänge (λ) der jeweiligen Lichtquelle limitiert sind. Bei erweiterten Verfahren mit aufwendigen Quellen wie EUV¹⁹ werden jedoch auch optische Verfahren, insbesondere bei der Massenfertigung genutzt. Dennoch eignen sich diese Verfahren für eine Serienproduktion und bieten eine Möglichkeit, solche nanoskaligen Sensorstrukturen serientauglich zu fertigen. Um einen solchen Transfer zu ermöglichen bedarf es allerdings weiterer Prozessanpassungen.

Folgender Prozess wird bei einer ESL grundlegend verwendet:

¹¹ Außer bei speziellen Gitterstrukturen in Siliziumatomen.

¹² PE = Plasma Etching

¹³ RIE = Reactive Ion Etching

¹⁴ DRIE = Deep Reactive Ion Etching

¹⁹ Extreme-Ultra-Violett [63]

1. Probenreinigung und Vorbereitung für den Prozess zur Lackschichtauftragung.
2. Lackschichtenauftragung, wie in Abschnitt 5.2.5 beschrieben.
3. Probenvorbereitung für den ESL-Prozess vor Einbau in die Vakuumkammer:
 - a) Makroskopische Markierung der Einbaurichtung einer Probe, zum Beispiel mechanisch durch eine Einkerbung.
 - b) Dispensierung von 20nm großen Fokussierkugeln auf die Probe mittels Pipette.
4. Belüftung der Vakuumkammer einer ESL-Anlage.
5. Probenhalter aus der Vakuumkammer bei Atmosphärendruck entnehmen und Probe auf diesem fixieren.
6. Diesen wiederum in die Vakuumkammer einbauen und erneut ein Hochvakuum erzeugen.
7. Fokussieren und Justieren der Probe, in Abschnitt 5.2.4.
8. Bestimmung des Strahlstroms und Einstellen der Belichtungsdosis, gezeigt in Abschnitt 5.2.4.
9. Erneutes Feinfokussieren.
10. Globale Koordinaten justieren.
11. Write Field (WF)-Alignment, um ein Stitching der WF zu ermöglichen.
12. Einladen der Maskendaten mit Definition der aktuellen Ebene²⁰.
13. Starten des Belichtungsprozesses, welcher abhängig von der Strukturgröße und der gewählten Prozessparameter zwischen einigen Minuten und mehreren Stunden dauert.
14. Nach Ablauf des Belichtungsprozesses: Kontrolle der Parameter über eine erzeugte Log-Datei.
15. Belüften der Kammer und Ausbauen der Probe.
16. Entwickeln und Ausheizen der Probe (Abschnitt 5.2.5) mit anschließender optischer Kontrolle.

Das Auftragen der Lackschicht wird in Unterpunkt 5.2.5 detailliert erläutert. Dieser Prozessschritt beinhaltet unter anderem ein definiertes Aufschleudern des Lackes, welcher mit einer entsprechenden Lackschichtdicke korreliert.

Das Fokussieren dient dazu, einen Elektronenstrahl zu bündeln, um die kleinen Strukturen auflösen zu können. Die 20nm großen Fokussierkugeln helfen dabei. Ein Justieren ist be-

²⁰engl. Layer

sonders notwendig, wenn mehrere Masken übereinander geschrieben werden. Dazu sind die Justiermarkern, wie in Abschnitt 5.2.4, vorgesehen. Die Bestimmung des Strahlstroms und das Einstellen der Belichtungsdosis sind notwendig, um eine Entwicklung der Strukturen zu gewährleisten. Das WF-Alignment sorgt für eine genaue Aneinanderreihung der WFs²¹. Dabei ist zu beachten, dass die in dieser Arbeit verwendeten Masken, insbesondere bei der Metallisierungsebene, eine besonders genaue Justierung bedingen. Dies ist gegeben durch die Verteilung der Strukturen innerhalb der WFs.

Die Entwicklung und das Ausheizen sind in Kapitel 5.2.1 dargestellt und sorgen für eine partielle Ablösung von Lackschichten, welche Flächen öffnen, die später strukturiert werden sollen. Der Ausheizschritt sorgt für eine erhöhte Resistenz des Fotolacks gegenüber der anschließenden Ätzprozesse.

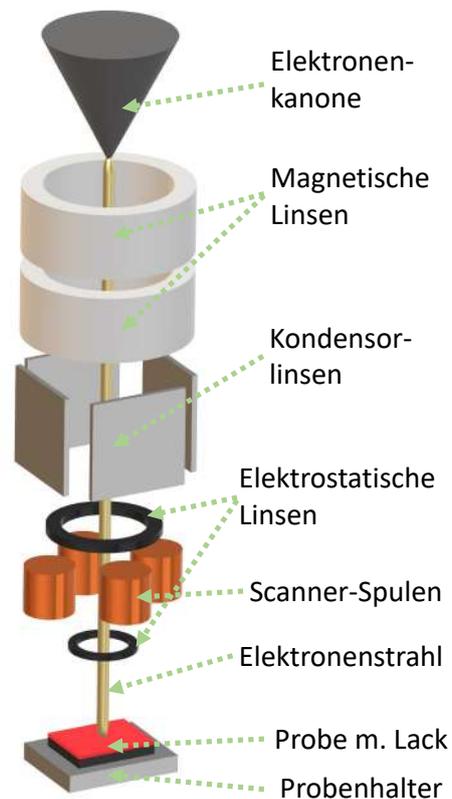


Abb. 2.20: Prinzipieller Aufbau Elektronenstrahl-Lithographie-Anlage. [58]

Um die grundlegende Technologie eines Elektronenstrahlschreibers darzustellen, ist der prinzipielle Aufbau in Abbildung 2.20 gezeigt.

Die Besonderheit bei dieser Lithografiemethode ist die sehr geringe Linienbreite des Elek-

²¹ engl. *stiching*

tronenstrahls, welche durch die Fokussierblende in der Abbildung 2.20 bedingt wird. Diese ermöglicht sehr kleine Strukturgrößen und sehr hohe Auflösungen. [62]

Außerdem wird der Probenstisch (mittels eines Interferometers) in x-y-Richtung verschoben und es sind keine optischen Masken mehr erforderlich²². Somit können beliebige Strukturen und Masken kostengünstig und schnell via Software erstellt werden. Damit ein Schreibvorgang von komplexen Strukturen möglich ist, muss außerdem eine Blende für den Elektronenstrahl integriert sein. Somit kann ein Ausblenden von diesem²³ während des Schreibvorgangs erfolgen. [64, S. 234 ff.]

Die Masken werden in dieser Arbeit mit dem Softwaretool *KLayout* erstellt. In Abschnitt 5.2.4 ist beschrieben, wie die Masken aufgebaut sind. Bei Prozessen mit mehreren Masken sind außerdem Justiermarker notwendig, welche ebenda beschrieben sind.

2.4.3 Verwendete Mess- und Analyseverfahren zur Prozessentwicklung

Nachfolgend werden verschiedene Analyseverfahren beschrieben, welche eine Prozesskontrolle ermöglichen. Insbesondere wird unterschieden zwischen destruktiven und nicht-destruktiven Verfahren. Letztere gewährleisten eine weitere Nutzung der zu analysierenden Probe. Alternativ wird eine gesonderte Probe zur Prozessbegleitung benötigt.

Tab. 2.7: Analyseverfahren in der Halbleitertechnologie zur Schichtdickenvermessung.

Bezeichnung	Destruktiv?	Vorteile	Nachteile
Ellipsometrie	Nein	sehr hohe Genauigkeit (bis zu 0,1 μm)	Abhängig von Modellgenauigkeit (optische Parameter), für transparente Schichten
Oberflächenprofilometrie	Ja	hohe Genauigkeit (bis zu 1 μm)	Destruktiv, benötigt eine Messkante
Querschnittsbetrachtung REM	Ja	hohe Genauigkeit (bis zu 1 μm), insbesondere für metallische Schichten geeignet	Destruktiv, benötigt eine Messkante

Dementsprechend werden bei destruktiven Messverfahren Proben vorgehalten, welche nicht

²²Wie eine Chrome on Glas (COG)-Maske bei der optischen Lithografie.

²³engl. *beam blanking*

für eine endgültige Prototypenherstellung vorgesehen sind. Diese Proben werden nach der destruktiven Messung nicht weiter genutzt. Alternativ sind auf einzelnen Proben Teststrukturen, um die eigentlichen Sensorstrukturen für eine weitere Prozessführung zu schützen.

In der Tabelle 2.7 ist eine Übersicht von verschiedenen Verfahren gegeben, welche im Rahmen dieser Arbeit genutzt werden. Abhängig von den jeweiligen Prozessschritten kommen unterschiedliche Verfahren zur Anwendung. So bietet sich zum Beispiel bei der Erzeugung einer thermischen Oxidschicht zur Reduzierung einer obersten Siliziumschicht eine Ellipsometrie an, welche - da nicht destruktiv - auch prozessbegleitend für jede Probe durchgeführt wird. Um die Messergebnisse der Ellipsometrie zu verifizieren, wird zusätzlich auch eine Querschnittbetrachtung im Raster Elektronen Mikroskop (REM) durchgeführt. Diese wird allerdings mit einer separaten Probe vollzogen, denn diese muss zerteilt werden und bietet sich nicht für eine weitere Verarbeitung an. Für eine Oberflächenprofilometrie sind in der Regel Teststrukturen in Form von physischen Messstufen erforderlich. [65] Insbesondere bei Fotolackstrukturen wird dieses Messverfahren angewendet, da eine Teststufe durch einen simplen Prozess erzeugt wird. Dadurch wird die Lackschichtdicke analysiert und somit ein Lithografieprozessschritt abgesichert. Weiterhin erfolgt eine Absicherung beziehungsweise Entwicklung einer Lackschichtdicke mittels Ellipsometrie. Dabei erfolgt dieses wiederum prozessbegleitend bei sämtlichen Proben, um eine Prozessstabilität zu gewährleisten. In dem nachfolgenden Abschnitt ist das Verfahren erläutert.

Schichtdickenmessung mittels Ellipsometrie und Oberflächenprofilometrie

Wie bereits erwähnt kommen im Rahmen dieser Arbeit zur Analyse und Verifikation von Schichtdicken eine Ellipsometrie und eine Oberflächenprofilometrie zum Einsatz. Bei der Ellipsometrie wird diese über eine nicht-destruktive, optische Messung und mit passenden Computermodellen ermittelt [66].

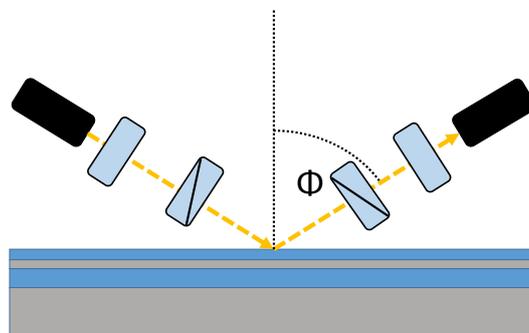


Abb. 2.21: Prinzipdarstellung eines Ellipsometer-Messsystems.

Hierbei wird eine Lichtquelle unter mehreren definierten Winkeln auf die Probe gestrahlt und die Polarisationszustandsänderung des Lichtes ρ nach Reflexion auf der Probenoberfläche mittels

$$\rho = \frac{r_p}{r_s} = \tan\Psi e^{i(\Delta_p - \Delta_s)} = \tan\Psi e^{i\Delta} \quad (2.26)$$

ausgewertet, wie in Abbildung 2.21 skizziert. Dabei ist r_s der Reflexionskoeffizient senkrecht und r_p dementsprechend der Koeffizient parallel zur Einfallsebene des Lichtes. Der Faktor Δ entspricht der Phasendifferenz zwischen den s- und p-polarisierten Wellen und $\tan\Psi$ bildet den Betrag von ρ ab.

Somit wird die Polarisationsänderung in Abhängigkeit der verschiedenen Einfallswinkel durch Messung der ellipsometrischen Winkel Δ und Ψ bestimmt. Passende Schichtenmodelle liefern dann Brechungsindizes und Schichtdicken der vermessenden Probe. Insgesamt entsteht bei dieser Messung ein Messfehler in Abhängigkeit der Genauigkeit eines theoretischen Modells. Diesen gilt es bei den Versuchen zu berücksichtigen. [67]

Alternativ lässt sich die Schichtdicke auch mit destruktiven Verfahren prüfen, wobei sich hier eine Oberflächenprofilometrie anbietet. Diese bietet den Vorteil, dass es hierbei keiner Computermethode bedarf, sondern eine direkte, physikalische Messung mit einer Messnadel erfolgt. Da ein Kontakt zur Oberfläche der Probe entsteht, wird diese an den Messpunkten lokal beschädigt. Deswegen wird diese Messmethode in der Regel nur für Testproben angewendet, welche keine weitere Verwendung beinhalten. Alternativ werden zusätzliche Teststrukturen auf die Proben gebracht, welche keine Funktion in dem finalen Bauteil haben. Bei der Prozessentwicklung von Prototypen eines Fluss- und Absolutdrucksensors, kommt diese Methode insbesondere bei der Bestimmung von Lackschichtdicken zum Einsatz, wie in Abschnitt 5.2.5 gezeigt. Eine Genauigkeit von wenigen Nanometern ist hier deutlich ausreichend.

REM und Lichtmikroskopie zur Schichtdicken und Oberflächenanalyse

Weitere Messverfahren zur Schichtdickenmessung bieten die Lichtmikroskopie und ein Raster Elektronen Mikroskop. Wobei die Lichtmikroskopie aufgrund der Wellenlänge des Lichtes nur für Strukturen größer 200 nm geeignet sind, wie das Abbe-Kriterium mit

$$d = \frac{\lambda}{2n \cdot \sin\alpha} \quad (2.27)$$

beschreibt. Dabei sind folgende Parameter gegeben: Die Wellenlänge (λ) der Lichtquelle, der Brechungsindex (n) und ein halber Öffnungswinkel (α), welche nach 2.27 zusammen

die Strukturauflösung (d) ergeben. Somit ist eine Schichtdickenmessung von sub-100 nm-Schichten nicht möglich. Weiterhin ist eine spezielle Probenpräparation notwendig, sofern eine Schichtdicke gemessen werden soll. Dazu bedarf es, zur Entfernung von Partikeln, einer Querschleifherstellung mittels Diamantdrahtsäge und anschließender Reinigung. Die zu analysierende Probe wird anschließend entweder in ein Epoxydharz eingebettet oder in einen Probenhalter gespannt, um eine möglichst gute Orthogonalität zu erhalten. Geringe Verkippen führen hierbei zu Messfehlern. [66]

Ähnlich verhält es sich mit einem Raster Elektronen Mikroskop, wobei hier ein Probenhalter zu bevorzugen ist, da es sich um einzelne Proben handelt. Dieses Verfahren kann prinzipiell Auflösungen bis zu einem Elektron leisten und wird sofern bevorzugt eingesetzt, wenn eine Analyse von sub-1 μm -Schichten durchgeführt wird. Dafür sind grundsätzlich metallisierte Flächen notwendig, denn diese führen zu einer Reflexion der von einem Filament emittierten Elektronen. Über Detektoren werden diese aufgenommen und je nach Intensität der Energie erfolgt über Software eine Bildgebung. Da verschiedene Schichten dabei unterschiedliche Reflexionen beziehungsweise Transmissionen ermöglichen, können diese unterschieden werden. Die Schichtdickenmessung erfolgt dann graphisch via Softwarevermessung. Die maximale Vergrößerung bei dem hier verwendeten REM beträgt 500000-fach und reicht somit aus, die bis zu 100 nm dünnen Schichten zu analysieren. Somit kann nach einem Abscheide- oder Strukturierungsprozess eine Aussage über Auftrags- oder Ätzrate getroffen und der Prozess hinsichtlich dieser angepasst werden.

Ein REM beinhaltet eine Vakuumkammer, welche ein notwendiges Vakuum erzeugt, sodass eine ausreichende mittlere freie Weglänge entsteht, in der ein Elektronenstrahl fokussiert werden kann. Die Messgenauigkeit ist vom Anwender abhängig, was Messfehler ermöglicht. [68]

Beide Verfahren eignen sich auch für Strukturanalysen auf der Oberfläche von Proben. Hierbei ist wiederum die Auflösung, wie oben beschrieben, ähnlich begrenzt. Allerdings bietet die Lichtmikroskopie hier weitere Vorteile, da durch die geringen Schichtdicken auch eine (Semi)-Transparenz einzelner Schichten möglich ist. Somit sind bisweilen unterätzte Strukturen sichtbar. Dieser Vorteil bietet sich an, wenn isotrope Ätzverfahren zur Entfernung von Opferschichten genutzt werden. Somit lässt sich auch eine Aussage zu der lateralen Ätzrate treffen, was wiederum zur weiteren Prozessanpassung genutzt wird. Die Lichtmikroskopie bietet auch die Möglichkeit für eine schnelle Analyse von Partikelresten und somit zur Kontrolle der Sauberkeit einer Probe. Diese Verfahren sind grundlegend auch mit dem REM möglich, bedingen jedoch wieder längere Prozesszeiten aufgrund der oben erwähnten Anforderungen an das Verfahren.

Ein Konzept zu diesem System wird in dem kommenden Abschnitt vorgestellt und in den danach folgenden wird ein passendes Simulationsmodell sowie eine Prozessentwicklung

veranschaulicht. Dabei kommen die hier vorgestellten Analyseverfahren zum Einsatz und ermöglichen eine Entwicklung des hier dargestellten Sensorsystems. Zunächst wird ein analytisches Modell vorgestellt.

3 Konzept eines integrierten Sensorsystems

In diesem Kapitel wird das Modell eines Sensorsystems zur simultanen Messung von Durchfluss und Druck vorgestellt. Primär wird hierbei das Konzept für einen thermischen Flussensor dargestellt und nachfolgend untersucht. Das Modell für einen, auf Silicon-on-Insulator Substrat realisierten, Absolutdrucksensors wird als weitere Option zur Integration eines Sensorsystems beschrieben. Letzteres wird hier sekundär betrachtet. Weiterhin ist dieses bereits ausführlich in vorherigen Arbeiten und Veröffentlichungen vorgestellt [20].

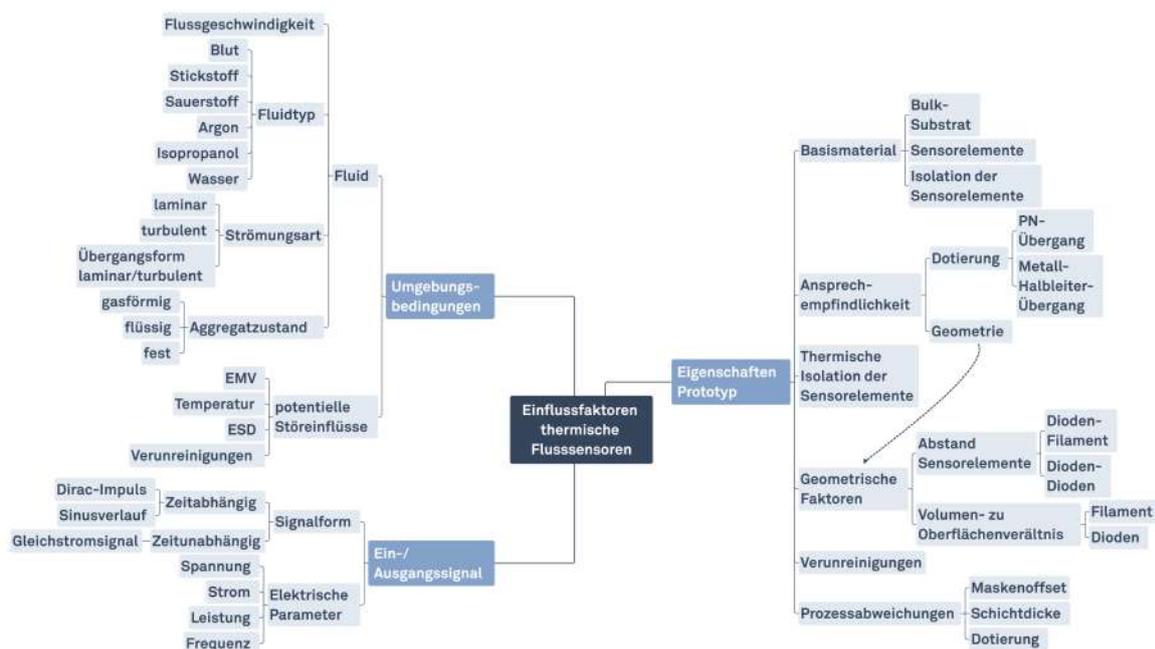


Abb. 3.1: Zusammenfassung von Einflussparametern auf das Sensorsystem.

Zunächst wird dazu ein Überblick über das gesamte Sensorsystem gegeben und dann folgt eine Beschreibung der einzelnen Sensoren, beginnend mit dem Durchflusssensor in Abschnitt 3.1 und gefolgt von dem Absolutdrucksensor in Abschnitt 3.2. Dazu werden von jedem

Sensortypen zunächst die hauptsächlichen Funktionsweisen und darauffolgend Teilfunktionen in Detailbetrachtung beschrieben.

Bevor das Konzept des eigentlichen Sensorsystems präsentiert wird, erfolgt eine Zusammenfassung der relevanten Einflussgrößen auf ein solches, wie auch in Abbildung 3.1 gezeigt. Davon lassen sich eine Versuchsplanung und Schlüsselparameter für eine numerische Simulation ableiten. Einige Parameter, insbesondere bezogen auf Material und Geometrie, sind innerhalb der Prozessentwicklung relevant. Dies wird in Kapitel 5.1 evident. Umgebungseinflüsse sind für die Charakterisierung eines Gesamtsystems variierbar. Eine Beschreibung dieser erfolgt in Kapitel 6.

Das in dieser Arbeit betrachtete Sensorsystem ist für eine simultane Messung eines Absolutdrucks und einer Fluidgeschwindigkeit eines umgebenen Mediums vorgesehen [22, 21]. Dazu erfolgt eine Untersuchung hinsichtlich thermischer Flusssensormessprinzipien.

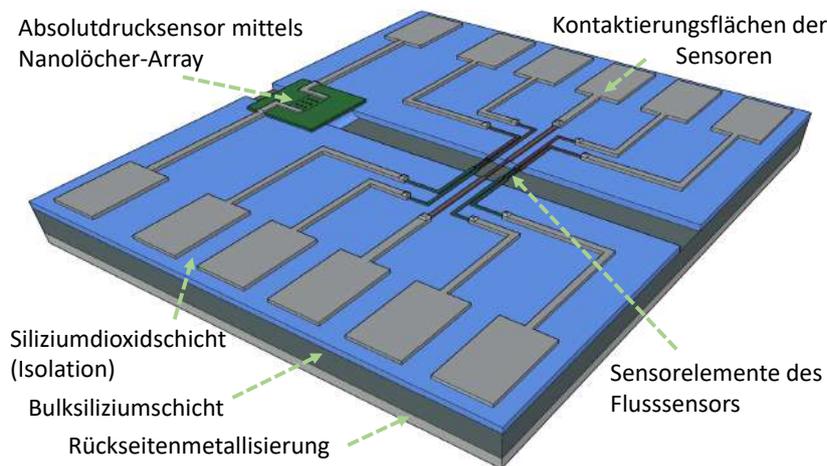


Abb. 3.2: Darstellung eines Konzeptes für ein neuartigen Sensorsystems, bestehend aus thermisch basierenden Fluss- und Absolutdrucksensor.

Beide Sensoren basieren auf unterschiedlichen Mess- und Prozessierungsverfahren, welche aber in einem technologischem Herstellungsprozess Synergien aufweisen. Deswegen lassen sich diverse Prozessschritte zusammenfassen und teilweise substituieren. Dies erhöht die Effektivität bei der Entwicklung von Prototypen, der allgemeinen Prozessfähigkeit eines Gesamtsystems und verbessert die Integration einzelner Sensoren. Eine schematische Darstellung eines Konzeptes für das Sensorsystem ist in der Abbildung 3.2 veranschaulicht.

Wie in der Skizze ersichtlich sind beide Sensoren auf einem SOI-Substrat integriert und teilen die selben funktionalen Schichten. Dabei dient eine SiO_2 -Schicht des SOI-Substrats bei dem Flusssensor als elektrischer und thermischer Isolator. Bei einem integrierten Absolutdrucksensor dient diese Schicht als Opferschicht, welche durch ein Nanolöcher-Array, in der darüber befindlichen Siliziumschicht, entfernt wird. Durch einen nasschemischen, auf Flusssäure

basierenden, Ätzprozess bildet sich hierbei eine großflächige Kavität unterhalb der darüber liegenden Siliziumschicht. Nach einem Verschließen mit verschiedenen Methoden [20, 22, 69] lässt sich dementsprechend ein abgeschlossenes Volumen erzeugen, welches für eine Druckmessung genutzt wird. Eine Auswertung erfolgt über mehrere Verfahren, in Abschnitt 3.2 ist ein Konzept mittels eines Pseudo-MOSFET vorgestellt. Dabei wird eine rückseitige Metallisierungsschicht für den Gate-Anschluss erzeugt.

Ein Prinzip eines thermischen Flusssensors ist parallel zu dem Absolutdrucksensor skizziert. Dabei werden nanoskalige Stege als Filament und Dioden für die Flussgeschwindigkeitsdetektion genutzt. Wie erwähnt, dient die darunter liegende Siliziumdioxid-Schicht als thermischer und elektrischer Isolator. Diese lässt sich zusätzlich als definierter Flusskanal nutzen [70, 25]. Schließlich sind noch die Aluminiumkontaktflächen zu strukturieren, welche für eine nachfolgende elektrische Charakterisierung sowie Aufbau- und Verbindungstechnik mittels Bondtechnologien notwendig sind. Sie bilden die oberste Schicht ab.

Eine detaillierte Beschreibung der beiden Sensoren beziehungsweise Sensorprinzipien erfolgt in den nachfolgenden Unterpunkten [24].

3.1 Grundlegende Funktionsweise eines thermischen Flusssensors

Wie in Abschnitt 2.2.2 gezeigt gibt es unterschiedliche Messprinzipien für Flusssensoren. Im Rahmen dieser Arbeit werden grundlegend eine thermische Anemometrie und ein TToF-Verfahren betrachtet. Der Fokus liegt dabei auf der Realisierung von nanoskaligen Strukturen und experimentelle Untersuchungen hinsichtlich der Funktionalität beider Messprinzipien.

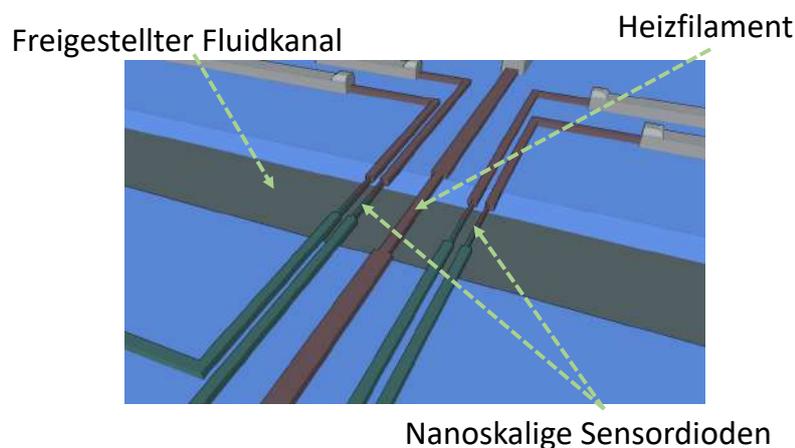


Abb. 3.3: Konzept zur Untersuchung von thermischen Durchflusssensoren.

Dabei basiert das TToF-Messprinzip grundlegend auf einer Laufzeitmessung von Hitze­paketen mit einer definierten Temperatur in Kelvin (T_K). Diese werden elektrisch, durch die Erwärmung eines Filaments, mittels Verlustleistung erzeugt - vgl. Abschnitt 3.1 - und durch ein umgebenes gasförmiges oder flüssiges Medium in Flussrichtung weitertransportiert. Bei dem Transport durch einen definierten Flusskanal passieren diese Hitze­pakete zwei pn-Dioden, welche als Temperatursensoren genutzt werden, wie in Abbildung 3.3 gezeigt. Diese detektieren eine Temperaturdifferenz über eine Änderung ihres Arbeitspunktes bei konstant eingepprägtem Strom. Dies folgt aus der Temperaturabhängigkeit von Siliziumdioden. Werden die jeweils detektierten Temperaturimpulse zeitlich erfasst, ergibt sich aus der Differenz des ersten Detektionszeitpunktes t_1 und des zweiten t_2 und deren örtlichen Abstand zueinander ($x_1 - x_2$) die mittlere Strömungsgeschwindigkeit v_A in $[m/s]$ beschrieben durch

$$v_A = \frac{x_1 - x_2}{t_1 - t_2} = \frac{\Delta x}{\Delta t}. \quad (3.1)$$

Diese Darstellung zeigt den generellen Zusammenhang. Insbesondere Wärmediffusion und Wärmeradiation werden hierbei vernachlässigt.

Die thermische Anemometrie basiert hierbei auf einem konstanten Signal am Filament. Dieses erzeugt eine dauerhafte Erwärmung und diese bedingt, abhängig vom umgebenen Medium, eine Temperaturerhöhung an den Sensorelementen.

Eine umfassende modellhafte Beschreibung von auftretenden Phänomenen im Fluidkanal eines hier vorgestellten thermischen Flusssensors wird in den folgenden Abschnitten gezeigt.

Erzeugung und Transport einer Wärmemenge in einem Fluid

Um eine definierte Wärmemenge für den Weitertransport im Kanal zu erzeugen, wird ein Stromimpuls auf ein Silizium-Filament gegeben. Dadurch wird die elektrische Energie des Stromimpulses in thermische Energie umgewandelt. Das Resultat einer elektrischen Wärme­erzeugung mit einer eingepprägten Leistung in einen ohmschen Widerstand wird als Joule'sche Wärme bezeichnet.

Dabei gilt grundlegend die Energieerhaltung mit:

$$P_{el} = P_{th} = \frac{\Delta Q}{\Delta t}, \quad (3.2)$$

wobei gilt, dass sämtliche elektrische Leistung (P_{El}) in thermische Leistung (P_{Th}) umgesetzt wird. [71, S. 3 ff.]

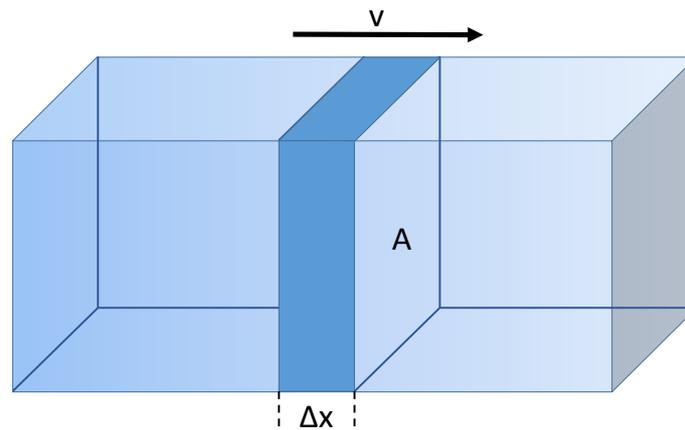


Abb. 3.4: Skizze zur Berechnung einer thermischen Signalausbreitung.

Für die analytische Berechnung von thermischen Signalen wird zunächst ein Volumenelement mit

$$\Delta V = A \cdot \Delta x, \quad (3.3)$$

angenommen. Also eine definierte Fläche A über eine Strecke Δx , wie in Abbildung 3.4 gezeigt. Wird nun eine Massendifferenz in einem Volumenelement mit

$$\Delta m = \rho \cdot \Delta V \quad (3.4)$$

definiert. Kann in der Gleichung für eine Wärmeabgabe über eine Zeit,

$$\Delta Q = c \cdot \Delta m \cdot \Delta T, \quad (3.5)$$

die Massendifferenz substituiert werden und es ergibt sich stattdessen eine Abhängigkeit von den geometrischen Parametern Fläche und Strecke sowie der Dichte:

$$\Delta Q = c \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \Delta T. \quad (3.6)$$

Wie in Gleichung 3.2 definiert, kann die Wärmeabgabe mit $\Delta t \cdot P$ ersetzt und in Gleichung 3.6 überführt werden. Somit ergibt sich

$$P \cdot \Delta t = c \cdot \rho \cdot A \cdot \Delta x \cdot \Delta T, \quad (3.7)$$

also ein direkter Zusammenhang zwischen der eingepprägten beziehungsweise abgeföhrten Leistung und einer resultierenden Temperaturdifferenz. Umgestellt nach ΔT ergibt sich:

$$\Delta T = \frac{P}{c \cdot \rho \cdot A \cdot v}. \quad (3.8)$$

Hierbei ergibt sich beispielsweise bei einem Kubikmillimeter Wassermenge und einer Energie von $E = 1 \cdot 10^{-9} \text{ J}$ eine Temperaturerhöhung von $4 \cdot 10^{-6} \text{ K}$. Diese Abschätzung verdeutlicht die zu erwartende Temperaturdifferenz. Bei kleineren Volumina werden analog höhere Werte erreicht. [71, S. 141 ff.]

Funktion eines Heizfilaments in Silizium

Das Heizfilament ist so entworfen, dass es quer durch den Fluidkanal des Sensors verläuft und außerhalb des Kanals über Aluminiumleiterbahnen verbunden ist. ber diese Leiterbahnen mit abschließenden Kontaktpads wird ein Stromimpuls induziert. Eine Querschnittverengung des Silizium-Filaments in dem Kanalbereich erzeugt einen Anstieg des Filamentwiderstand mit

$$R_{Fil} = \frac{l_{Fil}}{\sigma \cdot A_{Fil}} \quad (3.9)$$

beschrieben durch Filamentlange (l_{Fil}) und Filamentquerschnitt (A_{Fil}), sowie die spezifische elektrische Leitfähigkeit (σ) des Halbleiters. Letztere wird durch dessen Dotierung gemäß

$$\sigma = q \cdot (n \cdot \mu_n + p \cdot \mu_p) \quad (3.10)$$

eingestellt. Dabei beschreibt μ_n die Elektronenbeweglichkeit und μ_p die Beweglichkeit der Löcher im Silizium. Die dazugehörigen Ladungsträgerdichten werden über n und p angegeben. Ein Temperaturanstieg folgt somit einem Stromimpuls im Filament und erzeugt ein Hitzepaket. [72, S. 18 ff.]

Temperaturmodell der mikro- bis nanoskaligen Siliziumdioden

Zur Detektion der Hitzepakte ist eine hohe thermische Ansprechempfindlichkeit der Si-Dioden relevant. Diese kann insbesondere durch die Dotierung und der gewählten Dimensionierung²⁴ eingestellt werden. Das Strom-Spannungsverhalten einer Diode in Flussrichtung ist

²⁴Hier: Oberfläche-zu-Volumen-Verhältnis.

mathematisch durch die Shockley-Gleichung

$$I_D(U_F, T) = I_S(T) \left(e^{\frac{U_F}{U_T(T)}} - 1 \right) \quad (3.11)$$

mit I_D als Strom durch die Diode, U_F als angelegte äußere Spannung in Flussrichtung, T_C als Temperatur im Halbleiter. $I_S(T)$ ist ein temperaturabhängiger Sättigungssperrstrom, beschrieben durch

$$I_S(T) = qA \cdot n_i^2 \left(\frac{D_p}{L_p N_D} + \frac{D_n}{L_n N_A} \right) \quad (3.12)$$

mit der Kontaktfläche A , der Eigenleitungsdichte n_i , den Diffusionslängen der Löcher und Elektronen L_n und L_p und deren Donator- und Akzeptorkonzentrationen N_D und N_A sowie deren Diffusionskonstanten D_p und D_n . Weiterhin ist q als Elementarladung enthalten.

Die Temperaturspannung $U_T(T)$ wird beschrieben mit

$$U_T(T) = \frac{k_B T}{q} = 86,14 \frac{\mu V}{K} \cdot T \quad (3.13)$$

mit $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ V} \cdot \text{A} \cdot \text{s} / \text{K}$ als Boltzmannkonstante.²⁵

Da die Werte der Exponentialfunktion in Gleichung 3.11 stark zunehmen, kann diese zu

$$I_D = I_S(T) \left(e^{\frac{U_F}{kT}} \right) \quad (3.14)$$

angenähert werden. Umgestellt nach der Flussspannung ergibt sich bei einem konstanten Flussstrom

$$U_F = kT \cdot \ln \frac{I}{I_S} \quad (3.15)$$

und Temperaturabhängigkeit der Spannung bei konstantem Strom ergibt sich dann zu

$$\frac{dU_F}{dT} = \frac{-\frac{E_G}{q} + U_F}{T}, \quad (3.16)$$

mit der Bandlücke E_G . Das Verhältnis $\frac{dU_F}{dT}$ liegt in der theoretischen Größenordnung von $-1,5 \frac{mV}{K}$ bis $-2,5 \frac{mV}{K}$. [72, S. 46]

²⁵Anm.: Es gilt approximiert $U_T(T = 300K) = 26 \text{ mV}$.

Thermische Einflüsse der Umgebungs- und Randbedingungen

Neben den bisher primär elektrischen Störeinflüssen, gibt es auch thermische Einflüsse, welche das Sensorsystem und insbesondere den thermischen Flusssensor in seiner Funktionsweise beeinträchtigen. Während Wärmeradiation vernachlässigbar ist, ist insbesondere eine Wärmekonduktion ein signifikanter Effekt, welcher zu parasitären Wärmeflüssen führt [73, S. 61 ff.]. Somit steht im realen Anwendungsfall die Verlustleistung für einen Wärmetransport zur Verfügung, sondern ein wesentlicher Anteil wird über die aus Siliziumdioxid bestehende Isolationsschicht abgeführt. Im Vergleich hat diese eine wesentlich höhere Wärmeleitfähigkeit als die von umgebenden gasförmigen Medien.

Dahingegen sind flüssige Medien wärmeleitfähiger und es ergibt sich somit eine bessere Wärmekonduktion. Sind die Hitzeimpulse an dem Filament des Flusssensors hierbei zeitlich zu langanhaltend, kann es zu einer Minimierung der Hitzespitze führen, da der Temperaturgradient insgesamt geringer wird. Somit wird eine klare Detektion eines Hitzeimpulses ungenauer.

Folgende thermische Wirkmechanismen gilt es dementsprechend zu betrachten:

1. Wärmekonduktion: Wärmeleitung insbesondere in einem Festkörper (hier zum Beispiel das Substrat oder die Sensorelemente)
2. Wärmekonvektion: Wärmefluss in einem beweglichen Medium, wie ein Fluid (beispielsweise das Messmedium innerhalb eines Flusssensors)
3. Wärmeradiation: Wärmestrahlung an Luft oder anderen gasförmigen Medien

Diese Wirkmechanismen werden im Kapitel 4 ebenfalls betrachtet und bei einer Finite-Elemente-Methode-Berechnung als Randbedingung angenommen. [71, S. 3 ff.]

3.2 Konzept eines Absolutdrucksensors mit Nanolochprozessierung

Ein erweitertes Konzept zu einem singulären Flusssensor ist die Integration eines Absolutdrucksensors. Dieser ermöglicht zusätzlich zur Erfassung einer Fluidgeschwindigkeit ebenfalls die Messung eines Drucks p .

Bei dem hier entwickelten und beschriebenen Konzept wird eine monokristalline Siliziumschicht eines SOI-Substrates unterätzt und somit eine Kavität mit darüber frei schwingender Membran erzeugt.

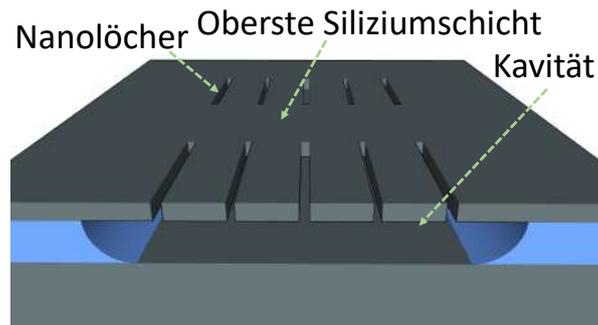


Abb. 3.5: Eine Sensormembran in SOI-Substrat nach einer HF-Unterätzung durch ein Nanolöchern-Array.

Das Prinzip ist bereits in einer Arbeit von R. Poloczek sowie weiteren Veröffentlichungen vorgestellt [20, 22]. Dies wird mittels RIE-strukturierten Nanolöchern und einem anschließenden HF-Ätzschritts realisiert. Durch den nasschemischen Prozess wird das vergrabene Oxid des SOI-Substrates entfernt. Aufgrund der hohen Selektivität zum Silizium wird die darüber liegende Schicht nicht abgetragen, wie in Abbildung 3.5 dargestellt.

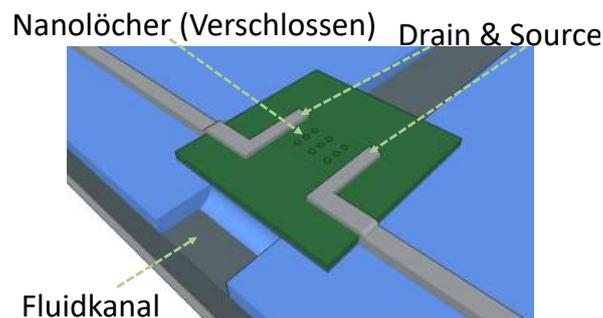


Abb. 3.6: Darstellung eines Absolutdrucksensor mit Pseudo-MOSFET Ausleselement.

Zum Verschluss der nanoskaligen Löcher werden unterschiedliche Verfahren untersucht. Eine Möglichkeit bietet das Verschließen der Löcher mittels eines Wasserstoff-Prozesses, welcher eine Verrundung der Silizium-Kanten hervorruft und somit einen Verschluss ermöglichen soll [74]. Eine weitere Variante ist das Verkapseln mittels verschiedener Abscheideverfahren, wie zum Beispiel eine LPCVD von Siliziumnitrid. Dies führt jedoch zu Verspannungen in der Membran und muss mit geeigneter Prozesskontrolle angepasst werden [75].

Verschiedene Verfahren können hierbei genutzt werden, um im nachfolgenden Prozessablauf eine Ausleselektronik zu integrieren. In einem Beispiel wird auf dem Drucksensor ein sogenannter Pseudo-MOSFET integriert, dessen Drain- und Source-Kontakte sich auf der Oberfläche einer Membran befinden und dessen Gate-Kontakt auf der Rückseite des darunter liegenden Substrats angebracht wird. Da hierbei auf eine Dotierung verzichtet wird, hat dieser

den Zusatz "*Pseudo*" in der Definition. Schematisch dargestellt ist ein dementsprechender Aufbau in Abbildung 3.6.

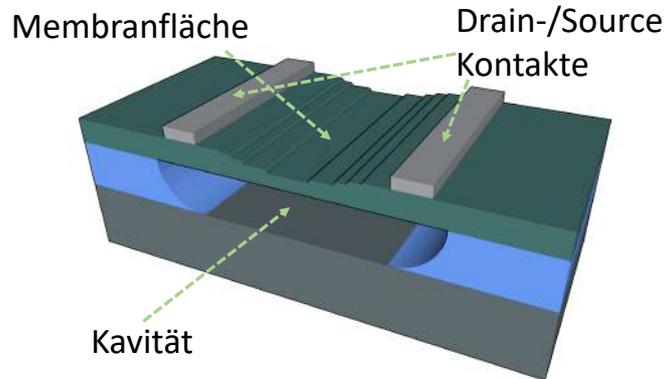


Abb. 3.7: Pseudo-MOSFET als Ausleseinheit auf einem SOI Substrat mit Kavität.

Die eingeschlossene Kavität sorgt bei einem von außerhalb angelegten Druck für eine Verbiegung der Membran und somit einer Beeinflussung des MOSFET-Kanals, wie in Abbildung 3.7 dargestellt. Diese Methode bietet eine schnelle und einfache Integration in den Gesamtprozess und liefert eine bessere Signalerfassung als eine kapazitive Messmethode.

3.3 Anpassung von technologischen Prozessschritten

Basierend auf den Konzepten des Fluss- und Drucksensors, beziehungsweise einer Integration aus beiden, ergeben sich unterschiedliche Prozessschritte, welche im Rahmen dieser Arbeit entwickelt, angepasst und verbessert werden. Bei der Prozessentwicklung für die Herstellung eines thermischen Flusssensors werden folgende Technologieschritte im Rahmen dieser Arbeit betrachtet:

- Gezielte Schichtdickenreduktion des Toplayers eines SOI-Substrates mittels thermischer Oxidation und anschließender HF-Ätzung.
- Anpassung der Dotierung von Nanodioden zur besseren Temperaturempfindlichkeit.
- Entwicklung von ESL-Prozessen, inklusive derer Randparameter, wie elektronensensitiver Fotolack.
- Nanoskalige Siliziumstege für das Filament und die Dioden bei dem Flusssensor. Hierbei wird eine Kombination aus Lithografie- und Ätzprozessen untersucht.

- Unterätzung von Nanodioden für ein besseres Strömungsprofil.
- Backendprozess zur Verkapselung und elektrischen Anbindung des Sensors in eine Messumgebung.

Für eine weitere Integration des Absolutdrucksensors mit Nanolochprozessierung gibt es folgende Ansätze:

- Ein kombinierter Prozess zur Erzeugung der Stege für den Flusssensor und der Nanolöcher für den Absolutdrucksensor.
- Weitere Anpassung von Lithografie- und Ätzprozessen für eine Prozessierung von einem kombinierten System.

Die Ergebnisse hierzu werden in Kapitel 5.2.1 vorgestellt.

3.4 Fazit zum Konzept eines neuartigen Sensorsystems

Das Konzept eines kombinierten Sensorsystems zeigt die Randbedingungen der gemeinsamen Integration auf. Es sind dazu die grundlegenden Funktionsweisen erläutert und zusammengefasst, worauf in den kommenden Kapiteln simulationsgestützte Berechnungen und Analysen erfolgen. Durch die Definition der notwendigen Parameter und deren grundlegenden Funktionen zueinander, ermöglicht sich eine Plausibilisierung der nachfolgenden Untersuchungen hinsichtlich der Funktionsweise von nanoskaligen Flusssensoren. Im nachfolgendem Kapitel wird eine Betrachtung des Systems mittels FEM-Simulation durchgeführt.

4 Modellbildung und Simulation mittels FEM

Zur Berechnung von transienten Vorgängen in dreidimensionalen Modellen bietet sich eine Finite-Elemente-Methode (FEM)-Simulation an. [76] Ein analytisches Modell ist für eine bestimmte Anzahl an Freiheitsgraden und Randbedingungen in einem Multi-Parameterraum nicht anwendbar. Somit wird eine computergestützte Berechnung genutzt, um eine Systemanalyse bei Entwicklungsprozessen zu bekommen. Dabei werden zunächst die relevanten Parameter für die Simulation aufgeführt, welche den identifizierten Einflussgrößen aus Abschnitt 3 und Abbildung 3.1 entnommen sind. Daraufhin wird ein dreidimensionales Computer Aided Design (CAD)-Modell eines Systems konstruiert, um dieses als Ausgangsgeometrie für die Simulation zu nutzen. Nach der Erzeugung dieses Modells, wird es zur Nutzung einer FEM in einzelne Knotenpunkte zerlegt. Dies erfolgt über eine Triangulation. Das Modell wird somit in ein Gitter zerlegt²⁶. Dieses bildet mehrdimensionale Gleichungssysteme ab, welche durch Integrale und Differentiale beschrieben sind. Sie lassen sich nun durch numerische Rechenoperationen lösen. Dabei werden einzelne Knotenpunkte und deren Randparameter berechnet. Zur Reduktion der Rechenzeit und zum Konvergieren der Gleichungssysteme ist die Wahl der Anzahl an Gitterpunkten relevant. Dies gilt es hierbei zu berücksichtigen. [77] Zunächst wird im Rahmen dieser Arbeit und mit diesem Modell die FEM-Simulation genutzt, um eine grundlegende Aussage über die Funktionalität eines anemometrischen und TToF-Sensorprinzipes in verschiedenen Umgebungsmedien zu evaluieren. Dabei werden primär die Medien Stickstoff (N_2), Wasser (H_2O) und Blut betrachtet, da diese Medien für eine praktische Evaluierung vorhanden oder - im Falle von Blut - als mögliche zukünftige Einsatzbereiche definiert sind. Weiterhin lässt sich dieses Modell beliebig um weitere Medien erweitern. Es bietet somit einen Benchmark für verschiedene Einsatzbereiche des Sensorsystems und zeigt mögliche Fehlerindikatoren bei dem Design und der Anwendung auf. Hierbei wird sich die Simulation auf den Flusssensor beschränken, da die Untersuchung von diesem der Hauptfokus der Arbeit ist.

²⁶*engl. meshing*

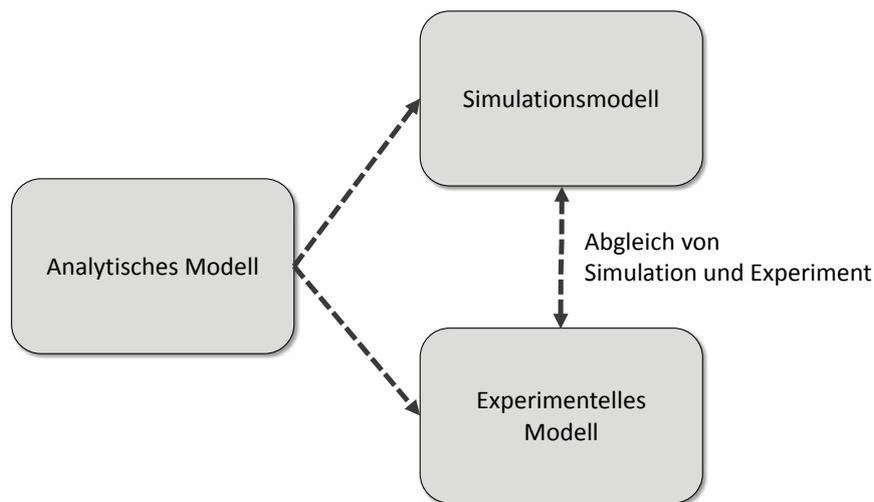


Abb. 4.1: Zusammenhang von analytischem Modell, Simulation und Realisierung eines Prototypen zur Entwicklung eines Gesamtsystems.

Weitere FEM- und FVM-Simulationen werden eingesetzt, um eine Entwicklung eines Modells hinsichtlich des Messbereiches und dessen Linearität zu bekommen. Dabei sind die Dimensionen, wie unter anderem die Abstände der Messdioden zueinander, relevant und werden variiert. Damit wird ein größerer Lösungsraum erzeugt, welcher verschiedene Messbereiche des Sensorsystems beschreibt.

Darüber hinaus wird in Abschnitt 4.2 eine Prozessbeschreibung für das Sensorsystem durch Simulation ermittelt sowie die gewählte Dotierstoffkonzentration und die damit verbundene Ionenimplantation hinsichtlich der Wärmeempfindlichkeit verbessert. Da es sich hier um Diffusionsprozesse handelt, bedarf es eines gesonderten Software-Tools.

Dennoch verfügen Simulationen über eine eingeschränkte Aussagekraft, welche insbesondere durch die minimale Größe der Differenziale und angenommener Randbedingungen, in Verbindung mit der zur Verfügung stehenden Rechenleistung, begrenzt wird. Zur Verbesserung der Simulation bedarf es einer experimentellen Entwicklung und Prozesssierung des Sensorsystems. Diese empirische Untersuchung ermittelt weitere Daten, welche zur iterativen Anpassung der Simulationsergebnisse und -modells führen. In Kapitel 5 wird dementsprechend ein realer Prototyp vorgestellt, welcher entwickelt, prozessiert und anschließend charakterisiert wird. Diese Resultate der Charakterisierung werden mit den simulierten Daten verglichen. Dadurch ergibt sich eine Plausibilisierung und genauere Untersuchung der ermittelten Daten. Weiterhin werden Optimierungsansätze daraus abgeleitet. In Abbildung 4.1 ist dieser Ablauf zusammengefasst.

Durch eine zusätzliche Prozesssimulation in Abschnitt 4.2 werden Diffusionsprozesse berechnet, um die Dotierung der Dioden einzustellen.

Für die Fluidsimulation wird eine Computational Fluid Dynamics (CFD) Simulation genutzt, welche folgende Vorteile hat:

1. Kurzfristige Aussagen zu Lösungsräumen von erstellten Modellen, ohne aufwendige Prototypenherstellung,
2. da auf umfangreiche Prozesstechnologie und deren Entwicklung zunächst verzichtet werden kann.
3. Variation verschiedener Parameter und
4. detaillierte Beobachtung mehrerer Messpunkte auch unter Extrembedingungen sowie
5. mit CFD eine auf Fluidsimulation und Wärmetransfer angepasste Messumgebung.

Insgesamt bietet dieses Simulationsverfahren eine unendlich hohe Detailtiefe, welche für MEMS und NEMS benötigt wird [78].

Die CFD wird bereits in unterschiedlichen Bereichen eingesetzt, wie bei der Entwicklung und Simulation im Bereich der Luftfahrt und Aerodynamik, sowie in der Schifffahrt, also Hydrodynamik, darüber hinaus aber auch im medizinischem Bereich bei der Simulation von Blutgefäßen. Weitere Anwendungsbereiche sind Kühlkreisläufe von Halbleitern bei der Betrachtung von Wettereffekten und Umweltverschmutzung. Darüber hinaus wird die Entwicklung von Turbinen und Verbrennungsmotoren auch durch CFD vorangetrieben.

Einflussgrößen für eine FEM-Simulation

Zunächst gilt es Einflussgrößen für die FEM-Simulation zu definieren. Dabei sind die notwendigen Randparameter in folgende Kategorien gegliedert:

1. Eingangsgrößen,
2. Ausgangsgrößen,
3. Umgebungseinflüsse,
4. Materialeigenschaften,
5. parasitäre Einflüsse.

Als Eingangsgrößen sind hier Filamentstrom und Filamentspannung zu betrachten, während die Ausgangsgrößen Diodenstrom, Diodenspannung, Diodenzeitdifferenz und Diodendifferenzspannung sind. Als Umgebungseinflüsse gelten hier Fluidgeschwindigkeit, Fluidart und Fluidtemperatur. Materialeigenschaften sind im stationären Fall ein spezifischer elektrischer Widerstand an Dioden und Filament, Wärmeleitfähigkeit von Dioden, Filament, Fluid und Bulk sowie die Dichte des Fluides.

Parasitäre Messeinflüsse sind Oberflächenrauigkeiten und Fremdpartikel.

Konzeptionieren eines CAD-Modells eines thermischen Flusssensors

Um ein digitales Modell für den thermischen Flusssensor zu generieren, werden die analytischen Betrachtungen aus Kapitel 3 genutzt. Bezogen auf eine Reduktion der Simulationszeit und unter der Annahme, dass beide Sensoren sich nicht wesentlich auf dem gleichen Substrat beeinflussen, wird dieses Modell für einen thermischen Flusssensor isoliert von einem Absolutdrucksensor betrachtet. Es dient als Grundlage für die folgenden Simulationen, wobei für die Technologiesimulation mittels TCAD in Abschnitt 4.2 ein weiteres Modell benötigt wird, welches sich nur auf die thermische Verbesserung einer Sensordiode beschränkt.

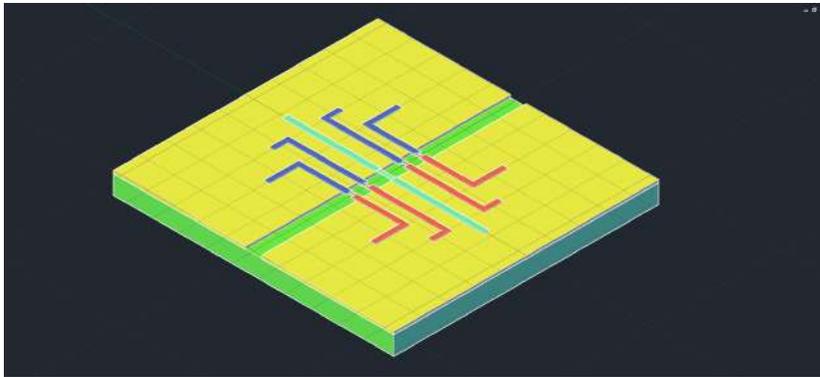


Abb. 4.2: Ein CAD-Modell eines thermischen Flusssensors als Basis für eine FEM-Simulation.

In Abbildung 4.2 ist ein CAD-Modell des Flusssensors dargestellt, welches nachfolgend um diverse Randbedingungen reduziert wird und hier als Ausgangspunkt dient. In Abschnitt 4.1.1 und Abbildung 4.3 wird eine, für die FEM-Simulation angepasste Variante, vorgestellt. Eine detaillierte Beschreibung einzelner Sensorelemente erfolgt in den folgenden Abschnitten, dabei werden verschiedene numerische Lösungsansätze vorgestellt.

4.1 Funktionale Simulationen mittels Finite-Volumen-Methode (FVM)

Wie beschrieben wird ein CAD-Modell für die funktionale Simulation genutzt. Dieser Sensor basiert, wie bereits erwähnt, auf elektrisch erzeugten Hitzepaketen und Dioden in der Funktion als Wärmedetektoren. Grundlegende Überlegungen zur Dimensionierung sind bereits analytisch in dem Kapitel 3 angestrebt worden. Um eine genauere Aussage bezüglich der

Funktionalität des Sensors mit unterschiedlichen Dimensionen zu bekommen, werden mehrere FVM-Simulationen mit der Software ANSYS durchgeführt. Mit gegebenen Randbedingungen und eingestellten Inkrementen beziehungsweise Differenzialen, kann eine Tendenz bezüglich der Dimensionierung des Sensorsystems abgeschätzt werden. Da es sich hierbei um eine sowohl thermische, mikrofluidische wie auch elektrische Simulation handelt, kommt die Multiphysics-Umgebung von ANSYS zum Einsatz. Diese bietet die Möglichkeit, eine Simulation von mehreren physikalischen Effekten und deren Einfluss untereinander durchzuführen. Bei der funktionalen Simulation gilt es insbesondere folgende Parameter hinsichtlich der Sensitivität des Sensors zu berücksichtigen:

1. Die Dimension des Fluidkanals, insbesondere die Höhe, Breite und Länge.
2. Der Abstand von den Dioden zum Filament.
3. Die Distanz zwischen den Dioden.
4. Das Oberflächen- zu Volumenverhältnis der Dioden und des Filaments.
5. Der Einfluss des angelegten Spannungsimpulses am Filament.

Als erster Ansatz zur Untersuchung der Funktionalität eines anemometrischen oder TToF-Sensors wird ein Parametersatz vorgegeben. Dieser wird, basierend auf den Resultaten der Untersuchungen, iterativ angepasst.

4.1.1 FVM-Modell zur Simulation des Temperaturprofils

Ein Modell, welches ausschließlich die relevanten Bereiche betrachtet und somit die Simulationszeit deutlich reduziert, ist in Abbildung 4.3 aufgeführt. Dieses bietet sich an, um eine iterative Anpassung der sensorrelevanten Elemente durchzuführen.

Hierbei wird der Kanalbereich betrachtet. Das Modell ist beschränkt auf die Interaktion zwischen elektrischen Impuls am Heizfilament, dem Transport des Hitzepaketts mittels eines umgebenen Fluides, wie in Kapitel 3 beschrieben und der Wärmeverteilung in dem Kanal. Hierbei speziell an dem Filament und den Dioden.

In der Abbildung 4.3 ist das reduzierte Simulationsmodell dargestellt und die Messpunkte für die FVM-Simulation markiert. Diese sind so gewählt, dass die Temperaturverteilung an den Dioden und dem Filament deutlich wird und somit die Funktion des Hitzetransports untersucht werden kann.

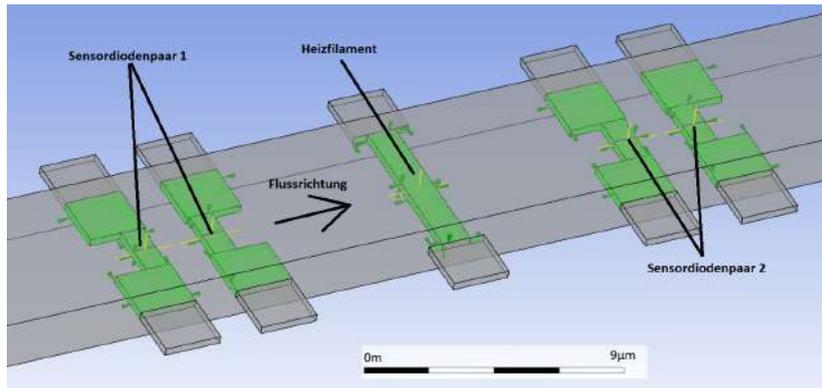


Abb. 4.3: Reduziertes CAD-Modell eines Fluidkanals von einem Flusssensor zur ANSYS-Simulation.

4.1.2 Gewählte Parameter für die ANSYS-Simulation

Wichtige Faktoren bei einer numerischen Berechnung sind die physikalischen Eigenschaften der eingesetzten Werkstoffe, wie das Silizium-Substrat und der verwendeten Fluide. Diese Parameter bestimmen, neben den definierten physikalischen Zusammenhängen und Dimensionen maßgeblich den Lösungsraum der Simulation. Um exemplarisch eine universelle Funktionsweise zu testen, werden hierbei drei verschiedene Fluide untersucht: Blut, Wasser und Stickstoff. Die jeweiligen Simulationen finden zunächst bei Raumtemperatur statt (294 K). Eine Zusammenfassung der relevanten Elementeigenschaften ist in Tabelle 4.1 aufgezeigt. Die hier verwendeten Werte basieren auf Datenblattangaben und Durchschnittswerten von physikalischen Datenbanken. [79, 80, 81, 82, 83]

Tab. 4.1: Verwendete Parameter für das Silizium-Substrat und die simulierten Fluide.

Eigenschaft	Einheit	Wasser	Blut	Stickstoff	Silizium
Molare Masse	$\frac{g}{mol}$	18,02	—	28,013	28,086
Dichte	$\frac{kg}{m^3}$	997	1050	1,14	2330
Spez. Wärmekapazität	$\frac{J}{kg \cdot K}$	4181,1	3617	1040	713
Viskosität	$mPa \cdot s$	0,0008899	0,4	0,026	—
Therm. Leitfähigkeit	$\frac{W}{m \cdot K}$	0,6069	0,52	0,026	149
Elek. Leitfähigkeit	$\frac{s}{m}$	—	—	—	1000

Die Kombination aus einem dreidimensionalen Modell mit den jeweiligen Elementeigenschaften ermöglichen eine Berechnung mittels einer Simulationsumgebung. Die Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten aufgeführt. Dabei wird als Ausgangssignalimpuls zunächst eine Sprungfunktion am Filament angenommen.

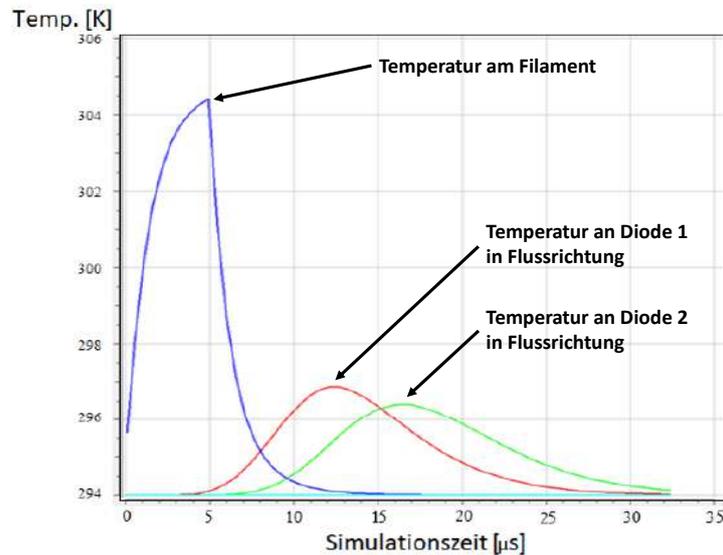


Abb. 4.4: FEM basierende Lösung einer Temperaturverteilung nach Simulation mit Wasser als Umgebungsmedium, aufgetragen über die angewendete Simulationszeit.

4.1.3 Auswertung der ANSYS-Simulationen

Zur Erzeugung eines Hitzepaketes wird ein Spannungsimpuls an dem Heizfilament erzeugt, welcher $2,5\text{ V}$ beträgt mit $5\ \mu\text{s}$ Impulsdauer. Dieser Impuls wird mit der CFX Expression Language (CEL) generiert. Mit dem Fluid Wasser bei Raumtemperatur ergibt sich ein Temperaturprofil nach Abbildung 4.4. Bei dieser Simulation ist eine Einlassgeschwindigkeit des Fluides von $0,75\text{ m/s}$ gewählt worden.

Das entstandene Profil der Temperaturverteilung entspricht hierbei grundlegend dem zu erwartenden Verlauf. An dem Heizfilament ergibt sich ein Temperaturspitzenwert von $304,5\text{ K}$ und nach einer Laufzeit von $12,5\ \mu\text{s}$ erreicht die Wärmeverteilung ein Maximum an der ersten Diode in Flussrichtung. Hierbei - und auch bei der zweiten Diode in Flussrichtung - ist das Profil aufgrund von Wärmediffusion nicht so scharf ausgeprägt wie bei dem Heizfilament. Ein Geschwindigkeitsprofil der oben erwähnten Simulation ist in Abbildung 4.5 dargestellt. Hierbei bestätigt sich die analytische Annahme aus Kapitel 3, dass die Geschwindigkeit in den engeren Passagen zunimmt.

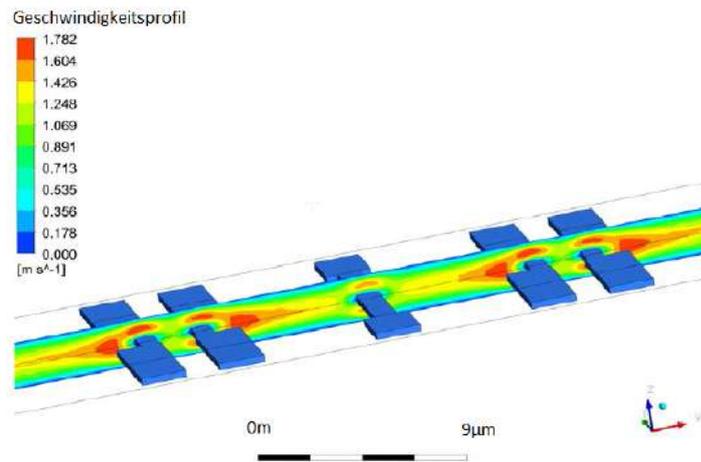


Abb. 4.5: Lösung eines Geschwindigkeitsprofil im Fluidkanal nach FEM-Simulation mit Wasser und $0,75 \text{ m/s}$ Einlassgeschwindigkeit.

Ein weiteres Simulationsergebnis zeigt die Verteilung der Wärme im Kanal bei den gleichen Parametern und variierenden Amplituden der Spannungsimpulse. Dies ist in den Diagrammen 4.6, 4.7 und 4.8 aufgeführt.

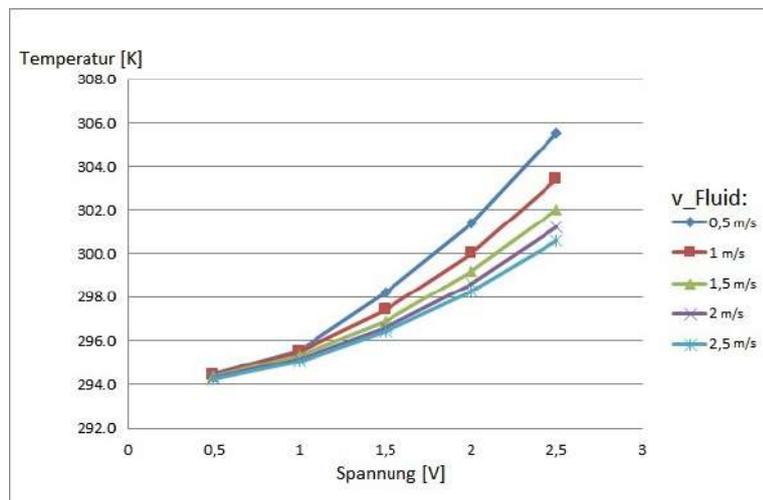


Abb. 4.6: Temperaturabhängigkeit Heizfilament zu Flussgeschwindigkeit.

Die nachfolgende Untersuchung bezieht sich auf verschiedene Abstände der Dioden von dem Filament, wobei hier Ergebnisse exemplarisch für $2 \mu\text{m}$ und $5 \mu\text{m}$ dargestellt sind. Dies ergibt eine unterschiedliche Verteilung der Temperaturspitzen über die Zeit und Höhe der Amplituden, jedoch bleibt die gemessene Fluidgeschwindigkeit gleich. Dies ist in den Abbildungen 4.9 und 4.10 visualisiert.

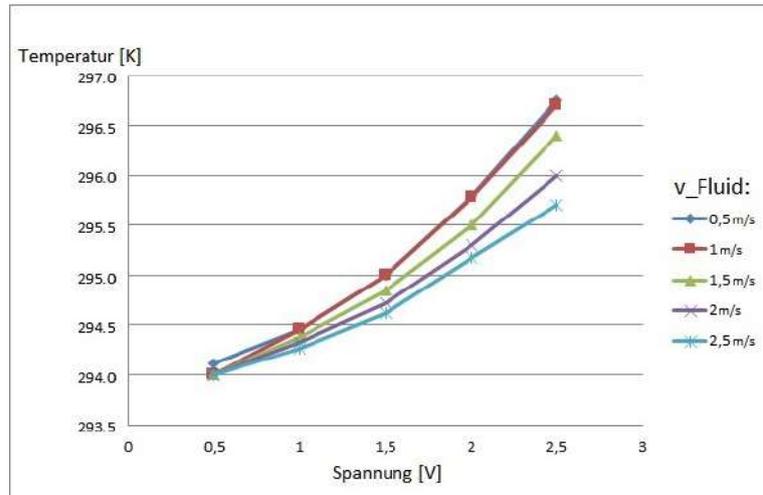


Abb. 4.7: Temperaturabhängigkeit Diode 1 zu Flussgeschwindigkeit.

Dies ist plausibel, da die Abstände der Dioden konstant bleiben somit wird ein weniger kritischer Einfluss der Abstände von den Dioden zum Filament gezeigt.

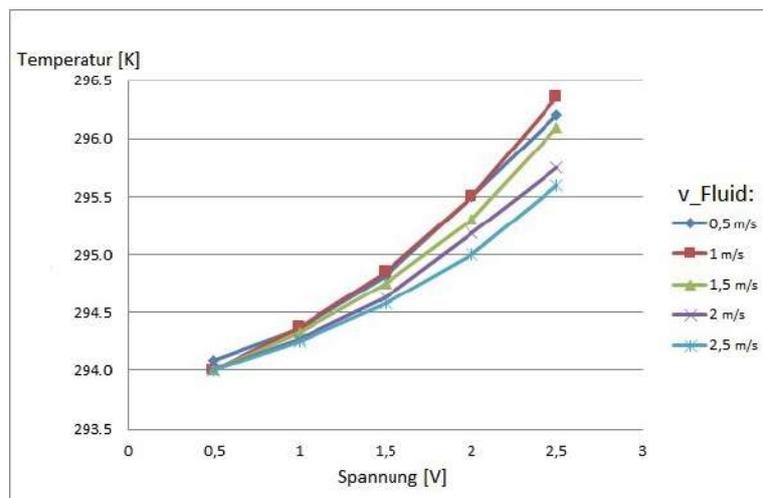


Abb. 4.8: Temperaturabhängigkeit Diode 2 zu Flussgeschwindigkeit.

Zusammenfassend zeigt die rechnergestützte Lösung, dass Fluide mit geringer Wärmeleitfähigkeit keine ausreichende Wärmeverteilung realisieren, um thermische Sensoren zu untersuchen. Somit ist eine Auswertung eines differenzierten Messsignals nicht möglich, da die Rauschsignale die Messsignale übertreffen. [84]

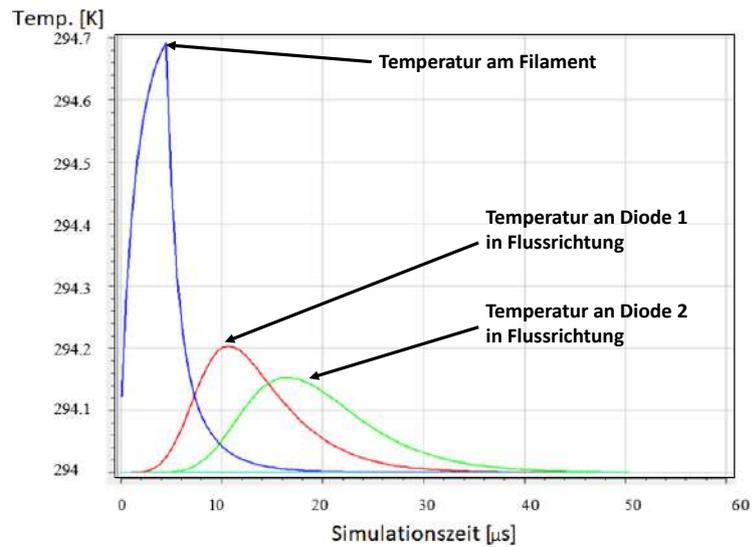


Abb. 4.9: Simulationsergebnis für $2\mu m$ Abstand der Dioden vom Filament.

Weiterhin sind integrierte Messverstärker mit passenden Filterstufen denkbar, da die Messsignale insgesamt sehr gering sind. Prinzipiell ist jedoch das Messprinzip mittels dieser Berechnung belegbar und kann für eine Fluiddetektion genutzt werden.

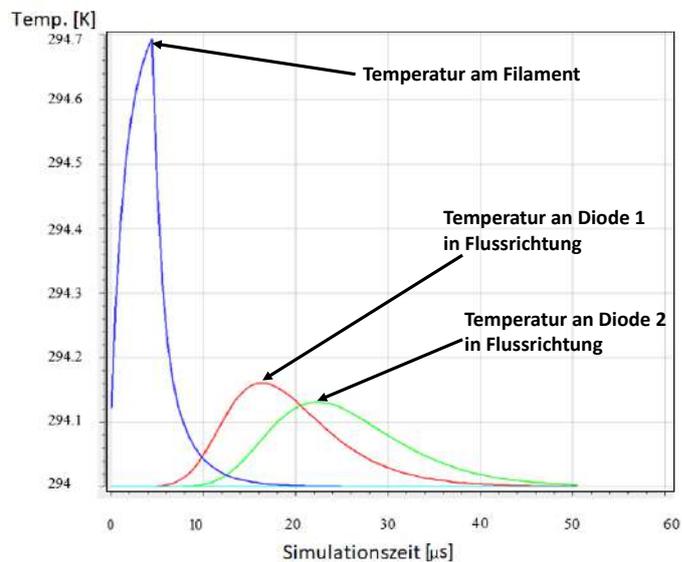


Abb. 4.10: Simulationsergebnis für $5\mu m$ Abstand der Dioden vom Filament.

4.2 Technologiesimulationen zur Prozessentwicklung

Eine Entwicklung der Technologieprozesse erfolgt durch experimentelle Versuchsreihen von einzelnen Halbleitertechnologieprozessschritten. Dies hat den Vorteil, dass ein verbesserter Prozess direkt in den Gesamttablauf zur Herstellung von Prototypen integriert werden kann. Jedoch ist dieses Vorgehen mit einem erhöhten Zeit- und Kostenaufwand verbunden und eine umfassende statistische Untersuchung sehr aufwendig. Dabei ist es notwendig, wie schon in Abschnitt 4.1 gezeigt, eine FEM- oder FVM-Berechnung mittels passender Software zu realisieren. Die in dem erwähnten Abschnitt genutzte Simulationsumgebung ANSYS ist insbesondere bei halbleitertechnologischen Prozessen, welche durch Diffusionsprozesse erfolgen, ungeeignet. Für eine solche Berechnung wird ein anderes Programm benötigt. Hierbei ist Technology Computer Aided Design (TCAD) von der Firma Synopsis geeignet. Dieses ist spezialisiert auf Prozesssimulationen, wie insbesondere Ätz- und Strukturierungsprozesse, Lithographieabläufe und Ionenimplantation. In dieser Arbeit wird hiermit die Ionenimplantation und deren Einfluss auf die elektrischen und thermischen Eigenschaften des Silizium simuliert. Im Rahmen des Gesamtprozesses findet diese, wie in Kapitel 5.1 gezeigt, bei der Erstellung der pn-Dioden Anwendung. Somit konzentriert sich die TCAD-Simulation nur auf diesen Teil des Sensorsystems. [85]

Beschreibung des thermischen Ansprechverhaltens von pn-Dioden

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben, werden zwei nanoskalige Diodenpaare zur Bestimmung der mittleren Strömungsgeschwindigkeit verwendet. Dies geschieht über die Detektion eines Hitzepaketes. Um die erforderliche Temperaturdifferenz ΔT in dem umgebenen Medium zu verringern, gilt es eine möglichst hohe Temperatursensitivität zu erreichen. Diese wird beschrieben mit $\Delta U/\Delta T$ beziehungsweise durch die Einheit mV/K . Bei einer pn-Diode beträgt sie üblicherweise -1 bis $-3 mV/K$.

Die analytische Beziehung der thermischen Empfindlichkeit und insbesondere der dafür signifikanten Parameter sind bereits in Kapitel 3.1 und der Gleichung 3.11 eruiert. Wie in dieser Gleichung dargestellt, ist die thermische Empfindlichkeit besonders durch die gewählten Dotierstoffkonzentrationen beeinflussbar. Deswegen ist es ein Hauptziel der TCAD-Simulation, die Volumenkonzentrationen N_A und N_D der p- und n-Dotierung beziehungsweise analog die dazugehörige Flächendosen und Implantationsenergien zu variieren und darauf basierend das thermische Ansprechverhalten zu verbessern. Diese Ergebnisse werden anschließend in experimentellen Versuchsreihen mit empirischen Daten verglichen.

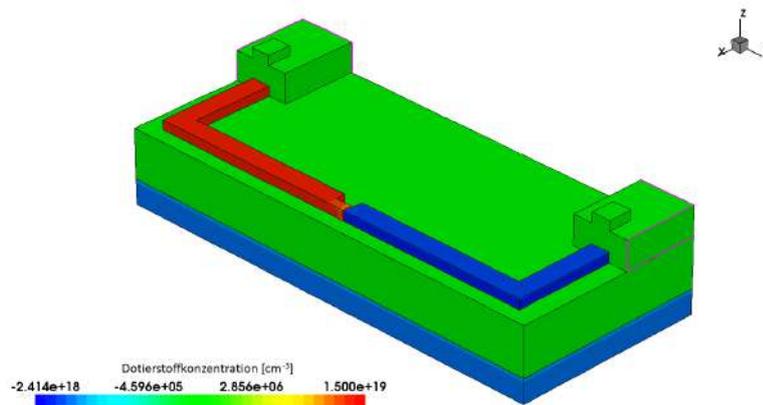


Abb. 4.11: Diodenmodell für eine Simulation von Diffusionsprozessen mittels TCAD.

Dies erfolgt in Abschnitt 5.2.3. In Abbildung 4.11 ist ein TCAD-Modell einer Diode dargestellt. In diesem Model ist bereits eine Lösung mit einer Dotierstoffverteilung von p- und n-Gebiet gezeigt und in Tabelle 4.2 sind verschiedene Lösungen von TCAD-Simulationen aufgeführt. Die Ergebnisse zeigen ein maximales thermisches Ansprechverhalten der Dioden bei einer p-Volumenkonzentration von $3,471 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ und einer n-Volumenkonzentration von $1,339 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$. Diese beträgt dann, basierend auf der Simulation: $-1,167 \text{ mV/K}$. Sie gilt in dem Arbeitspunkt mit einem Strom von $1 \mu\text{A}$.

Tab. 4.2: TCAD-Lösungen für eine Temperaturabhängigkeit bei verschiedenen Dotierstoffkonzentrationen bei einem Strom von $1 \mu\text{A}$.

p-Flächendosis	n-Flächendosis	p-Volumenkonzentration (lt. TCAD)	n-Volumenkonzentration (lt. TCAD)	Temperaturabhängigkeit (lt. TCAD)
$3 \cdot 10^{12} \text{ cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$3,471 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$	$1,339 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$-1,167 \text{ mV/K}$
$3 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$	$2,481 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-3}$	$1,441 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$	$-1,047 \text{ mV/K}$
$3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-2}$	$1,045 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$5,163 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$-0,945 \text{ mV/K}$
$3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$	$2 \cdot 10^{18} \text{ cm}^{-2}$	$2,028 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$1,868 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$	$-0,667 \text{ mV/K}$

4.3 Zusammenfassung der Simulationsergebnisse

Die Simulationsergebnisse haben ergeben, dass eine grundlegende Funktion eines thermischen Flusssensors gegeben ist, sofern die Randparameter angepasst werden. Allerdings ergibt sich eine erhöhte Anforderung bezüglich Rauschverhaltens und somit der Ausleseelektronik.

Insgesamt gilt es dies nun in den kommenden Abschnitten empirisch zu ermitteln. Dazu folgt nun zunächst eine Übersicht von Prozessanpassungen zur Erzeugung von Prototypen unter Laborbedingungen. Weiterhin folgt dann eine experimentelle Charakterisierung, welche mit den Simulationsergebnissen verglichen wird.

5 Entwicklung der Technologieprozesse

In den vorherigen Kapiteln ist das Prinzip eines mikroskaligen, thermischen Flusssensors sowie erste Anpassungen durch analytische Vorüberlegungen und Finite-Elemente-Methode-Simulationen dargestellt. In diesem Kapitel werden Entwicklungen von Technologieprozessschritten anhand experimenteller Untersuchungen gezeigt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Prozessentwicklung für einen nanoskaligen TToF-Sensor, welcher auch hinsichtlich seiner anemometrischen Funktionsweise untersucht wird. Zusätzlich wird ein Konzept vorgestellt, den Flusssensor um einen Absolutdrucksensor zu erweitern. Dementsprechend werden die grundlegenden Prozesse eines Absolutdrucksensors auf Basis eines Silicon-on-Insulator-Substrats ebenfalls aufgeführt²⁷. Als Grundlage zur Dimensionierung eines Prototypen werden dabei die Resultate aus Kapitel 4 angewendet. Diese stellen somit das Fundament für die Modellierung und erste Ansätze zur Prozessentwicklung dar. Um hingegen eine quantitative Aussage bezüglich der Funktion eines solchen Sensorsystems zu bilden folgen empirische Untersuchungen. Diese Versuche begleiten die praktische Realisierung und Charakterisierung eines Prototypen. Letzteres wird in Kapitel 6 beschrieben. Im Folgenden werden die Halbleitertechnologieprozesse und die Vorstellung von einem Konzept zur Integration eines Absolutdrucksensors mit einem Flusssensor gezeigt. Dessen praktische Realisierung ist nicht mehr Teil dieser Arbeit. Im Rahmen der Prototypenentwicklung finden prozessbegleitend partielle Anpassungen einzelner Faktoren statt, welche Auswirkungen auf die Funktionsweise des Sensorsystems haben. Diese werden während des Prozessablaufes ermittelt und angepasst.

5.1 Überblick von technologischen Prozessen zur Herstellung eines fluidischen Sensorsystems

Die Entwicklung und Herstellung von Prototypen eines thermischen Flusssensors basiert hierbei auf einem SOI-Substrat, um verschiedene technologische Vorteile, wie eine voll-

²⁷Basierend auf [20].

ständige Integration einer Ausleseelektronik, zu ermöglichen. Die gewählte Realisierung eines technologischen Prozesses zur Herstellung eines solchen mikrofluidischen Sensors wird nachfolgend erläutert. Unterschieden wird dabei zwischen den Frontend- und Backendprozessen. Die Frontendprozesse sind im Wesentlichen planartechnologische Reinraumprozesse, welche nano- und mikroskalige Strukturgrößen verschiedener Elemente, sowie die gezielte Dotierung von Halbleitern, ermöglichen. Diese Entwicklungsschritte schließen in der Regel mit der Erzeugung von einer Kontaktierungsebene mit anschließender Oberflächenpassivierung ab. Diese ermöglicht im Nachfolgenden eine Backendprozessführung unter geringeren Sauberkeitsanforderungen²⁸. Im Rahmen der Backendprozesse wird eine Kontaktierung zur Außenwelt und eine Verkapselung der Sensoren, im Rahmen des Packaging, durchgeführt. Hier liegen die Herausforderungen in der AVT und insbesondere bei einem fluidischem System in einer hermetischen Verschlüßung der Elektronikbauteile. Weiterhin muss eine definierte Umgebung für die Anströmung des Sensorelements gewährleistet sein, um die eigentlichen Messgrößen zu erfassen. Zunächst werden jedoch weiterführend die Frontendprozesse vorgestellt.

Frontendprozesse zur Entwicklung einer mikrofluidischen Sensorstruktur auf SOI

Die Frontendprozesse werden unter Reinraumumgebung, beginnend auf dem Waferlevel, durchgeführt. Zunächst werden Prozesse zur Erzeugung eines Flusssensors vorgestellt, gefolgt von einer Zusammenfassung des Prozessablaufs für einen Absolutdrucksensor.

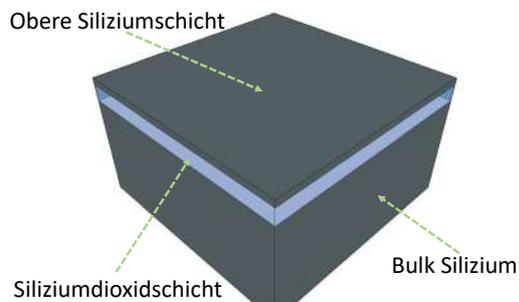


Abb. 5.1: Initiale Darstellung eines SOI-Substrates.

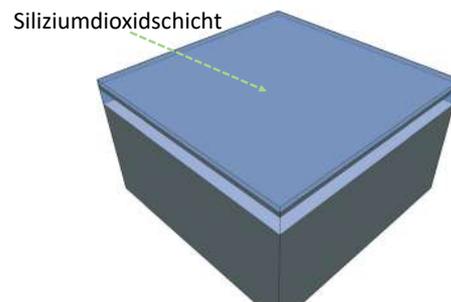


Abb. 5.2: SOI-Substrat nach thermischer Oxidation.

Eine Reinraumumgebung ist bedingt durch die Strukturgrößen im $sub - 1 \mu m$ Bereich und dient dementsprechend der Vermeidung von Defekten²⁹ bei den Halbleiterprozessen, welche zum Ausfall der Strukturen führen. Als Basis dient ein 4-Zoll SOI-Wafer der Firma SOITEC³⁰.

²⁸Zum Beispiel in einer Grauraumumgebung [58].

²⁹durch Verunreinigungen, wie Fremdpartikel

³⁰Vgl. Datenblatt [86].

Ein schematischer Aufbau des Ausgangssubstrates ist in Abbildung 5.1 dargestellt.

Die unterste Schicht besteht hierbei aus monokristallinem Silizium, welches eine Schichtdicke im Mittel von $525 \mu\text{m}$ aufweist³¹. Diese ist insbesondere für das Waferhandling notwendig, weil dieser bei einer zu dünnen Schichtdicke fragil und brüchig wird. Bei diesem Konzept hat die vergrabene Oxidschicht eine mittlere Schichtdicke von 400 nm ³². Allerdings wird diese bei den Versuchsreihen durch einen SOI-Wafer mit 1000 nm Oxidschichtdicke substituiert, da dieser eine verbesserte thermische Isolation aufweist. Jedoch eignet sich diese Schichtdicke weniger für die Integration eines Absolutdrucksensors, da die Unterätzung mittels Flusssäure technische Unzulänglichkeiten zeigt. Dies ist in Abschnitt 5.2.1 aufgeführt. Die Anwendung eines SOI-Substrates als Basismaterial ist hier von besonderer Bedeutung, da somit eine bessere thermische und elektrische Isolierung der Sensorelemente eines Flusssensors gewährleistet wird. Weiterhin ist die vergrabene Oxidschicht³³ als eine Opferschicht für die Prozessintegration mit einem neuartigen Absolutdrucksensor vorgesehen und bietet gleichsam eine Möglichkeit der Unterätzung eines Fluidkanals. Ein Prozess zur Erzeugung eines Fluidkanals wird in Kapitel 5.2.1 beschrieben. Darüber hinaus kann die oberste Silizium-Schicht³⁴, welche aufgrund des Herstellungsverfahrens eine monokristalline Festkörperstruktur aufweist, zur Integration einer Ausleseschaltung genutzt werden.

Zunächst wird diese Silizium-Schicht verringert, indem das Silizium initial thermisch oxidiert und anschließend nasschemisch, mittels Flusssäure, geätzt wird. Durch das thermische Oxidieren werden Atome aus der obersten Kristallebene des Silizium-Substrates gebunden und thermisches Siliziumdioxid erzeugt, welches durch eine erhöhte Ätzrate mit Flusssäure und dabei mit einer Selektivität gegenüber Silizium, nasschemisch entfernt wird, so wie in Abschnitt 5.2.6 beschrieben. Die Zielschichtdicke der monokristallinen Silizium-Schicht beträgt hierbei in einer Prozessreihe 100 nm .

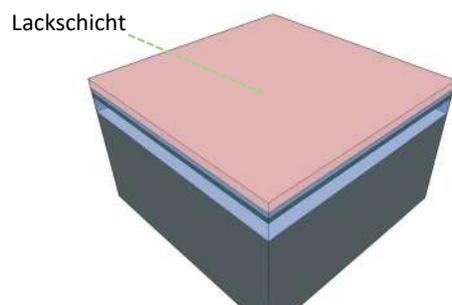


Abb. 5.3: SOI-Wafer mit thermischer Oxid- und fotosensitiver Lackschicht.

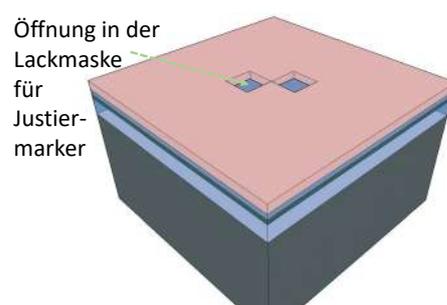


Abb. 5.4: Fotolackmaske mit Öffnungen für Justiermarker.

³¹Mit einer Toleranz von $+/- 15 \mu\text{m}$.

³²Die Toleranz beträgt hier $+/- 20 \text{ nm}$.

³³engl. *buried oxide layer*

³⁴engl. *Toplayer*

Zusätzlich wird in einem erneuten Oxidationsschritt hierbei eine 80 nm hohe Oxidschicht erzeugt, welche im späteren Prozessablauf als Streuoxid verwendet wird. Gezeigt wird dies in Abbildung 5.2 und Abschnitt 5.2.2. Um einen erforderlichen pn-Übergang zu generieren, erfolgt daraufhin eine ganzflächige Ionenimplantation mittels Bor zur p-Dotierung der Waferoberfläche, siehe Abschnitt 5.2.3.

Der weitere Prozess erfolgt danach auf $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$ großen Probenstücken. Diese werden mittels einer Wafersäge durch Zerteilung des Wafers realisiert. Insbesondere bei der ESL, ist aufgrund einer reduzierten Größe der verwendeten Vakuumkammer, eine geringere Probengröße erforderlich. Außerdem reduziert dies den Materialverbrauch. Weiterhin bieten sich diese quadratischen Proben an, um eine abschließende Trennung einzelner Sensorprototypen zu verbessern. Die Probenvorbereitung für den folgenden ESL-Prozess ist somit abgeschlossen und es folgt dementsprechend ein solcher Prozessschritt. Dieser Prozess wird ausführlich in Kapitel 5.2.4 beschrieben.

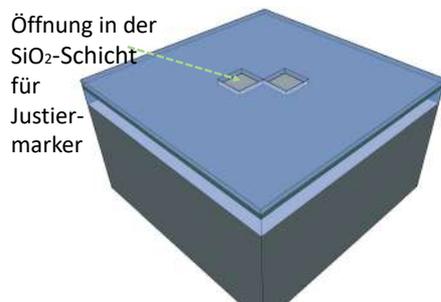


Abb. 5.5: Übertragung von Justiermarker in ein Streuoxid.

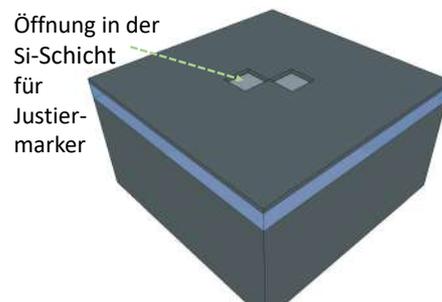


Abb. 5.6: Justiermarker in einer obersten Silizium-Schicht.

Dabei werden Justiermarker für die spätere Maskenjustage in einem PMMA basierenden Fotolack mittels ESL erzeugt. Hier dargestellt in Abbildung 5.3 und 5.4. Diese sind notwendig, um eine Ausrichtung mehrerer Fotomasken zu ermöglichen. Insgesamt werden hierbei jeweils vier Justiermarker erstellt, welche die funktionale Fläche umrahmen. Über ein Drei-Punkte-Alignment erfolgt im späteren Prozessablauf die Maskenausrichtung über drei der vier Justiermarker. Dabei wird der Ursprung von den X- und Y-Koordinaten an einem Ausgangsjustierkreuz eingestellt, sowie eine Einstellung des Ursprungswinkels über drei Justierkreuze. Somit wird ein Koordinatensystem angepasst, welches auf die Probe übertragen wird. Ein vierter Justiermarker dient zur Referenzmessung und als optionaler Punkt, falls im Prozessablauf ein Marker unbrauchbar wird, wie zum Beispiel durch mehrfache Ätzprozesse, bei einer unzureichenden Maskierung.

Um diesen ESL-Prozess durchzuführen, wird zunächst eine für Elektronenstrahlen empfindliche Lackschicht aufgetragen. Die Qualität und Schichtdicke der Lackschicht ist elementar für die folgende Elektronenbestrahlung. Diesbezüglich wird ein spezieller Fotolack benötigt,

welcher über eine Lackschleuder aufgetragen wird. Dieser Prozess wird ebenfalls angepasst um eine genaue Lackschichtdicke zu generieren und somit unter anderem eine ausreichende Resistenz gegenüber den folgenden Ätzprozessen zu bekommen. Weiterhin wird auch ein definierter Ausheizprozess benötigt, welcher die Sensitivität gegenüber des Elektronenstrahls mit beeinflusst. Ausführlich wird dieser Prozess in Abschnitt 5.2.5 ausgeführt.

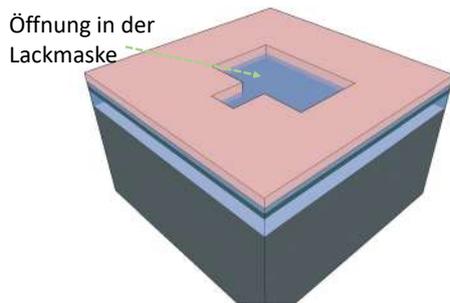


Abb. 5.7: Eine Fotolackmaske für die Implantation mittels Phosphor zur Erzeugung von einem n-dotierten Bereich für Dioden und Filament.

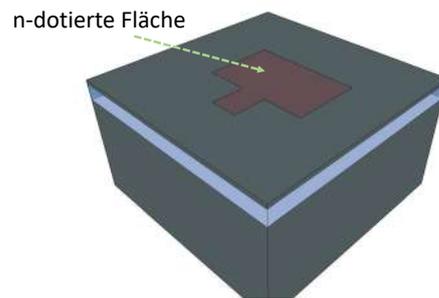


Abb. 5.8: Darstellung eines n-dotierten Bereiches nach Implantation und Entfernen der Lackmaske sowie des Streuoxides.

Danach werden die im Lack erzeugten Justiermarker mittels Erwärmung noch einmal ausgehärtet und mittels Chlor- und Fluorprozesse eines RIE-Verfahrens zunächst in die SiO_2 -Schicht, siehe Abbildung 5.5 und dann in die Silizium-Schicht übertragen, wie in Abbildung 5.6.

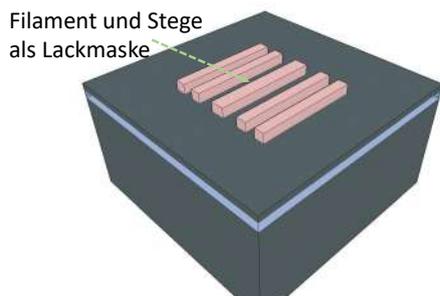


Abb. 5.9: Mittels ESL-Prozess geformte Fotolackmaske zur Strukturierung von nanoskaligen Sensorelementen.

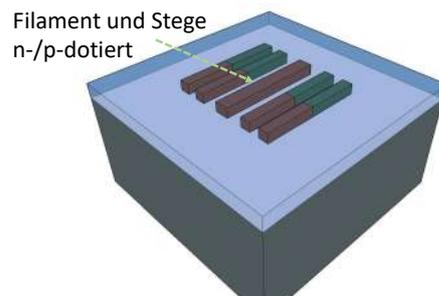


Abb. 5.10: Freigestellte Dioden und Filament durch Anwendung eines zweistufigen RIE-Prozesses.

Daraufhin wird über einen weiteren Elektronenstrahlolithographie-Prozess eine Maske für die Dotierung des n-Gebiets hergestellt. Dies ist in Abbildung 5.7 visualisiert. Sie hat eine größere Fläche als die Justiermarker und dementsprechend sind die Belichtungsparameter anzupassen.

Dies wird im Abschnitt 5.2.4 gezeigt. Weiterhin ist eine Justierung der Maske notwendig, welche eine definierte Toleranz nicht überschreitet. Genaue Parameter sind ebenfalls in dem Abschnitt zur ESL aufgeführt.

Die anschließende Ionenimplantation mittels Phosphor erzeugt eine dotierte Fläche, somit ist die Dotierung der Gebiete in denen pn-Dioden und ein Heizfilament entstehen sollen, abgeschlossen. Danach folgt eine ganzflächige Ablösung der Fotolackmaske mit einem trockenchemischen Sauerstoffätzprozess in einem Barrel-Reaktor und eine Entfernung der Streuoxidschicht mittels Flusssäure.

Der Prozess zur Ablösung der Lackmaske wird in den folgenden Prozessschritten wiederholt, wenn jeweils ein Strukturierungs- oder Abscheideprozess abgeschlossen ist. Die p- und n-dotierten Flächen sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Dabei ist die Grundlage geschaffen, (Nano-)Dioden in dem Silizium-Toplayer und ebenso ein einheitlich dotiertes Filament³⁵ zu erzeugen. Für die nachfolgende Prozessierung ist eine genaue Justierung³⁶ der folgenden Masken notwendig, sodass die Sensorelemente in den jeweiligen funktionalen Schichten integriert werden.

Eine Fehljustage führt zu Beeinträchtigungen in dem Sensorverhalten, insbesondere bei den Dioden ist ein präziser pn-Übergang wichtig, da sich sonst die thermische Abhängigkeit verändert und das Messverhalten beeinträchtigt wird. Somit sind die Justiermarker und deren Abbildungsgenauigkeit relevant für die kommenden Prozessschritte.

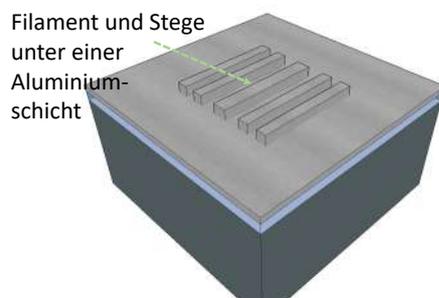


Abb. 5.11: Ganzflächig abgeschiedene Aluminium-Schicht zur Strukturierung als Kontaktierungsfläche.

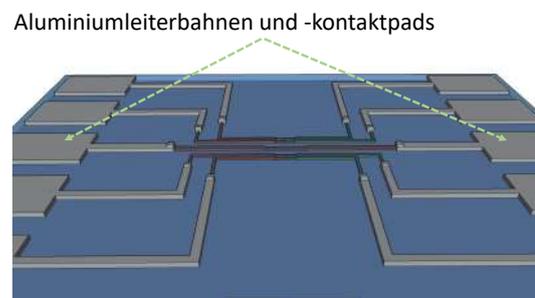


Abb. 5.12: Strukturierte Aluminium-Schicht für eine Ankontaktierung des Flusssensors.

Vor der Strukturierung von den dotierten Sensorelementen wird eine negative ESL zur Maskierung genutzt, wie in Abbildung 5.9 skizziert. Hierbei ist auf eine Justage zu achten, welche eine Maske ausrichtet um die Stege innerhalb eines vorher dotierten Gebiets zu erzeugen.

³⁵Das Filament dient zur Erzeugung eines Heizpakets mittels Joulesche Erwärmung.

³⁶Auf 1 μm genau.

Danach folgt ein zweistufiger, trockenchemischer Ätzprozess³⁷ zur Isolierung der Dioden und des Filaments voneinander. Eine Prozessentwicklung mit angepassten Parametern ist in Abschnitt 5.2.6 gezeigt.

Zum Abschluss der Frontend-Prozesse wird ganzflächig Aluminium auf die Probe aufgetragen. Dies wird durch einen Sputterprozess realisiert, welcher in Abschnitt 5.2.7 beschrieben ist. Daraufhin wird ein negativer ESL-Prozess genutzt und nasschemisch das Aluminium strukturiert. Dieser Prozessschritt ist Kapitel 5.2.6 gezeigt. Dadurch werden Kontaktflächen für den folgenden Bondprozess und die Zuleitungen zu den Sensorelementen erzeugt.

Technologischer Prozess zur Realisierung eines Absolutdrucksensors auf SOI-Substrat

Ein Prozessablauf zur Fertigung eines des Absolutdrucksensor mit einem Pseudo-MOSFET als Ausleseinheit wird folgendermaßen realisiert und basiert auf vorhergehenden Arbeiten [20]:

1. Thermische Oxidation zur Erzeugung einer SiO_2 -Schicht als Hardmaske für kommende Ätzprozesse.
2. Erzeugung von $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$ Bruchstücken aus dem Wafer mittels Trennschleifen, zur nachfolgenden Verarbeitung in der Technologieline.
3. RIE-Strukturierung der Hardmaske und der obersten Siliziumschicht zur Erzeugung von Justiermarkern.
4. Unterätzung der obersten Siliziumschicht mittel Flusssäure zur Erzeugung einer Kavität.
5. Aufbringen einer Si_2N_3 -Schicht mittels PECVD und Strukturierung dieser Schicht zur Formung einer Mesa-Struktur und Isolationsfläche für die Membran und Aluminium-Kontakte.
6. Die letzten beiden Schritte sind deckungsgleich zu dem Flusssensor-Prozess. Jedoch folgt abschließend noch eine Rückseitenmetallisierung zur Erzeugung des Backside-Gate-Anschlusses.

Prozessbeschreibung eines integrierten Sensorsystems

Ein zusammengeführter Prozess für ein monolithisch integriertes, gemeinsames Sensorsystem bestehend aus thermischen Fluss- und Absolutdrucksensor, wird nachfolgend beschrieben. Um ein Ausgangssubstrat mit einer Zielschichtdicke der oberen Silizium-Schicht zu erstellen wird,

³⁷ engl. *Reactive Ion Etching*

analog zu der Einzelfertigung von dem Flusssensor, die ursprüngliche Schicht auf 100 nm heruntergedünnt. Dabei wird simultan eine 80 nm Streuoxiddicke erzeugt. Ebenfalls erfolgt hier eine p-Dotierung dieser Schicht mittels Bor, insbesondere für die späteren pn-Übergänge der Sensordioden. Der Wafer wird nun in $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$ große Probenstücke zerteilt. Es folgt ein Prozess zur Erzeugung von Justiermarkern und gleichzeitig die Erzeugung von Nanolöchern mittels ESL sowie anschließenden Chlor- und Fluor-basierten RIE-Prozessen. Eine weitere Maske wird zur selektiven n-Dotierung mit Phosphor genutzt, um die pn-Übergänge der Dioden zu erschaffen. Wie bei dem Prozessablauf des Absolutdrucksensors wird nun die Kavität mittels HF-Unterätzung erzeugt und dabei das Streuoxid entfernt. Zum Verschluss der Nanolöcher und Membran wird erneut eine Si_3N_4 -Schicht mittels PECVD erzeugt und für die Aluminium-Kontakte und einer isolierten Mesa-Fläche strukturiert. Dabei werden zusätzlich die Nanodioden und das Heizfilament des Flusssensors erstellt. Jetzt folgt eine partielle Entfernung des Si_3N_4 auf den Dioden, dem Filament und zweier Gebiete auf der Si-Membran, zur Kontaktierung der Drain- und Source-Gebiete. Mittels Sputtern erfolgt die Metallisierung mit Aluminium. Es folgt die Rückseitenmetallisierung für den Gate-Kontakt. Dies schließt eine prinzipielle Beschreibung der Frontendprozesse ab und nachfolgend werden die Prozesse zur Integration in ein Gehäuse beschrieben.

Backendprozesse zur Charakterisierung eines mikrofluidischen Sensorsystems

Nun erfolgt die Darstellung des Backendprozessablauf mit den relevanten Packaging-Verfahren. Dabei wird der, mittels Silberleitlack fixierte, Siliziumchip über ein Ultraschallbondverfahren mit dem Gehäuse kontaktiert. Dazu werden Bondparameter variiert, wie in Abschnitt 5.3 gezeigt, um einen funktionierenden Bondprozess zu gewährleisten. Danach werden die Bonddrähte mittels zweikomponentigem Kleber verkapselt, um einen mechanischen Abriss unter Fluidströmung zu unterbinden. Dieser Prozess wird ebenfalls in Kapitel 5.3 beschrieben.

5.2 Detailbeschreibung der technologischen Prozesse

In diesem Abschnitt werden nachfolgend die einzelnen technologischen Prozessschritte und deren Anpassungen näher beschrieben. Dies bildet den Hauptbestandteil dieser Arbeit, welcher eine Prototypenentwicklung ermöglicht. Anschließend erfolgt die Charakterisierung in Kapitel 6. Zunächst wird das Ausgangssubstrat beschrieben.

5.2.1 Silicon-on-Insulator als Ausgangssubstrat

Als Ausgangssubstrat für die Prozessierung des Sensorsystems wird ein SOI-Wafer der Firma SOITEC [86] verwendet. Da im wesentlichen Prozesse basierend auf Wafern mit einem Durchmesser von 4-Zoll verwendet werden, ist auch die Ausgangsgröße des Basissubstrats mit diesen Abmessungen vorgesehen.

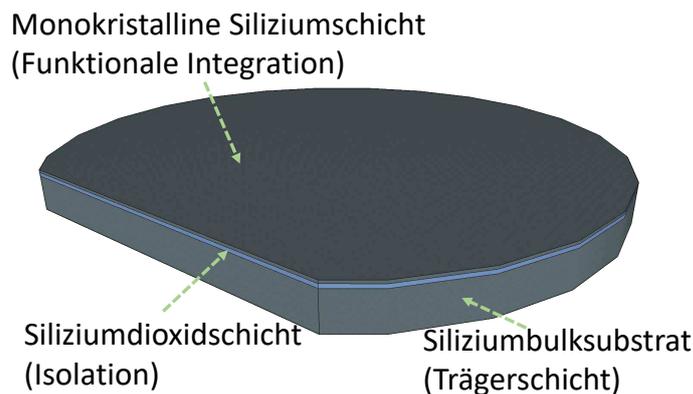


Abb. 5.13: Schematische Darstellung des SOI-Ausgangssubstrats.

Dessen Aufbau ist schematisch in Abbildung 5.13 dargestellt und besteht aus drei Schichten³⁸ mit den Eigenschaften aus Tabelle 5.1.

Der Wafer wird im Smartcut-Verfahren hergestellt [87]. Dabei bildet die unterste Schicht das Silizium-Bulksubstrat ab. Die darüber liegende Schicht ist SiO_2 , auch als vergrabene Oxidschicht³⁹ bezeichnet. Darüber liegt die oberste Schicht⁴⁰ aus monokristallinem Silizium. Aufgrund der verhältnismäßig hohen Kosten für SOI-Substrat im Vergleich zu einfachem Siliziumsubstrat wird dieses im Allgemeinen zur Höchstintegration von integrierten Schaltungen und nicht für die Prozessierung von MEMS verwendet.

Der signifikante Vorteil von SOI-Substrat bei der Prozessierung des hier vorgestellten Sensorsystems ist die Nutzung des monokristallinen Silizium im Toplayer für eine Integration des Auslesemechanismus des Drucksensors und der nanoskaligen pn-Dioden des Flusssensors. Außerdem kann die vergrabene Oxidschicht zur Unterätzung der Membran⁴¹ und des Kanals⁴² genutzt werden. Eine thermische Isolierung ist ebenfalls gegeben. Diese Vorteile werden in den nachfolgenden Kapiteln evident.

³⁸ engl. *Layers*

³⁹ engl. *Buried Oxide Layer (BOX)*

⁴⁰ engl. *Toplayer*

⁴¹ Für den Absolutdrucksensor.

⁴² Für den Flusssensor.

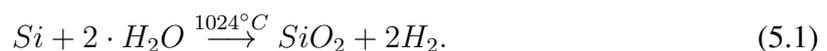
Tab. 5.1: Eigenschaften des hier eingesetzten SOI-Substrats.

Layer	Toplayer	Vergrabenes Oxid	Bulk
Material	Silizium	SiO_2	Silizium
Kristallebene	$\langle 100 \rangle$	-	$\langle 100 \rangle$
Spez. Widerstand	$14 - 22 \Omega \cdot cm$	-	$14 - 22 \Omega \cdot cm$
Schichtdicke	$340 nm$	$1000 nm$	$525 \mu m$
Dotierung	p-dotiert, Bor	undotiert	p-dotiert, Bor
Funktion	Membran, Sensorstege	Opfer- und Isolationsschicht	Substrat

Da für die Versuche zur Einzelbauteiluntersuchung nur geringe Chipflächen benötigt werden und die Vakuumkammer des genutzten Elektronenstrahlschreibers keine Wafer größer als 2-Zoll aufnehmen kann, wird der 4-Zoll Wafer im Rahmen des Prozessablaufes in $2 cm \cdot 2 cm$ große Probenstücke zerteilt. Dies geschieht im Prozess mittels einer Wafersäge und durch Trennschleifen.

5.2.2 Thermische Oxidationsprozesse zur Anpassung der obersten Siliziumschicht

Im ersten Prozessschritt wird, um eine maximale thermische Ansprechempfindlichkeit der Dioden zu erhalten, die oberste Siliziumschicht auf insgesamt $100 nm$ verringert. Somit wird das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen der Dioden maximiert und es gelangt mehr Wärme aus dem umströmenden Medium an die Oberfläche der Nanodioden. Die Erwärmung des Volumens wird erhöht, wie auch in Kapitel 4 gezeigt. Eine Verringerung der obersten Siliziumschicht geschieht durch einen zweischrittigen Prozess: Zunächst wird eine $465 nm$ hohe SiO_2 -Schicht thermisch erzeugt und mittels einer Flusssäure-Ätzung abgelöst. Für den nachfolgenden Implantationsprozess wird erneut eine SiO_2 -Schicht oxidiert, um ein $80 nm$ hohes Streuoxid für die folgende Ionenimplantation in Abschnitt 5.2.3 zu bekommen. Dies geschieht über eine sogenannte feuchte Oxidation in einem widerstandsbeheizten Drei-Zonen-Horizontaltofen nach der Reaktionsgleichung:



Das Trägergas (Sauerstoff) durchströmt dabei einen, auf $80^\circ C$ erhitzten, Dampfdrucksättiger⁴³ und reichert sich dabei mit Wasserstoff an. Die Wassermoleküle reagieren dann mit der

⁴³engl. *Bubbler*

Siliziumoberfläche des Wafers. [88, S.4 ff.]

Die Schichtdicke in Abhängigkeit der Prozessdauer kann mittels des Deal-Grove-Modells bestimmt werden mit

$$d_{SiO_2}(t) = \frac{A}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{4B}{A^2}(t + \tau)} - 1 \right], \quad (5.2)$$

wobei d_{SiO_2} die finale Schichtdicke des gewachsenen Siliziumdioxids, B die parabolische und $\frac{B}{A}$ die lineare Wachstumsrate beschreibt. Diese unterschiedlichen Wachstumsraten basieren auf dem physikalischen Effekt, dass die chemische Reaktionsrate zwischen Sauerstoff und Silizium bei zunehmender Oxidschichtdicke abnimmt. Dabei können zunehmend weniger Sauerstoffatome an die Oberfläche des Silizium gelangen, da nur eine geringere Sauerstoffdiffusion durch das vorhandene Oxid möglich ist. Der Term τ wird benötigt, sofern eine Siliziumdioxid-Schicht bereits vor der erneuten Oxidation vorhanden ist. Dies ist hier nicht gegeben und deswegen kann τ vernachlässigt werden. In der Laborpraxis wird auf Erfahrungswerte zurückgegriffen und eine Oxidationsdauer beträgt für die gewünschte Schichtdicke 105 min. [58, S. 32]

Die Verringerung des Silizium-Toplayers folgt dem Verhältnis

$$\frac{\text{aufgewachsene Siliziumdioxidschichtdicke}}{\text{reduzierte Siliziumschichtdicke}} = \frac{2,27}{1} \quad (5.3)$$

und somit ergibt sich eine Schichtreduktion von 205 nm bei einer resultierenden Si-Toplayer-Schichtdicke von 135 nm. Eine messtechnische Analyse der thermischen Oxidschichtdicke bestätigt über mehrere Versuchsreihen eine Schwankung von teilweise mehr als 10 %. Dies wird in dem nachfolgenden Prozessschritt kompensiert, indem die Streuoxiddicke angepasst wird. Wie bereits erwähnt, beträgt die Zieldicke des Streuoxides 80 nm. Auch bei diesem Prozess wird eine feuchte Oxidation verwendet, wie in Gleichung 5.1 beschrieben. Dadurch ergibt sich schließlich die gewünschte Zieldicke des Si-Toplayers von 100 nm. Bei Abweichungen der Streuoxiddicke werden die Berechnungen und dementsprechend die Parameter zur Ionenimplantation angepasst.

In einer exemplarischen Versuchsreihe, welche Prototypen zur Charakterisierung beinhaltet, beträgt die Streuoxiddicke 55 nm. Auf diesen Referenzwert beziehen sich im Kapitel 5.2.3 die SRIM-Simulationen.

5.2.3 Verbesserung der Bor- und Phosphor-Implantation zur Erzeugung von pn-Nanodioden

Nach dem Erzeugen der finalen Schichtdicke des Toplevel und eines Streuoxides folgt ein Ionenimplantationsschritt mit dem Ziel, eine geeignete Vordotierung für einen Teil der Nanodioden zu bekommen. Dazu wird eine p-Dotierung mit dem Dotierstoff Bor durchgeführt. Der erforderliche Prozessschritt der n-Dotierung, zur Erzeugung des pn-Überganges, erfolgt im späteren Verlauf der Herstellung des Sensors und wird mit dem Dotierstoff Phosphor realisiert. Die geeignete Volumendosis hat einen signifikanten Einfluss auf das Temperaturverhalten der Siliziumnanodioden. Diesbezüglich bedarf es genauer Vorüberlegungen mit Hilfe von verschiedenen Literaturquellen, analytischen Modellen, wie in Kapitel 3.1 und simulativen Berechnung, wie in Kapitel 4.2. Basierend auf diesen Vorüberlegungen werden verschiedene experimentelle Versuchsreihen durchgeführt, welche zur Untersuchung eines thermischen Ansprechverhaltens genutzt werden. Die experimentell ermittelten Werte für die p- und n-Dotierung sind in der Tabelle 5.2 aufgeführt.

Tab. 5.2: Übersicht der angepassten Dotierstoffparameter.

Dotiergebiet	n	p
Dotierelement	Phosphor	Bor
Volumendosis in $\frac{1}{cm^3}$	10^{19}	10^{18}
Flächendosis in $\frac{1}{cm^2}$	$1,25 \cdot 10^{15}$	$1,43 \cdot 10^{14}$
Beschleunigungsspannung in keV	90	30

Dabei wird die vorhandene 80 nm Oxidschicht als Streuoxid genutzt und der jeweilige Versuchswafer mit einer Verkipfung zum Implantationsstrahl von 7° in den Ionenimplanter eingebaut.

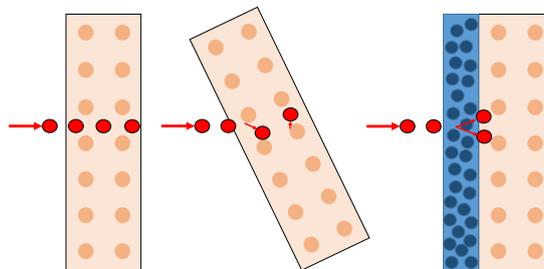


Abb. 5.14: Prinzip des Channeling-Effekts bei der Ionenimplantation.

Diese beiden Maßnahmen sind notwendig, um den Effekt des Channelings zu unterdrücken. Bei diesem, wie in Abbildung 5.14 gezeigt, gelangen, aufgrund der periodischen Anordnung der Siliziumatome im Festkörperkristall, die Ionen nahezu ungehindert durch das Atomgitter [58, S. 116-121] [89, S. 11 ff.]. Somit entsteht ein Dotierstoffprofil, bei dem ein Großteil der Dotierstoffe zu tief in das Substrat gelangt. Durch die beiden Vorkehrungen werden zwei Mechanismen zur Abbremsung der Ionen im Festkörper greifen, welche zum einen auf inelastische Streuungen und somit auf Reibung der Elektronenhülle eines Iones mit der eines Targetatoms basieren und zum anderen aus elastischen Streuungen. Sie werden elektronische und nukleare Bremskraft genannt. Der formelle Zusammenhang lautet [58]

$$-\frac{dE}{dx} = N(S_k(E) + S_e(E)) \quad (5.4)$$

wobei $S_k(E)$ und $S_e(E)$ den nuklearen und elektronischen Bremsquerschnitt darstellt, sowie N die Dichte der Targetatome. Durch Integration über die Energie von $Null$ bis E_0 wird die Ionenreichweite wie folgt berechnet:

$$R = \frac{1}{N} \int_0^{E_0} \frac{1}{S_k(E) + S_e(E)} dE. \quad (5.5)$$

Die dabei entstehende Streuung bei der Verteilung der Ionen im Substrat lässt sich als Standardnormalverteilung annehmen und wird somit mit

$$N(x) = \frac{N_S}{\sqrt{2\pi}\Delta R_P} e^{-\frac{(x-R_P)^2}{2\Delta R_P^2}} \quad (5.6)$$

berechnet, wobei N_S die Flächendosis in $\frac{1}{cm^2}$ und der Parameter x die Eindringtiefe der Ionen darstellt. Es ergibt sich ein Profil der Dotierstoffvolumenkonzentration über die Substrateindringtiefe der Dotierstoffionen.

Zusammengefasst hängt diese von der Flächendosis und der Implantationsenergie ab. Referenzwerte dieser beiden Parameter für verschiedene Dotierstoffprofile sind in Tabellenwerken aufgeführt oder werden mittels eines Monte-Carlo Simulationstools, wie zum Beispiel SRIM berechnet. Dabei kann die Streuung mittels SRIM für mehrere tausend Ionen berechnet werden und bildet ein simuliertes Bild des Dotierstoffprofils ab. Angepasst auf den Prozessablauf für den Sensor werden Simulationen für verschiedene Energien durchgeführt und die entstandenen Dotierstoffprofile bewertet. In der Tabelle 5.2 sind Implantationsenergien und Flächendosen für verschiedene Volumendosen zusammengefasst, um eine maximale Dotierstoffvolumenkonzentration im Silizium-Toplayer zu erhalten. Die Simulationen gelten für die

Annahme eines 80 nm hohen Streuoxides und müssen bei prozessbedingten Abweichungen angepasst werden.

5.2.4 Implementierung von Elektronenstrahlithographie-Prozessen

Wie bereits in Abschnitt 2.4.2 beschrieben, gibt es verschiedene Verfahren, um lithografisch Masken für Halbleiterprozesse zu erzeugen. Die Wellenlänge eines verwendeten Quellsignals und das jeweilige Gesamtsystem⁴⁴ sind dabei maßgeblich verantwortlich für eine maximale Tiefenschärfe (*engl. Depth of Focus*) sowie den kleinsten auflösbaren Abstand.

Tab. 5.3: Parameter für ESL-Prozesse für einen thermischen Flusssensor.

Layer	Fotolack	Energie	Blende	Dosis
Justiermarker	PMMA 950K ARP-679.04	30 keV	$20\ \mu\text{m}$	$242\ \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$
n-Dotiergebiet	PMMA 950K ARP-679.04	10 keV	$20\ \mu\text{m}$	$125\ \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$
Si-Nanostege	ARN-7520.18	20 keV	$20\ \mu\text{m}$	$86\ \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$
Al-Kontaktlayer	ARN-7520.18	10 keV	$60\ \mu\text{m}$	$250\ \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$
Fluidkanal	ARN-7520.18	10 keV	$20\ \mu\text{m}$	$125\ \frac{\mu\text{C}}{\text{cm}^2}$

Für nanoskalige Sensorsysteme bietet sich ein Verfahren an, welches *sub*– 100 nm -Strukturen erzeugen kann und somit auch kleinste Sensorelemente abbildet. Dabei ist eine Quelle notwendig, welche ein passendes Spektrum an Wellenlängen aufweist. Ein Verfahren, welches so etwas bietet, ist die Elektronenstrahlithographie. Darüber hinaus bietet diese Prozesstechnologie auch die Möglichkeit für eine schnelle Prototypenvariation, da es keine optischen Masken gibt, sondern diese über eine Auslenkung des Elektronenstrahls realisiert werden. Somit ist dies ein passendes Verfahren für NEMS-Strukturen.

Um Gebiete für die Ionenimplantation zu definieren, ist ein Prozess zur Erzeugung einer Maskierung notwendig. Ein elementarer Bestandteil der Planartechnologie ist die Benutzung von Fotolacken und verschiedenen Lithografieprozessen zur gezielten Maskierung der jeweiligen Schichten. Diese wird ebenfalls benötigt, um gezielt partielle Bereiche der Oberfläche zu strukturieren, zu dotieren und darauf weitere Schichten abzuschneiden.

⁴⁴Bspw. die Optik bei einer Fotolithographie mit Lichtquelle.

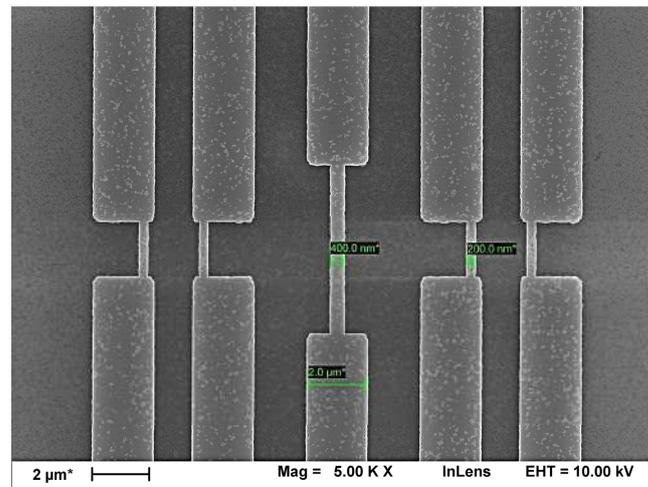


Abb. 5.15: REM-Aufnahme einer hergestellten Sensorstruktur.

Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu eine Elektronenstrahlolithographie genutzt, sowie in Abschnitt 2.4.2 gezeigt. Diese basiert auf einem erzeugten Elektronenstrahl, welcher die Oberfläche der belackten Probe abstrahlt und gezielt über eine Blende unterbrochen werden kann. Damit wird nur ein bestimmter Bereich des Fotolackes belichtet. Die eigentliche Fotomaske wird an die Steuerungssoftware übergeben und diese verfährt den Elektronenstrahl und bedient die Blende entsprechend der jeweiligen Vorgabe. [90]

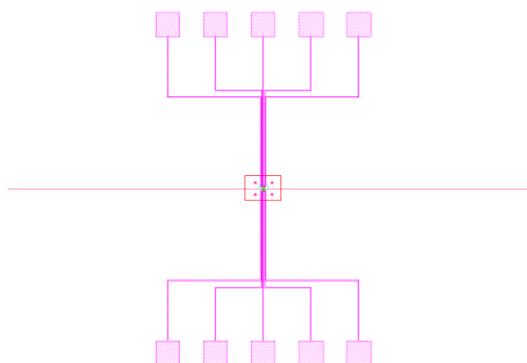


Abb. 5.16: Übersicht eines Maskenlayout für einen Flusssensor mit Al-Kontaktpads und Zuleitungen sowie Sensorbereich.

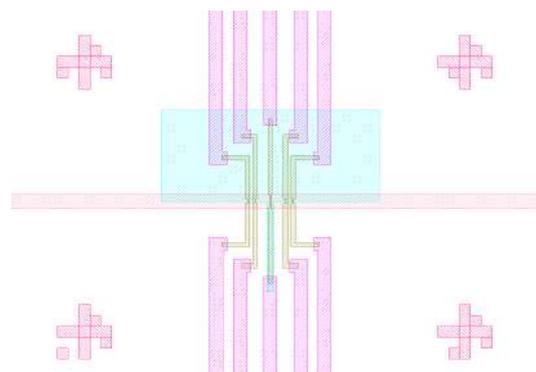


Abb. 5.17: Vergrößerte Darstellung des Sensorbereichs mit den Flächen für Dioden und ein Filament eines Flusssensors.

In der Tabelle 5.3 sind die Parameter der einzelnen Prozessschritte aufgeführt. Final entstandene Strukturen sind in Abbildung 5.15 mittels REM gezeigt.

Maskenentwicklung für den ESL-Prozess

Die verwendeten Fotomaschinen werden mit dem Programm KLayout erstellt, welches als resultierende Datei ein GDSII-Format nutzt. Diese Masken-Dateien werden dann an die Software des ESL-Systems übergeben und von dieser verarbeitet. Dabei wird eine Fragmentierung der einzelnen Strukturen vorgenommen und die Fragmente über mehrere Schreibfelder⁴⁵ auf die Probe geschrieben. Eine entwickelte Lithografiemaske für einen Flusssensor ist als Gesamtansicht in Abbildung 5.16 und als vergrößerte Ansicht des Sensorbereichs in Abbildung 5.17 dargestellt. Dies basiert auf den Ergebnissen aus Kapitel 4.

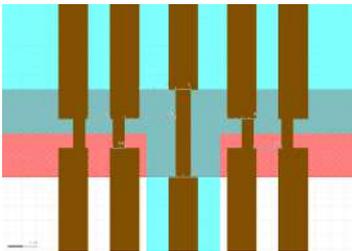


Abb. 5.18: Angepasstes Maskenlayout mit $2\ \mu\text{m}$ zwischen Dioden und Heizfilament.

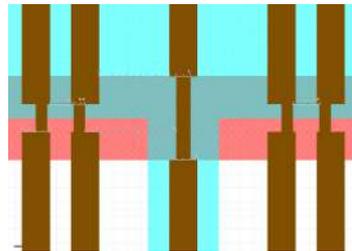


Abb. 5.19: Angepasstes Maskenlayout mit $5\ \mu\text{m}$ zwischen Dioden und Heizfilament.

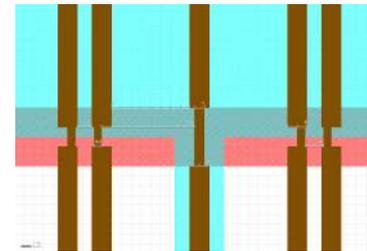


Abb. 5.20: Angepasstes Maskenlayout mit $8\ \mu\text{m}$ zwischen Dioden und Heizfilament.

In dieser Abbildung ist die Sensorstruktur mit dem Heizfilament und den pn-Diodenpaaren auf beiden Seiten des Filaments zu erkennen. Die Zuleitungen für die Kontaktierung und die Kontaktpads sind so dimensioniert, dass eine zuverlässige Bonddrahtkontaktierung gegeben ist.

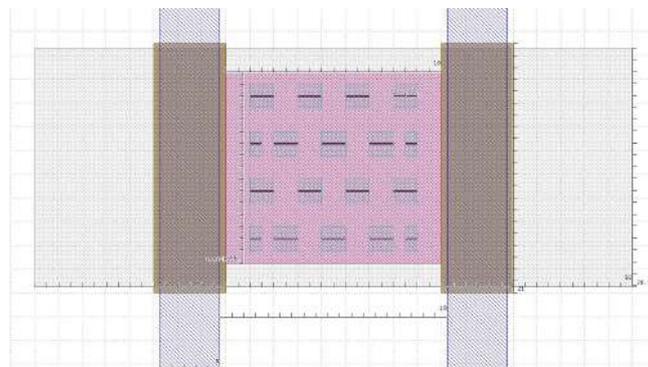


Abb. 5.21: Maskenlayout eines Absolutdrucksensors mit Nanoloch-Array.

⁴⁵engl. Write Field

Um eine Bandbreite an Ergebnissen zu untersuchen, werden zusätzlich Sensoren mit unterschiedlichen Abständen von den Sensorelementen, also den Dioden zum Heizfilament realisiert. Diese Masken sind in den Abbildungen 5.18, 5.19 und 5.20 visualisiert.

Für den Absolutdrucksensor hingegen wird in Abbildung 5.21 ein Layout präsentiert. Auch hierbei sind die Kontaktpads und Leiterbahnen so angeordnet, dass ein geeignetes Bondverfahren genutzt werden kann, um eine Verbindung zu einem Sensorgehäuse herstellen zu können. Des Weiteren sind Leiterbahnen über die Membran des Drucksensors geführt, um eine Auslesung der elektrischen Signale zu ermöglichen. Dabei sind diese in dem Design jeweils als Drain- und Source-Anschluss für den Drucksensor vorgesehen. Der rückseitige Gate-Anschluss ist in dieser Maske nicht vorhanden.

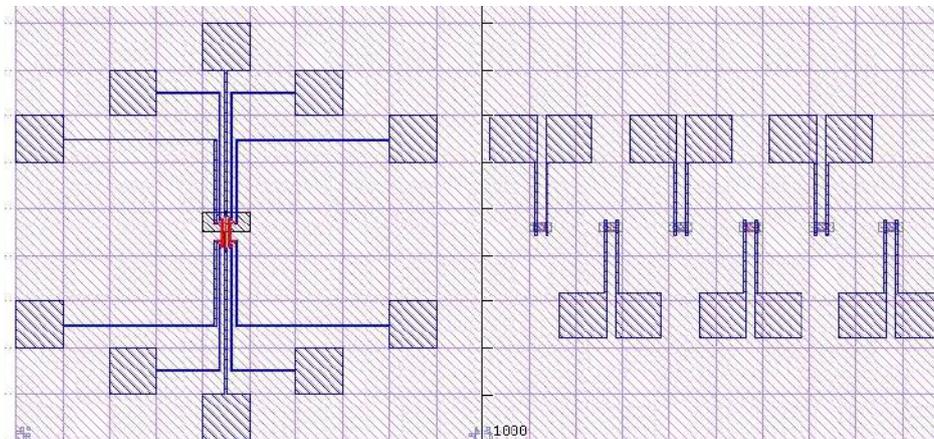


Abb. 5.22: Maskenlayout eines Fluss- und Absolutdrucksensorsystems.

Für das Gesamtsensorsystem ist eine Maske in Abbildung 5.22 aufgeführt. Diese Maske ermöglicht eine Integration beider Sensoren auf einen Chip und bei dem Verkapseln der Struktur in Abschnitt 5.3 bleibt ein mittlerer Bereich für den Fluidkanal erhalten.

5.2.5 Untersuchungen von ESL-Fotolacken

Zur Erzeugung der Strukturen mittels ESL werden unterschiedliche Fotolacke genutzt. Für die positiven Lackmasken bietet sich der Fotolack PMMA 950K ARP-679.04 [91] und als Negativlack der ARN-7520.17 [92] an. Voruntersuchungen und grundlegende Eigenschaften dieser Lacke werden im Folgenden beschrieben.

Polymethylmethacrylat (PMMA)-Fotolack

Der verwendete Positiv-Fotolack wird bei Beschuss von Elektronen in einem Entwickler löslich. Er ist hochauflösend und eignet sich für kleine Strukturabmessungen. Im Rahmen dieses Prozesses wird er genutzt um Masken für die Justiermarker, die Implantationsgebiete, die Nanolöcher und den Isolationslayer zu erstellen. Bei der Belichtung dieses Lackes an den relevanten Stellen wird eine fotoaktive Komponente umgewandelt und er wird für definierte Entwicklerlösungen löslich. Daraufhin wird er mit einem speziellen Entwicklungsprozess abgelöst. Dies ist in Abschnitt 5.2.1 gezeigt. [64, S. 215 ff.]

Der in dieser Arbeit verwendete PMMA-Lack mit der Bezeichnung PMMA 950K ARP-679.04 ist von der Firma Allresist und besitzt folgende grundlegende und prozessrelevante Eigenschaften:

- sehr gute Haftung auf unterschiedlichen Materialien
- empfindlich gegen Elektronenstrahl
- für sämtliche ESL Anwendungen geeignet
- besonders geeignet für Nanostrukturen

Er besteht aus Polymethacrylaten, welche in 1-Methoxy-2-propylacetat und in einem Safersolvent-Lösemittel Ethyllactat gelöst sind.

In dem hier vorgestellten Prozess für einen nanoskaligen Flusssensor werden, wie bereits in Kapitel 5.2.1 zusammengefasst, folgende Masken mit einem Positivprozess hergestellt:

- Justiermarker
- Maskierung für die Ionenimplantation mittels Phosphor (n-Dotierung)
- Fluidkanal

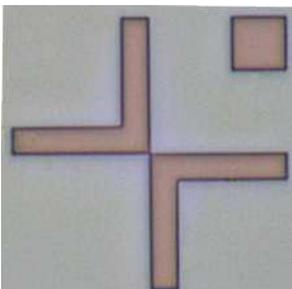


Abb. 5.23: Entwickelte Positiv-Maske für die Justiermarker.

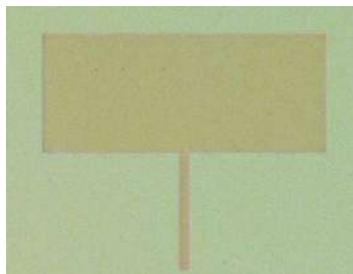


Abb. 5.24: Maske für eine n-Gebiet Dotierung des Flusssensors.

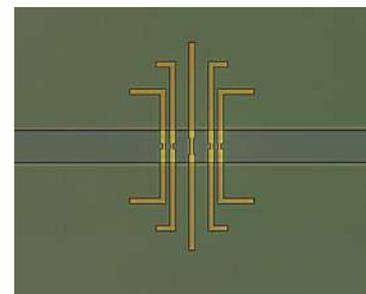


Abb. 5.25: Darstellung einer positiven Fotolackmaske eines Fluidkanals.

Eine Aufnahme dieser Masken ist in den Abbildungen 5.23, 5.24 und 5.25 gezeigt.

Funktion von Negativ-Fotolack

Bei der Prozessierung der Drain- und Source-Kontakte wird ein Negativ-Fotolack verwendet. Dieser wird genutzt, da die Aluminium-Schicht für diese Kontakte großflächig entfernt werden und nur relativ kleine Flächen stehen bleiben. Durch Elektronenbeschuss bildet sich, bei einem negativen Fotolack, ein schwer lösbares Reaktionsprodukt. Dieses bedingt, dass die belichteten Strukturen nach der Entwicklung stehen bleiben. Dieses Reaktionsprodukt bildet sich bei der Reaktion der fotoaktiven Komponente des Lacks mit der Bestrahlungsenergie eines Elektronenstrahls einer ESL. [64, S.215 ff.]

Der verwendete Fotolack ist auch ein ESL-Lack von der Firma Allresist. Seine Bezeichnung ist „ARN-7520“. Er ist ebenfalls hochauflösend und besteht aus den Komponenten: Novolak, organischer Vernetzer und 1-Methoxy-2-propyl-acetat. [92]

Eine seiner Besonderheiten ist, dass bei diesem Fotolack eine andere Entwicklung als bei dem positiven Fotolack „PMMA 950K ARP-679.04“ erforderlich ist, wie in Abschnitt 5.2.1 gezeigt. Außerdem ist zu beachten, dass dieser Fotolack UV-Licht-empfindlich ist und nur unter gefiltertem Licht verarbeitet werden kann.

Auftragen von PMMA-Fotolack

Um den PMMA-Lack auf das Substrat aufzutragen, muss eine genaue Prozessabfolge stattfinden. Diese gliedert sich in:

- Ausheizen der Probe
- Auftragen von einem Haftvermittler (hier: Hexamethyldisilazan (HMDS))
- Aufschleudern des PMMA-Lacks
- Pre-bake des Lacks

Tab. 5.4: Übersicht Parameter für eine rotierende Lackdispensierungsanlage.

Lackbezeichnung	PMMA 950K ARP-679.04	ARN-7520
Beschleunigung	2000 U/min^2	2500 U/min^2
Endgeschwindigkeit	2000 U/min	5000 U/min
Dauer	30 s	23 s

Das Ausheizen der Probe erfolgt in einem Heizofen bei $150\text{ }^\circ\text{C}$ und sollte mindestens 30 *min* andauern. Bei dem Ausheizen wird die Probenoberfläche erhitzt, sodass das HMDS auf dieser bindet. Nachdem sie mindestens $100\text{ }^\circ\text{C}$ hat wird die Probe für 10 *min* in eine HMDS-

Atmosphäre gebracht. Das HMDS bewirkt eine bessere Haftung des PMMA-Lacks beim Entwickeln, sodass sich nur die belichteten oder analog unbelichteten Strukturen ablösen und nicht der komplette Fotolack.

Tab. 5.5: Parameterübersicht für einen „pre-bake“-Prozess.

Lackbezeichnung	PMMA 950K ARP-679.04	ARN-7520
Temperatur	180 °C	85 °C
Dauer	30 s	23 s

Nach dem Aufbringen des HMDS wird der Fotolack aufgeschleudert. Dazu wird eine Lackschleuder verwendet, welche ein genau definiertes Auftragen des Lacks ermöglicht. Die gewünschte Lackschicht bei dem Positivlack „PMMA 950K ARP-679.04“ beträgt 280 nm und bei dem Negativlack „ARN-7520“ 400 nm. Dazu wird die Lackschleuder auf die Werte der Tabelle 5.4 eingestellt. Diese Lackschicht zeigt eine bevorzugte Anwendung bei diesem Prozess.

Bevor der PMMA-Lack mittels ESL geschrieben werden kann, wird dieser noch auf einer Heizplatte⁴⁶ ausgeheizt.⁴⁷ Es bewirkt eine Festigung des Lacks für den nachfolgenden Lithographieschritt aus Abschnitt 5.2.4. Die Parameter für den pre-bake sind in der Tabelle 5.5 gezeigt.

5.2.6 Einstellung und Verbesserung von chemischen Strukturierungsprozessen

Zur Strukturierung der Silizium- und Siliziumdioxid-Schichten werden im Rahmen der Technologieprozesse für beide Sensoren und des Sensorgesamt-systemes trocken- und nasschemische Ätzverfahren genutzt. Dabei bieten trockenchemische Ätzverfahren insbesondere die Möglichkeit eine höhere Anisotropie einzustellen und eignen sich diesbezüglich für höhere Auflösungen und somit kleinere Strukturgrößen⁴⁸ als vergleichbare nasschemische Verfahren [58, S. 69-74]. In dem Technologieprozess zur Herstellung des Flusssensors wird, insbesondere für die nanoskalige Strukturierung der pn-Dioden als Sensorelemente, ein trockenchemischer Ätzprozess benötigt. Dabei wird ein RIE-Verfahren eingesetzt und durch mehrere Versuchsreihen angepasst. In Tabelle 5.6 sind Standardparameter für Ätzprozess von

⁴⁶engl. hot plate

⁴⁷Dieses Ausheizen wird auch engl. pre-bake bezeichnet.

⁴⁸Größenordnung sub-100 nm.

Silizium und Siliziumdioxid aufgeführt.

Tab. 5.6: Standardparameter für ein RIE-Prozess.

Material	Silizium (Si)	Siliziumdioxid (SiO ₂)
Prozessgase	<i>SiCl₄(20 sccm)/N₂(100 sccm)</i>	<i>Ar(50 sccm)/CHF₃(18,2 sccm)</i>
RF-Leistung	300 W	225 W
Druck	60 mTorr	40 mTorr
Biasspannung	300 V	350 V
Temperatur	40 °C	20 °C
Ätzrate (Mittelwert)	85 nm/min	28 nm/min
Kammer	Chlor	Fluor
Elektrode	Graphit	Graphit

5.2.7 Erstellung der Leiterbahnen und Kontaktflächen

Ein weiterer Prozessschritt ist essentiell zur elektrischen Auswertung der Messsignale: Die Metallisierung und somit Erzeugung eines Layers für Leiterbahnen und Kontaktflächen.

Tab. 5.7: Prozessablauf eines Magnetronsputtervorgangs.

Definition	Dauer [min]	Druck [mTorr]	Leistung [W]	Prozessgas [sccm]
Evakuieren	2:00	15	-	-
Rückspattern	1:30	5	300	25
Sputterclean	1:00	15	1750	40
Deposition	13:50	8	2700	25

Wichtige Randbedingungen sind hierbei:

1. Der Metall-Halbleiter-Übergang bei Kontakt zwischen p- und n-dotiertem Silizium und dem damit verbundenen Einfluss auf die elektrische Charakteristik (vgl. Abschnitt 6) des Sensors.
2. Dimensionen der Kontaktflächen für eine Integration in ein Gehäuse mittels geeignetem Bondverfahren (vgl. Abschnitt 5.3).
3. Abstände der Kontaktpads, um einen Kurzschluss beim Bonden zu vermeiden.
4. Passende Anordnung der Kontaktflächen, damit ein Schutz der Bonddrähte gegenüber dem Fluidstrom gewährleistet ist.

5. Ausreichende Haftung der Metallschicht, um ein Ablösen beim Bonden oder späteren Handling zu Vermeiden.
6. Der Widerstand der Leiterbahnen und die maximale Stromdichte, zur Vermeidung von Zerstörung durch Eigenerwärmung.

In Abschnitt 5.2.4 sind bereits Lithografiemasken mit Anordnung der Leiterbahnen für das Sensorsystem (in Abbildung 5.22), für den Flussensor (in Abbildung 5.16) und für den Absolutdrucksensor (in Abbildung 5.21) dargestellt.

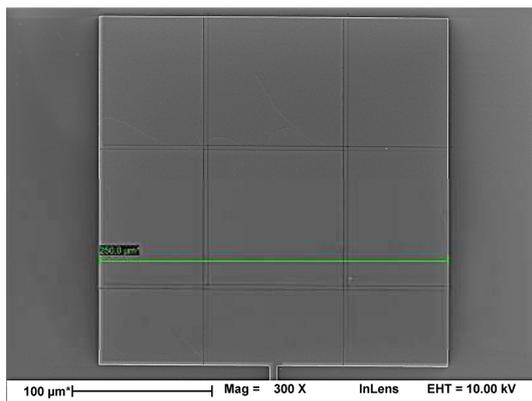


Abb. 5.26: REM-Aufnahme eines strukturierten Aluminium-Kontaktpads eines Sensor-Prototypen.⁴⁹

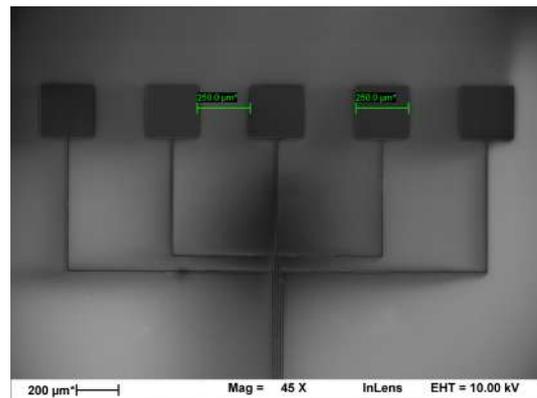


Abb. 5.27: REM-Aufnahme aller Kontaktpads und Leiterbahnen einer Seite eines Sensor-Prototyps.

Die Metallisierungsebene aus Aluminium wird mit einem physikalischen Abscheidungsverfahren hergestellt. Dazu ist ein Magnetronspalterprozess anwendbar. Ein Prozessablauf mit angepassten Parametern ist in Tabelle 5.7 zusammengefasst. Zur Strukturierung der abgeschiedenen Aluminium-Schicht wird wiederum ein Elektronenstrahlithographie-Prozess genutzt, welcher diesmal mit dem auf Novolack basierenden, hochauflösenden und negativen Fotolack AR-N 7520.04 realisiert wird. Dessen chemische Funktionsweise ist in Abschnitt 5.2.5 näher erläutert.

Ein strukturiertes Aluminium-Kontaktpad ist in Abbildung 5.26 dargestellt. Es sind Längs- und Querstreifen auf der Oberfläche erkennbar. Diese resultieren aus einer vergrößerten Abbildung des Write Fields beim ESL-Prozess. Dadurch überlappen sich diese und es kommt zu der oben erwähnten Streifenbildung. Dies ist notwendig, damit es keine Unterbrechung der Leiterbahnen bei geringfügigen Fehljustagen gibt. In Abbildung 5.27 hingegen sind sämtliche Kontaktflächen und Leiterbahnen einer Seite des Sensors dargestellt. Diese entsprechen der Maske der Abbildung 5.16 aus Abschnitt 5.2.4. Abschließend ist in Abbildung 5.28 eine Draufsicht eines Interfaces zwischen Aluminiumleiterbahn und Sensorstruktur gezeigt.

⁴⁹Die Linien zeigen ein Sticking-Overlay, welches mehr Prozesssicherheit bietet.

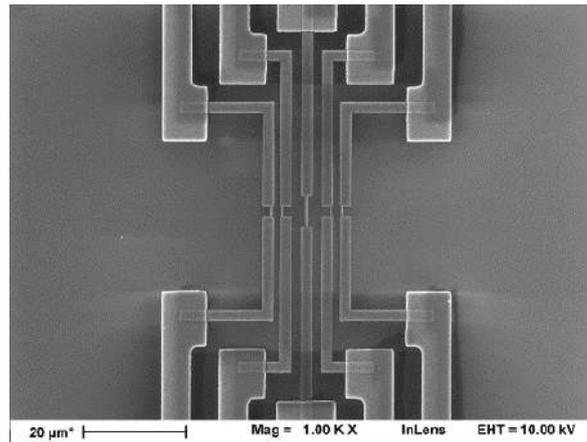


Abb. 5.28: REM-Abbildung der Übergangsebene zwischen Aluminiumleiterbahn und Sensorstruktur.

5.2.8 Untersuchungen an einem HF-Ätzprozess zur Erzeugung von freistehenden Sensorstrukturen

Ein weiterer Prozessschritt ist das Unterätzen der obersten Siliziumschicht und somit der pn-Dioden und des Filaments.

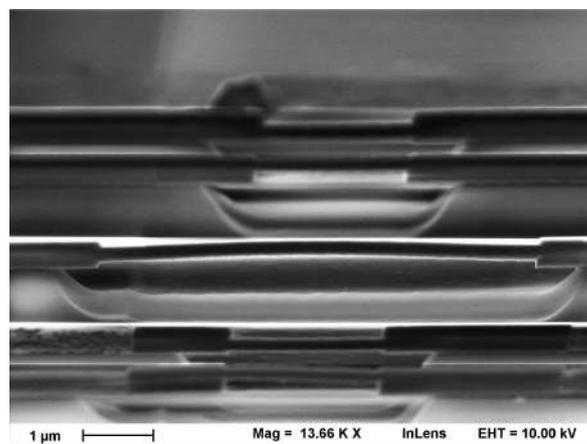


Abb. 5.29: REM-Aufnahme einer unterätzten Sensorstruktur eines Flusssensors.

Dies dient zur Erstellung eines Fluidkanals und damit zusammenhängend eine Verbesserung des Strömungsprofils hinsichtlich der Anströmung der Sensorelemente aus Abschnitt 3.

Die unter den Sensorelementen liegende Siliziumdioxid-Schicht wird in diesem Prozessschritt dabei als Opferschicht genutzt. Aufgrund der, um einen Faktor 1000, höheren Selektivität gegenüber Silizium wird hierbei Flußsäure als Ätzchemikalie verwendet. In Abbildung 5.29 ist das Resultat einer Unterätzung des Flusssensors dargestellt. Hierbei beträgt die Ätzdauer 13 *min* und die experimentell bestimmte Ätzrate beträgt durchschnittlich 40 *nm/min*.

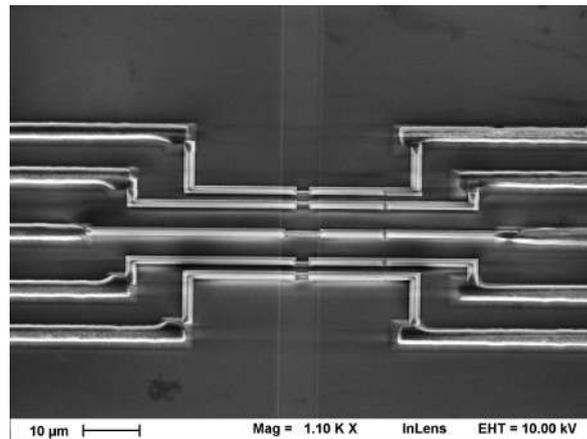


Abb. 5.30: REM-Aufnahme nach einem HF-Prozess mit großflächiger Ablösung der Siliziumdioxid-Schicht.

Bei Unterätzungen nimmt die Ätzrate aufgrund eines verminderten Gasaustausches ab. [58] Im Rahmen der Versuchsreihen ist dabei ein verstärkter Angriff der Fotolackmaske erfolgt und es ergab sich auch an den maskierten Stellen ein signifikanter Ätzabtrag. Dies führt zu einem großflächigen Ablösen der Siliziumdioxid-Schicht und führt partiell zu Leiterbahnabrissen, wie in Abbildung 5.30 dargestellt. Erst durch weitere Prozessverbesserung mittels Einstellen der Ätzparameter lässt sich dieser Effekt vermeiden.

Für eine weitere Anpassung bietet es sich an, den Schritt zur Unterätzung einer Sensormembran für einen Absolutdrucksensor mit einzubeziehen. Dies nutzt Synergien beider Prozesse aus.

5.2.9 Versuche zur Anpassung der Sensorstrukturen

Um eine Verbesserung der Sensorstrukturen zu generieren, werden Teilversuche auf einem monokristallinen Silizium-Wafer durchgeführt. Dabei ist es ein Ziel, die Stege für einen thermischen Flusssensor zu skalieren und gleichzeitig geeignete Strukturen zur Erzeugung eines Absolutdrucksensors zu untersuchen. Diese sind nanoskalige Löcher, welche zur Unterätzung von einer monokristallinen Sensormembran in einem SOI-Substrat genutzt werden können. Wie einleitend in diesem Kapitel erwähnt dient ein solcher Prozess zur gleichzeitigen Integration eines Flusssensors mit einem Absolutdrucksensor.

Ein Maskenlayout ist in Abbildung 5.31 dargestellt. Dafür sind mehrere Versuchsreihen notwendig, um eine iterative Änderung der Prozessparameter zu realisieren.

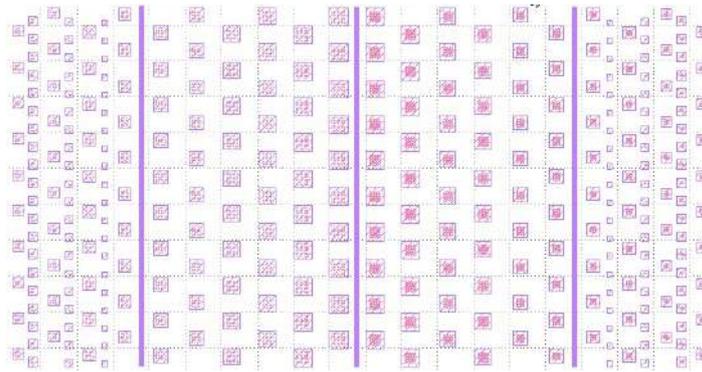


Abb. 5.31: Maskenlayout für weitere Versuche zur Anordnung von Nanolöchern und nanoskalige Stege.

Insbesondere Belichtungs- und Entwicklungszeit, sowie die Fotolackschichtdicke sind relevante Größen, um den Prozess zu verbessern. In Abbildung 5.32 ist eine Aufnahme einer solchen Struktur dargestellt.

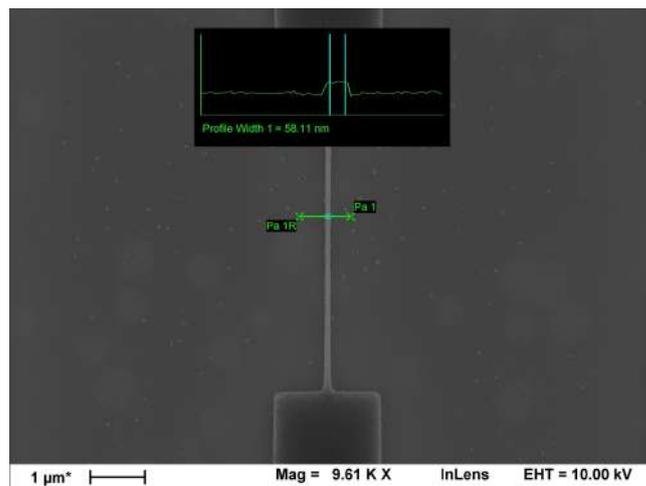


Abb. 5.32: REM-Aufnahme einer Struktur von ca. 58 nm breiten Stegen.

Um eine solche Abbildungsgenauigkeit zu bekommen, wird hierbei ein ESL-Prozess mit negativ vernetzendem Fotolack eingesetzt⁵⁰. Dazu wird eine Spinkurve mit einem angepassten Lacktyp AR-N 7520.07v aufgezeichnet, denn die finale Lackschichtdicke wird maßgeblich durch die maximale Drehgeschwindigkeit der Lackschleuder bestimmt.

⁵⁰D. h. der Lack vernetzt bei Bestrahlung durch Elektronen und die entsprechenden Strukturen bleiben nach der Entwicklung stehen.

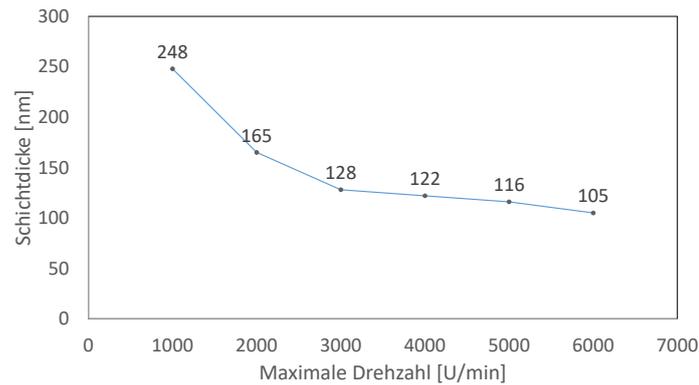


Abb. 5.33: Untersuchte Spinkurve eines negativen elektronenstrahlempfindlichen Fotolacks des Typs AR-N 7520.07v.

In dem Diagramm 5.33 sind die Ergebnisse dargestellt. Somit bietet sich hier eine Schleuderdrehzahl von 4000 U/min an.

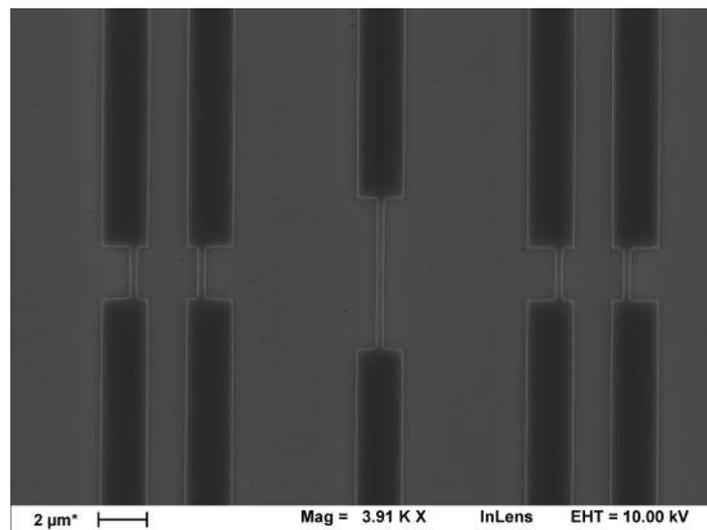


Abb. 5.34: REM-Aufnahme einer Struktur von ca. 200 nm breiten Dioden- und Filamentstrukturen.

Eine Gesamtabbildung der Sensorstruktur ist in Abbildung 5.34 gezeigt. Abschließend zeigt sich, dass eine Anpassung der halbleiterbasierenden Prozesse unter Einsatz einer Elektronenstrahlolithographie zu *sub* – 100 nm Sensorstrukturen führen. Um eine Bewertbarkeit der elektrischen Charakteristik zu bekommen, bedarf es einer elektrischen Kontaktierung zur Umgebung. Dies wird nachfolgend im Rahmen von AVT-Prozessen gezeigt.

5.3 Aufbau und Verbindungstechnik für ein Sensorsystem

Da das Gesamtsystem in einer fluidischen Messumgebung Anwendung findet, muss, neben dem konventionellem Bonden einer Siliziumprobe in einem passenden Gehäuse, auch eine geeignete Verkapselung der Bonddrähte entwickelt werden. Die ursprünglichen Probenstücke mit den Maßen $2\text{ cm} \cdot 2\text{ cm}$ werden dazu in $4\text{ mm} \cdot 4\text{ mm}$ große Testchips gesägt. Die Testchips enthalten jeweils eine Teststruktur des Flusssensors und weitere Freifläche, um auf dem zukünftigen Chip auch einen Prototypen eines Absolutdrucksensors sowie eine integrierte Ausleselektronik unterzubringen. Bevor die Prototypen in ein Gehäuse montiert und kontaktiert werden, erfolgt eine Charakterisierung des Bare-Dies, also des ungehausten Siliziumbeziehungsweise SOI-Chips, wie in Abschnitt 6 beschrieben.

Hierbei erfolgt ein erster Test der Sensordioden mittels Heizplatte und eine generelle Funktionalität der Chips wird ebenfalls abgeprüft. Werden in den Messergebnissen Anormalitäten oder Ausfälle einzelner Sensorelemente oder ganzer Prototypen festgestellt, wird dieser bei Bedarf aussortiert und eine Verkapselung ist nicht mehr notwendig. Ist ein Prototyp funktionsfähig, erfolgt die Verkapselung im Gehäuse.

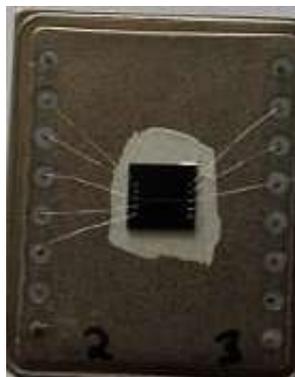


Abb. 5.35: Aufnahme eines gebondeten Chips vor Verkapselung der Bonddrähte.

Als Testgehäuse wird zunächst ein DIL-Package mit 16 Anschlusspins genutzt, wie in Abbildung 5.36 dargestellt.

Dies bietet die Möglichkeit einer erhöhten Flexibilität bei der Anpassung des Sensorlayouts und eine ausreichende Anzahl an Kontaktpins für die zehn Kontakte des Flusssensors. Für zukünftige Versuche bietet diese auch Platz für die zwei Oberflächenkontakte des Drucksensors, sowie dessen Rückseitenkontaktes. Dieser wird über die Rückseitenmetallisierung des Test-

chips und der Silberleitpaste mit einem Pin des Gehäuses verbunden. Um eine abschließende Fixierung des Chips zu gewährleisten, muss dieser nach dem Verkleben mittels Silberleitlack 24 h trocknen. Die weiteren Kontakte werden über ein Ultraschallbondverfahren mit einem siliziumhaltigen Aluminiumdraht hergestellt. Dabei werden die Kontaktierungspads mittels eines Thermokompressionsdrahtbonden an die Außenkontaktierungen angeschlossen [93]. Somit sind die elektrischen Signale nach außen an die Kontaktpins geführt und es entsteht eine Kompatibilität zu dem Messequipment.



Abb. 5.36: Aufnahme eines gebondeten und verkapselten Prototypen in einem DIL-Package.

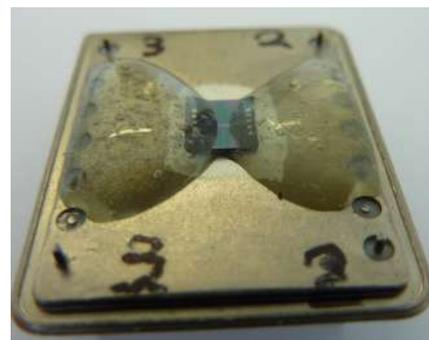


Abb. 5.37: Aufnahme eines gebondeten und verkapselten Prototypen mit Fokus auf den Fluidkanal.

In Vorversuchen konnte gezeigt werden, dass geringste mechanische Belastungen, zum Beispiel durch eine Anströmung mit Stickstoff, bereits zu Bonddrahtabrissen führen. Um dieser Beeinträchtigung entgegenzuwirken, wird ein Verschluss beziehungsweise eine Verkapselung der Bonddrähte durch Epoxydharzklebstoff durchgeführt, wie in Abbildung 5.36 gezeigt. Dabei bleibt, wie in Abbildung 5.37 zu sehen, mittig eine offene Fläche. Diese beinhaltet die eigentliche Sensorstruktur und ermöglicht die Interaktion mit dem umfließenden Messmedium.

5.4 Verkapselung eines fluidischen Sensorsystems

Um die Kompatibilität zu anderen Systemen, einen Schutz vor störenden Umwelteinflüssen und die elektrische Ankontaktierung eines Drucksensors zu gewährleisten, wird dieser in ein passendes Gehäuse integriert.

Bei dem eigentlichen Packaging wird dabei die Rückseite der Probe mittels leitfähiger Silberpaste in ein Gehäuse geklebt. Diese bietet eine elektrische Kontaktiermöglichkeit des Backgate-Kontakts zur Messumgebung. Um eine erhöhte mechanische Stabilität zu gewähr-

leisten wird dann der Chip mittels Zwei-Komponenten-Kleber entlang des Randes festgeklebt. 5.8 zusammengefasst.

Tab. 5.8: Eigenschaften verschiedener Klebstoffe für eine Verkapselung von Bonddrähten und der nicht-sensitiven Chipfläche.

Grundeigenschaft	Epoxydharz ungefüllt	Silikon (Polyoxy- propylen)	einkomponentiges Polysiloxan	Epoxyd- harz
Aushärtezeit [<i>min</i>]	35	25	15	5
Endhärte [<i>mm/h</i>]	24 <i>h</i>	0,06	2...3	24 <i>h</i>
Viskosität [<i>mPa·s</i>]	32000	pastös	11000	9000... 14000
Dichte [<i>g/cm³</i>]	1,14	1,44	1,03	1,14
Transparenz	hoch	gering	gering	hoch
Masseverlust	< 1 %	1 %	9 %	< 1 %
Temperatur- beständigkeit	-50 °C...80 °C	-40 °C...90 °C	-50 °C...180 °C	< 60 °C

Eine Voruntersuchung verschiedener Klebstoffe zeigt die Vor- und Nachteile der Substanzen auf. Dies ist in Tabelle 5.8 aufgeführt. [94, 95, 96]

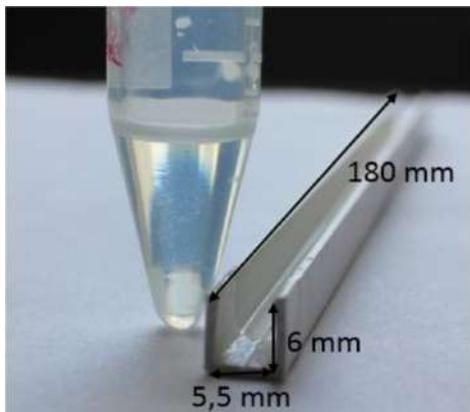


Abb. 5.38: Aufnahme Versuchsaufbau zur Untersuchung der Viskosität.

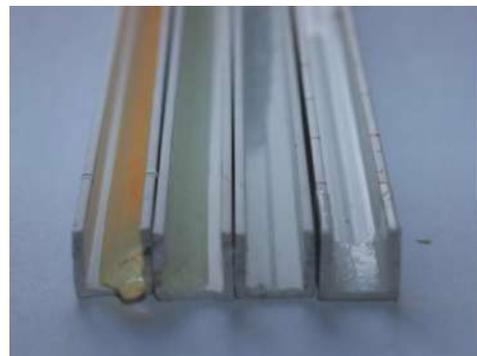


Abb. 5.39: Aufnahme verschiedener Versuchsergebnisse von Klebern hinsichtlich ihrer Viskosität.

Nach einer Applikation muss der Kleber mindestens 24 *h* bei Raumtemperatur aushärten. Um eine initiale Bewertung der viskosen Eigenschaften von verschiedenen Klebern zu bekommen, wird, wie in Abbildung 5.38 gezeigt, ein Fließverhalten untersucht. Dazu ist eine definierte Ablaufrinne genutzt, auf der die Klebstoffe unter einem definierten Winkel appliziert werden. Ein Verlaufen dieser ergibt sich durch die Schwerkraft.

Nach dem Versuch wird über eine Skala an der jeweiligen Rinne die Viskosität relativ zueinander beurteilt, wie in Abbildung 5.39 gezeigt. Durch die Auswahl eines Klebers mit einer passenden Viskosität ergibt sich eine bessere Verkapselung im Anschluss.

Bei der weiteren Prozessierung wird das Gehäuse verschlossen und somit vor störenden Umwelteinflüssen geschützt. Der verkapselte Sensor lässt sich dann auf einen Träger integrieren. Die dann durchgeführten Messungen sind in Kapitel 6 dargestellt.

5.5 Zusammenfassung Prozessierung

Im Rahmen der Prozessentwicklung zur Untersuchung eines neuartigen Messverfahrens für die Flusssensorik gibt es einige Möglichkeiten, um die Ansprechempfindlichkeit und Linearität zu verbessern sowie Messfehler zu minimieren. Ein Hauptbestandteil dieser beinhaltet das Skalieren der Sensorstrukturen durch den Einsatz einer ESL in Verbindung mit trocken-chemischen Ätzverfahren. So wie es das RIE, welches in Abschnitt 5.2.6 beschrieben wurde, darstellt. Eine sukzessive Anpassung dieser Verfahren ermöglicht Abmessungen, welche 100 nm und geringer betragen. Somit wird das thermische Volumen und ergo die thermische Masse verringert, was zu einer erhöhten Sensitivität gegenüber Temperaturdifferenzen führt. Dies wird durch eine Unterätzung der Sensorstrukturen unterstützt.

Die prinzipielle Integrationsmöglichkeit eines Absolutdrucksensors ermöglicht eine modulare Erweiterbarkeit des Systems hinsichtlich einer umfassenden Flussstromanalyse. Vorteile bietet auch das verwendete SOI-Substrat, welches eine monokristalline Siliziummembran bereitstellt und somit eine direkte, monolithische Integration der Ausleseelektronik, wie Messverstärker, angepasste Filter und eventueller Logikelemente, ermöglicht. Weiterhin kann ein SOI-Substrat mit einer vergrabenen Oxidschicht, direkt eine Opferschicht zur Erzeugung einer Kavität eines Absolutdrucksensors genutzt werden.

6 Charakterisierung von thermischen Flusssensor-Prototypen

Nachdem in den vorhergehenden Kapiteln die Modellbildung und Prozessentwicklung eines nanoskaligen Flusssensors beschrieben ist, erfolgt in diesem Kapitel die Zusammenfassung der Charakterisierung elektrischer Eigenschaften von Prototypen verschiedener Flusssensoren. Für die Messreihen mit gasförmigen und flüssigen Medien wird zunächst eine Übersicht zu den relevanten Prüfparametern und Randbedingungen gegeben, gefolgt von der Definition einer experimentellen Messumgebung. Neben der Beschreibung dieser Messumgebung werden auch die angewandten Messmittel aufgelistet. Ein Konzept für einen Messverstärker zur Anpassung der Messsignale wird in Abschnitt 6.3.2 skizziert. Die Messreihen zur Ermittlung des temperaturabhängigen k-Faktors⁵¹ von Sensordioden eines Flusssensors sowie Messreihen mit konstantem Signal, beziehungsweise Leistung am Filament und verschiedenen zeitabhängigen Signalen, werden in Abschnitt zur Messauswertung aufgeführt. Hierbei wird eine stationäre Betrachtung mit einem konstanten Heizsignal am Filament und eine transiente Betrachtung mit zeitabhängigen Signalen vorgestellt. Im darauf folgenden Abschnitt erfolgt eine Zusammenfassung von parasitären Einflüssen, welche bei der Messung zu berücksichtigen sind, wie in Abschnitt 6.3.1 beschrieben ist. Darauf basierend werden Maßnahmen aufgezeigt, welche zur Reduktion von Messfehlern führen.

Eine Charakterisierung eines Absolutdrucksensors mit Pseudo-MOSFET als Ausleseeinheit ist bereits vorhergehenden Arbeiten gezeigt [20, S. 107 ff.] und wird hier nicht weiter ausgeführt.

⁵¹In [mV/K].

6.1 Einflussgrößen bei empirischen Messungen von Flusssensoren

Um eine Messumgebung mit passenden Messmitteln zu konzeptionieren, bedarf es zunächst einer Übersicht der relevanten Prüfparameter mit den dazu gehörigen Randbedingungen. Diese werden abgeleitet von den bereits definierten Einflussfaktoren auf einen thermischen Flusssensor in Abbildung 3.1 aus Kapitel 3. Unterschieden wird hierbei in stationäre Einflussgrößen, aus Abschnitt 6.1 und transiente Einflussgrößen, ebenfalls aus Abschnitt 6.1. Diese sind analog zu den analytischen und auf FEM-basierenden Berechnungen und sollen hier noch einmal zusammengefasst werden. Unterschiede ergeben sich zum Teil durch Limitationen von Messmittelfähigkeiten und Messaufbauten. So wird unter anderem eine experimentelle Betrachtung von gesundheitsgefährdenden Fluiden sowie Blut als Medium in einer experimentellen Umgebung nicht genutzt. Anschließend folgt die Definition einer passenden Messumgebung. [69]

Stationäre Einflussgrößen

Elektrische Einflussparameter sind hierbei im stationärem Fall der Filamentstrom, die Filamentspannung und daraus resultierend die Verlustleistung eines Filaments. Ein konvektiver Fluidstrom wird dabei vernachlässigt und die Messreihen erfolgen unter einer definierten Umgebungstemperatur sowie Umgebungsluft und ruhendem Isopropanol. Hierbei wird ein rein konduktiver Wärmestrom erwartet, welcher einen isotropen Wärmegradienten erzeugt. Dabei wird die eingepreiste Verlustleistung homogen abgeleitet. Zur Ermittlung und Kalibrierung von temperaturabhängigen Nanodioden als Sensorelemente ist eine stationäre Messung in einem Messaufbau mit einer geregelten Heizplatte realisiert. Hierbei werden unterschiedliche Temperaturwerte eingestellt und bis zu einer völligen Erwärmung eines jeweiligen Prototypens abgewartet. Dies ist in Abschnitt 6.3.1 dargestellt. Eine Erfassung des thermischen Einschwingvorgangs ist hierbei nicht relevant und zu vernachlässigen. Somit erfolgt die eigentliche Messung ebenfalls stationär. Eine genaue Beschreibung des Messverfahrens findet sich in Abschnitt 6.2. [97]

Einflussgrößen bei transienten Messungen

Im Falle von transienten Messungen gilt es die jeweiligen Zeitkonstanten der betroffenen Elemente zu berücksichtigen. Dabei sind insbesondere Materialeigenschaften wie Wärmekapazität, Dichte und bei Fluiden eine zeit- und ortsabhängige Fluidgeschwindigkeit zu be-

rücksichtigen. Insgesamt wird die Systembetrachtung im Vergleich zur stationären Messung komplexer und mehrere parasitäre Messeffekte sind relevante Einfluss- und dementsprechend Fehlerfaktoren. Eine präzise Definition der Messumgebung und der eingesetzter Medien ist hierbei unabdinglich und wird im kommenden Abschnitt durchgeführt. [98]

6.2 Messumgebung zur Charakterisierung von Prototypen

Um eine definierte Messung eines Flusssensors zu realisieren bedarf es der Entwicklung einer passenden Messumgebung. Dabei wird unterschieden zwischen einer Vorrichtung zur Analyse von gasförmigen und von flüssigen Medien sowie einem weiteren Aufbau zur Ermittlung des k-Faktors von Sensordioden aus Abschnitt 6.3.1.



Abb. 6.1: Abbildung eines Messrohres für eine Messung mit flüssigen Medien.

Ein Messstand für gasförmige und flüssige Medien wird mittels eines Aluminiumrohres, wie in Abbildung 6.1 dargestellt, welches als Strömungskanal dient, realisiert. Dies bietet die Möglichkeit Medien verschiedener Aggregatzustände zu nutzen, ohne dass diese aus der Messumgebung austreten können, da hier eine hermetische Abdichtung möglich ist. Weiterhin bietet ein metallisches Gehäuse eine Möglichkeit zur Schirmung vor Störsignalen, welche bei einem hochsensiblen Sensor notwendig ist. [99]

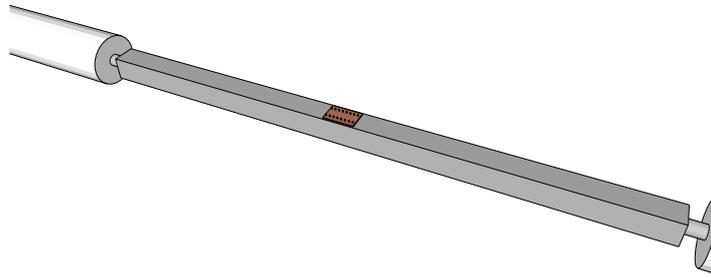


Abb. 6.2: Schematische Darstellung der Messumgebung.

Dabei wird ein Prototyp in eine Öffnung des Rohres eingebaut und kann somit von außen kontaktiert werden. Schematisch ist dies in Abbildung 6.2 dargestellt.

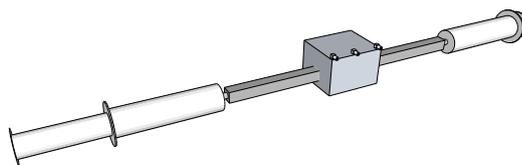


Abb. 6.3: Schematische Darstellung der Messumgebung mit angeschlossenen Spritzen.

Dieser Messstand verfügt initial über einen Referenzsensor der Firma Sensirion⁵². Dieser wird in Reihe zu dem Strömungskanal mit den experimentellen Prototypen angeschlossen und dient zur simultanen Messung der Flussgeschwindigkeit. Somit wird eine direkte Vergleichbarkeit der Messwerte realisiert. Um einen definierten Fluss zu erzeugen wird ein Mass-Flow-Controller (Massefluss-Regler) vorgeschaltet. Dieser Messaufbau wird über das Softwaretool LabVIEW angesteuert und die Messwerte werden ebenfalls darüber erfasst. Aufgrund parasitärer Messsignale wird der Messstand für weitere Versuchsreihen angepasst, sowie in Abschnitt 6.1 aufgeführt. So wird der Messstand für eine erste Signalerzeugung auf ein Minimum reduziert, die Sensorprototypen in ein Dual in-line Package geklebt und über Messleitungen vermessen, wie in Abbildung 6.3 skizziert. Weiterhin folgt anschließend eine Substitution der manuellen Spritzen durch eine elektrische Pumpe. [22]

⁵²Hier das Modell "MF1".

6.3 Verhalten einzelner Sensor-Prototypen

Nach grundlegender Entwicklung und Verbesserung der technologischen Prozessschritte werden in mehreren Versuchsreihen Prototypen der einzelnen Sensoren hergestellt. Diese werden zunächst als Chip mittels eines Spitzenmessplatzes direkt über die Metallkontakte vermessen. Dabei kann eine erste quantitative Aussage über das elektrische Verhalten getroffen werden und bereits eine weitere Anpassung des technologischen Prozessablaufs erfolgen. Dies geschieht bevor eine umfangreiche Aufbau und Verbindungstechnik, wie in Abschnitt 5.3 dargestellt, stattfindet. Weiterhin kann die Temperaturabhängigkeit der pn-Nanodioden von Flusssensoren bereits mittels eines geeigneten Messaufbaus analysiert werden, wie im folgendem Abschnitt gezeigt.

Bevor eine Charakterisierung von Prototypen in einem fluidischen Messmedium erfolgen kann, ist eine Erfassung des k-Faktors der Sensordioden notwendig. Dargestellt wird das in Abschnitt 6.3.1. Danach wird im Rahmen dieser Arbeit eine Charakterisierung von Durchflusssensoren durchgeführt. Dies ermöglicht eine Untersuchung der einzelnen Sensorprinzipien.

6.3.1 Ermittlung des k-Faktors von thermischen Sensordioden

Um eine Interpretation der Messsignale zu bekommen, bedarf es zunächst der Ermittlung des k-Faktors in den Sensordioden.

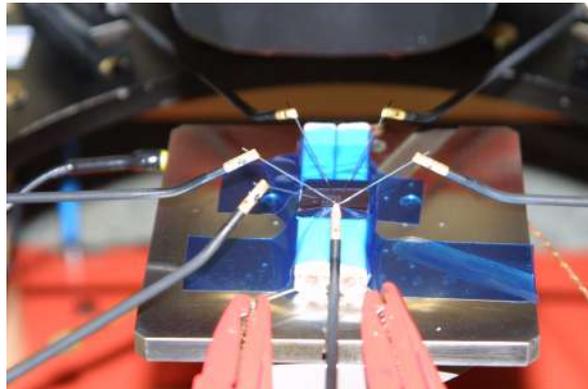


Abb. 6.4: Darstellung eines Messaufbaus zur Kalibrierung des k-Faktors der Sensordioden. Ein Leistungswiderstandsverbund liefert die thermische Verlustleistung zur Realisierung einer definierten Temperatur.

Dabei wird über eine definierte Widerstandsheizung eine einstellbare Heizquelle realisiert, welche eine vorgegebene Temperatur an den Nanodioden einstellt. Wie in Abbildung 6.4

dargestellt, wird eine Kalibration der Messdioden durch Ermittlung des temperaturabhängigen k-Faktors realisiert. Hierzu wird eine Verlustleistung an einem Lastwiderstand eingestellt, welche eine Temperatur in das System einprägt. Über ein separates Thermoelement wird die eingestellte Temperatur gemessen, so wie in Abbildung 6.5 gezeigt. Sie wird jeweils für verschiedene Temperaturwerte 5 min gehalten. Dann wird zu einem vordefinierten Strom die Spannung an der Diode erfasst.

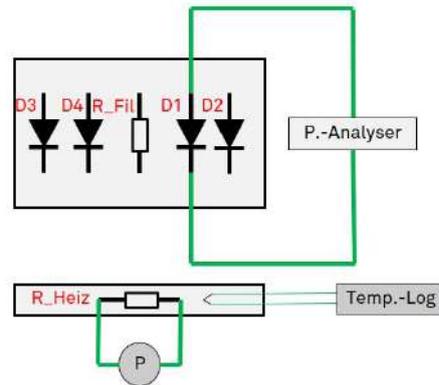


Abb. 6.5: Schematische Darstellung eines Messaufbaus zur k-Faktor Ermittlung von Sensordioden.

Schematisch ist dies in Zeichnung 6.5 gezeigt. Wo die Heizwiderstandsvorrichtung (R_{Heiz}), ein dazugehöriger Temperaturlogger ($Temp. - Log$ ⁵³) zur Erfassung der Temperatur an dem Prüfling und der Prüfling selber mit dazugehöriger Quelle ($P. - Analyser$ ⁵⁴) abgebildet sind. Über eine Steigung der Kennlinie kann ein jeweiliger k-Faktor ermittelt werden, wie in Abbildung 6.6 dargestellt. Hierbei wird zur Charakterisierung eines thermischen Flusssensors die thermische Ansprechempfindlichkeit einer einzelnen pn-Diode vermessen und analysiert. In diesem Fall betragen für den Prototyp die Dotierstoffvolumenkonzentrationen für das n-dotierte Gebiet $N_D = 10^{19} \frac{1}{cm^3}$ und für das p-dotierte Gebiet $N_A = 10^{18} \frac{1}{cm^3}$. Dabei kann festgestellt werden, dass es hierbei eine maximale thermische Ansprechempfindlichkeit von bis zu $-4 \frac{mV}{K}$ erfassen lässt.

Um eine transiente Messung zu ermöglichen, gilt es einen umfassenderen Messstand zu nutzen, wie in Abschnitt 6.2 beschrieben.

⁵³Temp.-Log. = Temperaturlogger.

⁵⁴P.-Analyser = Parameteranalyser.

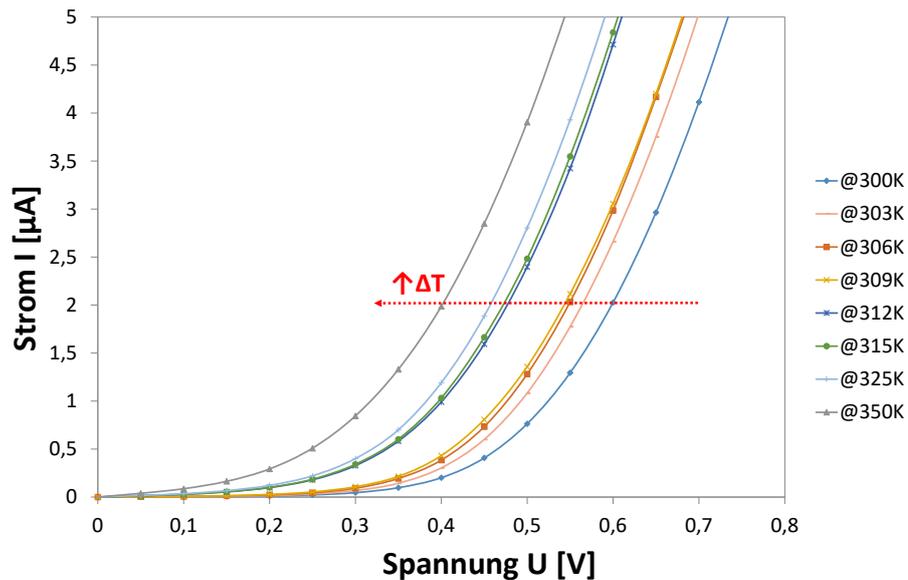


Abb. 6.6: Charakterisierung der Temperaturabhängigkeit einer Sensordiode des thermischen Flusssensors.

Parasitäre Messeinflüsse

Bei den Messungen von mikrofluidischen System sind mehrere parasitäre Messeinflüsse zu berücksichtigen. Insbesondere eine erhöhte Elektro-Magnetische-Störeinkopplung beeinträchtigt die Messsignale wesentlich, sofern es nicht weitgehende Abschirmmaßnahmen gibt. Auch ein nicht umfassend beobachtbares Strömungsverhalten eines Fluidstroms führt zu ungewollten Einflüssen bei einer Messung. Ein thermisch basierendes Messsystem kann außerdem parasitäre Wärmepfade beinhalten, bei denen ein prozentualer Anteil der zu erfassenden Wärmemenge auf andere Wärmepfade abgeführt wird. Dabei variiert die Amplitude der Messsignale in Abhängigkeit der thermischen Signalstärke. Dies gilt es bei der Erfassung der Hitzepakte mit den Messdioden zu berücksichtigen. Hierbei zeigt sich auch eine geeignete Erdung der Messumgebung und der verschiedenen Messkomponenten als relevante Einflussgröße. Es zeigt sich, dass ein gemeinsamer Massepunkt aller zu erdenen Signale erhebliche Vorteile hinsichtlich der Reduktion von Störeinflüssen bringt. Andernfalls ergibt sich ein erhöhtes Einkoppeln von Störsignalen, welche um mehrere Dimensionen größer sind als die Messsignale.

6.3.2 Konzept einer Ausleseschaltung

Da die erfassten Messsignale von wenigen Nanoampere nicht geeignet sind, um eine direkte Auslesung zu gewährleisten, wird ein Konzept entwickelt, diese reproduzierbar auslesen und elektrisch verarbeiten zu können. [100] Dazu wird zunächst eine Schaltungssimulation durchgeführt. Diese Schaltung ist in Abbildung 6.7 dargestellt. Die Diode D1 in der Schaltung symbolisiert eine der Detektordioden des thermischen Flusssensors und mit dem OP U1 wird der Arbeitspunkt eingestellt. Dabei sind die Widerstände R2 und R3 als Spannungsteiler vorgesehen, damit die Eingangsspannung am nicht-invertierten Eingang des OP U1 166 mV beträgt. Somit beträgt der Strom durch die Diode D1 konstant 830 nA . Dies ergibt einen bevorzugten Arbeitspunkt für die Diode, sodass eine Spannungsänderung in Abhängigkeit der Umgebungstemperatur (in $\Delta \frac{\text{mV}}{\text{K}}$) erfasst wird. Diese wird wiederum durch den Instrumentenverstärker U2 mit einem Faktor 11 verstärkt und über eine Offsetspannung von $-5,178\text{ V}$ reduziert. Somit ergibt sich im Falle einer Umgebungstemperatur von $T = 300\text{ K}$ eine Ausgangsspannung V3 von 0 V .

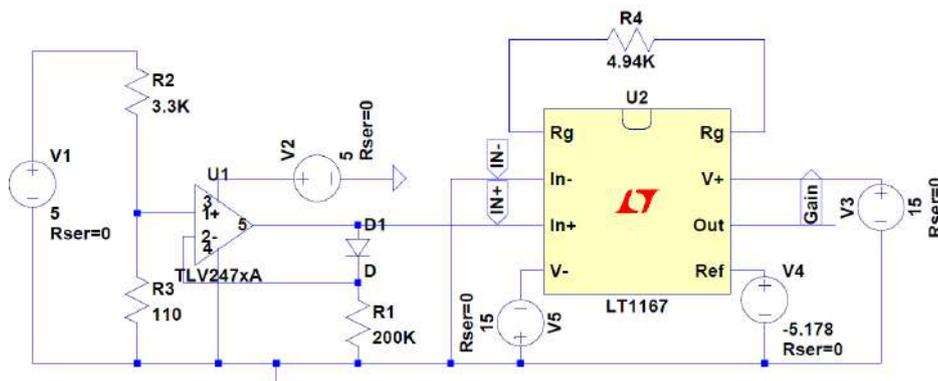


Abb. 6.7: Ausleseschaltung für einen thermischen Flusssensor als SPICE-Modell

Durch eine Temperaturänderung an der Diode D1 wird diese Ausgangsspannung variiert, sodass eine Messung möglich wird.

6.4 Charakteristik von Prototypen

Nach einigen Iterationsschritten hinsichtlich Entwicklung der Sensorstruktur und von einem Messstand zur Charakterisierung eines Prototypens unter Flussbedingungen ergibt sich ein plausibles Messsignal. Dabei wird eine annähernd lineare Abhängigkeit zwischen Flussgeschwindigkeit und Messsignal, hier eine Differenzspannung zwischen zwei Dioden in

Flussrichtung ersichtlich.

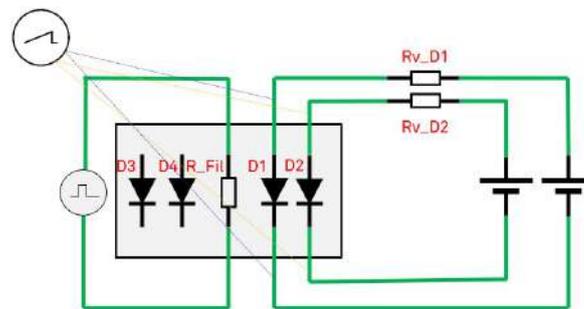


Abb. 6.8: Schematische Darstellung einer Ausleseschaltung zur Charakterisierung von Prototypen

Dies untermauert die theoretischen Annahmen aus Kapitel 3 und Simulationsergebnisse aus Abschnitt 4.

Tab. 6.1: Dimensionen und Materialparameter eines Flusssensor-Prototypen

Schichtdicke von Filament und Sensordioden	95 nm
Breite Filament	800 nm
Breite Dioden (sensitiver Bereich)	100 nm
Länge Dioden/Filament (sensitiver Bereich)	1 μm
potenzielle P-Dotierung Dioden	$10^{18} \frac{1}{\text{cm}^3}$
potenzielle N-Dotierung Dioden	$10^{19} \frac{1}{\text{cm}^3}$
elektrischer Widerstand Filament	9 k Ω
Schichtdicke Dielektrikumsschicht unter Sensorebene	1 μm

In Tabelle 6.1 sind Dimensionen und Materialparameter eines Flusssensor-Prototypen zusammengefasst.

In Abbildung 6.9 ist ein entsprechender Plot mehrerer Messreihen gezeigt. Er bildet eine Mittlung aus insgesamt 50 Messwerten, welche eine Glättung der Messkurven bewirkt. Es wird hierbei ein Rechtecksignal mit einem Spitzenwert von +30 V an einem externen Heizdraht erzeugt, da das eigentliche Filament keine ausreichenden Signalhübe ermöglicht. Dieses Signal wird für 1,2 s angelegt und bedingt somit einen Wärmeimpuls, der eine momentane Verlustleistung (P_v) von 3 W beinhaltet.

Insgesamt zeigt sich eine Flussabhängigkeit des thermisch generierten Hitzeimpulses hin zu der flussabgewandten Seite, was eine anemometrische und TToF-Funktionsweise des hier gezeigten, thermisch basierten Flusssensors grundlegend belegt.

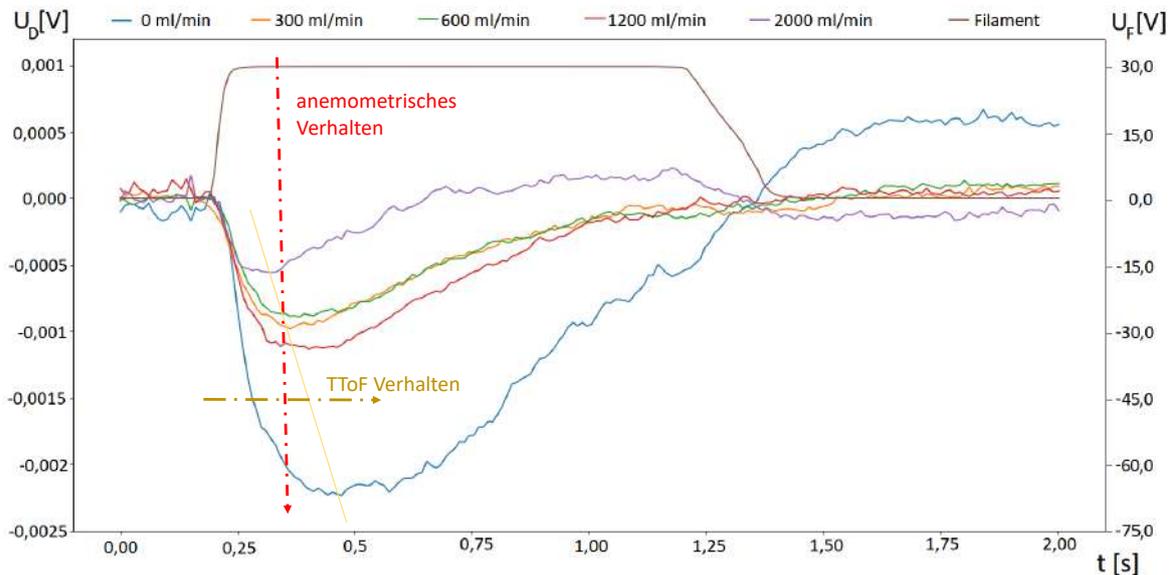


Abb. 6.9: Darstellung einer Messreihe eines Flusssensorprototypen

Im Detail zeigt sich eine thermische Erhöhung mit unterschiedlichen Amplituden bei verschiedenen Flussgeschwindigkeiten. Je höher die Flussgeschwindigkeit des Fluides, desto kürzer der Temperatureinfluss an den Dioden. Dabei zeigt sich insbesondere ein Einfluss bei einer Fließgeschwindigkeit in der Höhe von 2000 ml/min . Die Messgenauigkeit ist jedoch begrenzt durch parasitäre Einflüsse und die Notwendigkeit einer angepassten Messschaltung wird deutlich. Im Vergleich ist ein Verhalten der Amplituden zu beobachten, welches insbesondere ein anemometrisches Messverfahren ermöglicht, da hier die gemessene Spannungsdifferenz wesentlich größer ist.

6.5 Zusammenfassung der Messergebnisse

Die Messergebnisse verdeutlichen, dass thermische Messverfahren mit mikro- bis nanoskaligen Strukturen mit Einschränkungen geeignet sind, um eine Flussgeschwindigkeit von einem umströmenden Medium zu erfassen. Es ist evident, dass ein Filament mit zu geringen Abmessungen nur bedingt eine ausreichende thermische Verlustleistung produziert, um ein Heizpaket zur Triggerung der Nanodioden zu erzeugen. Eine thermische Anemometrie offenbart sich hierbei als besser geeignetes Verfahren. Insgesamt ergeben sich dadurch weitere

Notwendigkeiten, wie eine Anpassung der Skalierung des Filaments. Deswegen werden im Rahmen dieser Arbeit bei einigen Messreihen die Hitzepakete durch einen externen Heizdraht erzeugt. Dadurch werden die verschiedenen Funktionsweisen des Sensorprinzips visualisiert. Allerdings ist eine Erfassung der Messsignale geprägt durch verschiedenste parasitäre Messeinflüsse. Diese bedingen eine definierte Schirmung gegenüber elektrischen Störeinflüssen sowie eine ausreichende Erdung zur Vermeidung der Einkopplung von Störsignalen über eine Masseschleife. Insgesamt kann ein Einsatz eines passenden Messverstärkers mit entsprechender Filterung zielführend sein. In einer weiteren Iterationsstufe ist also eine Integration eines solchen Messverstärkers sehr empfehlenswert. Weiterhin sind die Nanodioden äußerst fragil und neigen bei einer hohen thermischen, elektrischen oder mechanischen Spannung zu einer Deformation bis hin zu ihrer Zerstörung.

6.6 Vergleich zum aktuellen Stand der Technik

Im Vergleich mit anderen Arbeiten zeigt sich die aktuelle Relevanz von thermischen Flusssensoren, welche auf CMOS und MEMS Technologie basieren. Dies ist unter anderem in Veröffentlichungen von Ashauer et al. [48], Adamec et al. [38], Berthet et al. [34] und Saremi et al. [51] aufgeführt. Bei diesen Sensoren werden ebenfalls Verfahren und Prozesse der Halbleitertechnologie genutzt, um Skalierungseffekte anzuwenden. Das dominierende Messverfahren für Flusssensoren ist hierbei die thermische Anemometrie.

Im Detail zeigt sich bei dem Konzept von Ashauer et al. [48] eine Realisierung von mikroskalierten Sensorstrukturen, wobei, je nach Modell, das Heizelement eine Weite von $5 \mu\text{m}$ und mehr aufweist. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit vorgestellten Modell, sind dementsprechend die Strukturabmessungen um mehrere Zehnerpotenzen größer. Kleinere Strukturabmessungen ermöglichen dabei eine erhöhte Packungsdichte von Sensoren und sind geeignet, um geringere Fluidmengen zu messen. Das ist über eine erhöhte Ansprechempfindlichkeit der Strukturen gegeben, da die Sensorelemente eine geringere Masse aufweisen. Bei dem Konzept von Ashauer et al. wird ebenfalls das anemometrische und TToF-Verfahren untersucht. Es zeigt sich, dass auch hierbei die Signalerzeugung am Filament eine elementare Herausforderung für diese thermischen Verfahren herausstellt. Die These, dass eine Ausleseschaltung mit passenden Filtern und Verstärkern notwendig ist, wird dadurch verdichtet. Im Rahmen dieser Arbeit ist solch eine in Abschnitt 6.3.2 gezeigt. Weiterhin ist in der Arbeit von Ashauer et al. ebenfalls ein Übersprechen der Signale an den Thermocouples aufgetreten. Vergleichbare Effekte können hier bestätigt werden. Diese zeigen sich auf der Kennlinie in Abbildung 6.9. Zusammenfassend bestätigt es die Annahme, dass nanoskalierte Strukturen vorzugsweise für ein anemometrisches Verfahren geeignet sind.

Ein weiteres Multisensorsystem auf SOI-Basis ist in einer Veröffentlichung von M. Mansoor et al. dargestellt [49] und nutzt ebenfalls ein SOI-Substrat. Im Kern ist das Konzept des Sensorsystems vergleichbar, da hierbei auch ein konventioneller CMOS-Prozess genutzt wird. Im Vergleich wird in dem in dieser Arbeit vorgestellten Konzept erneut eine Skalierung der Strukturen mittels Elektronenstrahlithografie ermöglicht und die Heizelemente sind aus dotiertem Silizium, während M. Mansoor et al. einen Aluminiumdraht als Flusssensor nutzt. Weiterhin kommt zusätzlich ein DRIE-Prozess zur Rückseitenfreitätzung zum Einsatz. Dadurch wird das Bulk-Substrat manipuliert. Dies bedingt einen zusätzlichen Prozessschritt und führt zu einer höheren thermischen Ansprechempfindlichkeit der Sensorelemente. In dieser Arbeit wird dies durch eine isotrope Ätzung der BOX-Schicht realisiert. Dadurch ergeben sich freischwebende Sensorstrukturen und das Bulk-Substrat wird nicht beeinträchtigt. Somit wird ein komplexer Prozessschritt mit einer zusätzlichen Technologie obsolet. Eine Kombination der hier vorgestellten Arbeit mit der von M. Mansoor bringt weitere Möglichkeiten zur Skalierung des Systems.

Von Huang et al. wird ein weiteres Flusssensorkonzept beschrieben [50]. Es zeigt vergleichbare Vorteile, wie bereits bestehende Verfahren. Durch die Strukturgrößenlimitierung der genutzten Lithografieprozesse ist hierbei ebenfalls keine maximale Skalierung möglich und damit ergeben sich, im Vergleich mit diesem Verfahren, die bereits beschriebenen Vorteile von nanoskaligen Strukturen.

Zusammenfassend bestätigt der Vergleich mit anderen Messverfahren, dass eine Skalierung bei einem anemometrischen Messverfahren insbesondere den Vorteil einer erhöhten Ansprechempfindlichkeit der Sensorelemente bietet. Dagegen zeigt ein TToF-Verfahren, insbesondere wegen der geringen Signalstärken, welche aus der geringen Masse des Heizfilaments resultieren, einen signifikanten Nachteil. Dieses Verfahren bietet sich erst bei einer Anpassung der Ausleseschaltung an. Der Ansatz einer Skalierung mittels Elektronenstrahlithografie ist in vorherigen Arbeiten bisher nicht dargestellt und bietet durch diese Arbeit neue Erkenntnisse, wie ein erhöhtes Ansprechverhalten der Sensoren, bezüglich der Skalierungsmöglichkeiten von Flusssensoren. Die Unterätzung einer Siliziumschicht des SOI-Substrates, um freischwebende Sensorelemente zu erzeugen, bietet eine weitere Möglichkeit, die thermische Ansprechempfindlichkeit zu erhöhen. In vorhergehenden Arbeiten ist dies bisher nicht aufgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aus dieser Arbeit erfolgt im nächsten Kapitel.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Sensorsystem dient zur Untersuchung von Grenzbereichen der Mikrofluidik. Für diese sind makroskopische Systeme nicht oder nur bedingt geeignet. Sie erfolgt durch eine Skalierung hin zu sub-100 *nm* Strukturen mittels Halbleitertechnologieprozesse, wie ESL und Trockenätzverfahren⁵⁵.

Das Sensorsystem besteht aus zwei Sensoren, einem thermischen Flusssensor und einem Absolutdrucksensor. Der untersuchte thermische Flusssensor besteht aus fünf Sensorelementen. Das mittlere ist ein n-dotiertes Silizium-Filament, welches zur Erzeugung einer Temperaturerhöhung und eines Heizpakets dient. Dieses wird flankiert von zwei Silizium-Diodenpaaren, welche als Wärmedetektoren fungieren und jeweils in und entgegen der Flussrichtung des Filaments platziert sind. Beide Sensoren werden dabei auf ein SOI-Substrat integriert, wobei die oberste Siliziumschicht die Sensorelemente beinhaltet. Das vergrabene Oxid unter dieser Schicht bildet, nach einer nasschemischen Strukturierung, den Fluidkanal. Dieser bildet sich unter den Sensorelementen des Flusssensors aus und bedingt deren Freistellung. Der beschriebene Prozess führt zu einer größeren Oberflächenschnittstelle mit dem umgebenen Fluid. Der thermische Flusssensor wird hinsichtlich des anemometrischen und Thermal Time of Flight (TToF)-Messverfahrens analysiert. Es lässt sich zeigen, dass durch die Skalierung das anemometrische Messverfahren Vorteile bei der thermischen Ansprechempfindlichkeit bietet, da die zu erwärmende Masse verringert wird. Dagegen offenbart ein thermisches Laufzeitverfahren⁵⁶ durch eine Minituarisierung der Strukturen wesentliche Defizite. Die durch das Filament erzeugten Heizpakete entwickeln dabei eine nur geringfügig ausreichende Temperaturerhöhung an den Sensordioden. Dementsprechend gilt es eine Skalierung der Strukturen, insbesondere des Filaments, für dieses Verfahren anzupassen. Sofern dies gegeben ist, lässt sich auch grundlegend eine Nutzbarkeit dieses Verfahrens zeigen. Dies ist in einer Messreihe in Diagramm 6.9 gezeigt.

Eine statistische Versuchsplanung mit Prototypenentwicklung beinhaltet eine umfassende Multiparametervariation. Deswegen gilt es zunächst, analytische und computergestützte Berechnungen durchzuführen. Dies ermöglicht eine erste Abschätzung und somit Startpunkte

⁵⁵Einem sogenannten RIE.

⁵⁶Das TToF-Verfahren.

für eine Parameteranpassung bei einer Sensorentwicklung. Hierbei werden Parameter, wie ein thermo-elektrisches Verhalten unter Flussbedingung, unter anderem mit Wasser als umströmendes Medium sowie Strömungsprofile analysiert. Bei transienten Vorgängen dieser Art sind insbesondere numerische Berechnungen, wie eine FEM-Simulation anwendbar. Weitere Berechnungen hinsichtlich Temperaturhub an einem Heizfilament und Sensordioden in Flussrichtung in Abhängigkeit von Strömungsgeschwindigkeit und Spannungsimpuls zeigen je bis zu 10 K Temperaturerhöhung an jedem Element, sofern ein Spannungsimpuls von mindestens $2,5\text{ V}$ angelegt wird. Weiterhin sind Variationen von Abständen der Elemente zueinander dargestellt. Dabei ist exemplarisch eine Variation des Abstandes der Sensordioden von dem Filament von $5\text{ }\mu\text{m}$ und $2\text{ }\mu\text{m}$ gezeigt. Somit zeigen sich eine thermische Anemometrie und ein TToF-Verfahren als potentielle Messmethoden, welche in weiteren experimentellen Versuchsreihen evaluiert werden.

Mit computergestützten Hilfsmitteln zur Berechnung von Diffusionsprozessen lässt sich weiterhin das thermische Ansprechverhalten von Sensordioden untersuchen. Dazu wird die Software TCAD genutzt und es ergibt sich bei einer Anpassung der Dotierstoffkonzentrationen ein thermisches Ansprechverhalten der Dioden von $-1,167\text{ mV/K}$. Dieses ergibt sich bei einem Strom von $1\text{ }\mu\text{A}$ und einer p-Volumenkonzentration von $3,471 \cdot 10^{17}\text{ cm}^{-3}$ sowie einer n-Volumenkonzentration von $1,339 \cdot 10^{18}\text{ cm}^{-3}$.

Um die berechneten Werte zu verifizieren folgt darauf basierend eine experimentelle Untersuchung von Prototypen. Ein elementarer Bestandteil dieser ist die Entwicklung von Halbleitertechnologieprozessen, welche hinsichtlich der mikro- und nanoskaligen Sensorstrukturen angepasst werden. Durch umfassende experimentelle Versuchsreihen mit Proben aus SOI und Silizium werden dabei insbesondere ESL- und Trockenchemieätzprozesse durch Parametervariation eingestellt. Eine Herausforderung ist dabei die Entwicklung von *sub* – 60 nm breiten Siliziumstegen, welche eine finale Länge von $2\text{ }\mu\text{m}$ haben. Weiterhin ist eine Unterätzung dieser Strukturen mit Flusssäure zur Erstellung eines Fluidkanals, ein zusätzlicher und kritischer Prozessschritt. Dabei gilt es unterschiedliche Parameter zu berücksichtigen, wie die chemische Zusammensetzung des eingesetzten, elektronenstrahlempfindlichen Fotolackes sowie dessen Applikation mittels einer Lackschleuder. Hier gilt es weitere Parameter, wie Beschleunigung, Drehzahl und Spin-Dauer anzupassen. Für den ESL-Prozess sind Parameter, wie Belichtungsdauer, Elektronenstrahlstrom und Energie zu berücksichtigen. Eine Anpassung dieser komplexen Prozesse führt letztendlich zu Prototypen des Sensorsystems auf einem Siliziumchip.

Eine weitere Anforderung, insbesondere bei (mikro-)fluidischen Sensoren, ist die Integration in ein passendes Gehäuse, um eine Auswertung in einem Messmedium zu ermöglichen. Dazu wird hier ein Aluminium-DIL-Träger genutzt, auf den die Siliziumprobe geklebt wird. Anschließend folgt ein passender Thermokompressions-Bondprozess, um die Signale von

den Sensorstrukturen auf die Pins zu führen. Final erfolgt eine Untersuchung von verschiedenen Klebstoffen, um einen geeigneten Schutz für die Bonddrähte zu gewährleisten. Ein Resultat dieser Untersuchung zeigt, dass die hier gewählten Medien eine Viskosität von ca. $10000 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ aufweisen müssen. Ansonsten ergeben sich Abrisse in den Bonddrähten und eine Funktion des Sensors kann nicht mehr gewährleistet werden. Ein zweikomponentiges Epoxydharz weist hierbei passende Eigenschaften auf.

Um die Prototypen zu charakterisieren wird eine passende Messumgebung entwickelt. Dabei ist ein Messaufbau zur Charakterisierung der Dioden notwendig, welcher über einen Heizwiderstand und Spitzenmessplatz ermöglicht wird. Hier wird die gesamte Probe auf verschiedene Temperaturen erhitzt und nach einem Einschwingvorgang mit einem definierten Arbeitspunkt vermessen. Über den ermittelten Temperaturgradienten lässt sich anschließend der K-Faktor ermitteln. Dieser beträgt hier im Median $-1,3 \text{ mV/K}$. Die Kalibrierung wird für jeden Prototypen individuell durchgeführt, da der K-Faktor, abhängig von der Dotierung, variabel ist. Im Rahmen dieser Messreihe erfolgt zusätzlich eine Kontrolle der Funktionalität der jeweiligen Prototypen.

Mit den Kalibrationskurven erfolgt die eigentliche Messung in der Fluidischen Messumgebung. Dies dient zur Analyse des Einflusses der Skalierung auf die Sensorstrukturen hinsichtlich thermischer Messverfahren. Bei einem dieser Messverfahren, der thermischen Anemometrie, wird die thermische Ausbreitung einer konstanten Temperaturerhöhung an dem Filament über die Sensordioden gemessen. Während ein weiteres Verfahren, das TToF, die Laufzeit eines Temperaturimpulses von dem Filament an den Diodenpaaren misst. Die zeitliche Differenz ergibt dann die Flussgeschwindigkeit. Im Rahmen dieser Untersuchung werden mehrere Medien unter Raumtemperatur analysiert: gasförmige Medien Stickstoff und Argon und flüssige Medien Isopropanol und VE-Wasser. Die Messungen von gasförmigen Medien zeigen unter unterschiedlichen Konfigurationen⁵⁷ keine verwertbare Kennlinie. Messreihen mit flüssigen Medien, wie mit Isopropanol, zeigen hierbei eine deutlich bessere Ausprägung der Signale und ermöglichen insbesondere eine Erfassung der Flussgeschwindigkeit mittels einer thermischen Anemometrie.

Für zukünftige Anwendungen ergeben sich bei der Signalauswertung mittels des Heizfilaments Potentiale. Hier ist eine Verbesserung der Erzeugung von Hitzepaketten zur besseren Signalerfassung sinnvoll. Dabei können auch alternative Signalformen eine Lösungsmöglichkeit sein⁵⁸. Dies sollte auch bei der Integration eines Absolutdrucksensors berücksichtigt werden.

⁵⁷Wie die Variation der Abstände der Dioden zum Filament.

⁵⁸Wie unter anderem sinus-förmige Eingangssignale.

Betreute Abschlussarbeiten

Master- und Diplomarbeiten

- „Simulation und Entwicklung eines neuartigen Sensorsystems zur biomedizinischen Fluidanalyse“, Diplomarbeit, vorgelegt am 27.09.2013 von Michael Wieker
- „Three dimensional Simulation and Analysis of a nanoscale Thermal Time-of-Flight Sensor based on Finite Volume Method“, Masterarbeit, vorgelegt am 15.10.2014 von Anand Patel
- „Entwurf, Herstellung und Charakterisierung eines neuartigen Sensorsystems zur Fluidanalyse“, Masterarbeit, vorgelegt am 13.12.2014 von Michael Steglich
- „Entwicklung eines innovativen Sensorsystems zur Druck- und Flusserfassung auf einem Silicon-on-Insulator Substrat“, Masterarbeit vorgelegt am 13.11.2015 von Christian Leismann

Bachelor- und Studienarbeiten

- „Modellbildung und Simulation eines nanoskaligen Thermal Time of Flight Sensors“, Studienarbeit, vorgelegt am 25.03.2013 von Michael Wieker
- „Simulation eines nanoskaligen Thermal Time-of-Flight-Sensors auf Basis der Finite-Elemente-Methode“, Bachelorarbeit, vorgelegt am 16.07.2013 von Jonas Gerwin
- „Simulation der mechanischen Belastbarkeit eines nanoskaligen Thermal Time of Flight Sensors durch bewegte Fluide“, Bachelorarbeit, vorgelegt am 14.11.2014 von Gina Frackmann
- „Optimierte Elektronenstrahlolithographie-Prozesse für die Herstellung von Nano - Dioden“, Bachelorarbeit, vorgelegt am 19.01.2015 von Philipp Ulrich Lilienthal
- „Optimierung des thermischen Ansprechverhaltens einer Sensordiode mittels Modellbildung und technologischer Simulation“, Bachelorarbeit, vorgelegt am 29.05.2015 von Andreas Kiesel
- „Integration eines neuartigen Nanoflussensors mittels 3D-Packaging“, Bachelorarbeit, vorgelegt am 29.06.2015 von Björn Polenz

Projektgruppe

- „Entwicklung und Aufbau eines Messplatzes zum Testen eines neuartigen Flusssensors“, Projektgruppe, vorgelegt am 01.10.2013 von Patrick Langosch, Emre Ecik, Felix Schönfelder, Jakob Zimmermann, Mejdı Mansouri und Stefan Scholz

Oberseminare

- „Stand der Forschung und Technik von (Mikro-)Flusssensoren“, Oberseminar, vorgetragen am 14.12.2016 von Muyang Lu
- „Thermische Flusssensoren“, Oberseminar, vorgetragen am 14.12.2016 von Hendrik Schuh
- „Einführung Nanosubmarines Teil 1“, Oberseminar, vorgetragen am 20.10.2016 von Matthias Hermann
- „Einführung Nanosubmarines Teil 2“, Oberseminar, vorgetragen am 20.10.2016 von Melanie Budke
- „Sensoren unter extremen Umweltbedingungen“, Oberseminar, vorgetragen am 28.01.2016 von Michael Tophinke
- „Industrie 4.0: Der Smart(e) Cleanroom von morgen“, Oberseminar, vorgetragen am 10.12.2015 von Timo Horschak
- „Industrie 4.0 - Die vierte industrielle Revolution“, Oberseminar, vorgetragen am 10.12.2015 von Gina Frackmann
- „Industrie 4.0: Die wichtige Rolle von MEMS-Sensoren“, Oberseminar, vorgetragen am 03.12.2015 von Kunyuan Zhang
- „Nanotechnologie - Eine Querschnittstechnologie“, Oberseminar, vorgetragen am 15.05.2013 von Sascha Tolksdorf
- „Beschleunigungssensoren - Gestern, Heute und Morgen“, Oberseminar, vorgetragen am 15.05.2013 von Timo Eggers
- „Energiesparkonzepte für Wireless Sensor Nodes“, Oberseminar, vorgetragen am 01.03.2013 von Daniel Merget

Eigene Veröffentlichungen

Bücher, Zeitschriften, Tagungsbeiträge

- Sven Ebschke; Jakob Zimmermann; Achim Wiggershaus; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Test environment for characterization of a nanoscale sensor system consisting of fluid flow sensors based on the Thermal-Time-of-Flight (TToF) principle and absolute pressure sensors“. In: Proceedings of the 2014 IEEE Sensors Conference, S. 1340-1343.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwin; Andre Löchte; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Charging effects on SOI based NEMS by the example of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor“. In: Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Nanotechnology, 2014, S. 785-788.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Konzept eines nanoskaligen Sensorsystems zur simultanen Erfassung von Druck und Flussgeschwindigkeit in Fluiden“. In: ITG Fachbericht 250 zur 17. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme, 2014.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis. „Beides gleichzeitig messen: Nanoskaliger Kombisensor zur simultanen Erfassung von Gasdruck und Gasfluss“. In: chemie&more. Bd. Vol. 3.14, 2014, S. 10-12.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Creating a Monocrystalline Membrane via Etching and Sealing of Nanoholes Considering its Sealing Behavior“. In: Journal of Nano Research Vol. 25, 2013, S. 49-54.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „A monocrystalline absolute pressure sensor with a pseudo-MOSFET read-out device for life-science applications“. In: Proceedings of the IEEE Sensors Conference, 2013, S. 1-4.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Planar technology integration of monocrystalline Silicon-membranes using nanoholes“. In: Proceedings of the 13th IEEE International Conference on Nanotechnology, 2013, S. 1111-1114.

Vorträge auf internationalen Tagungen

- Sven Ebschke; Jakob Zimmermann; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Towards a nanoscale sensor system for intra-arterial simultaneous blood flow and pressure measurement“. EnFI 2015 Conference, Hannover, Deutschland, 2015.
- Sven Ebschke; Jonas Gerwinn; Anand V. Patel; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Modelling and Simulation of a Thermal-Time-of-Flight (TToF) Sensor for measuring the blood flow velocity“. BMT 2014 - 48th DGBMT Annual Conference, Hannover, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Maximilian Mühlbauer; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Optimization of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor by using electronbeam lithography (EBL)“. Workshop Ionenstrahl & Nanostrukturen, Paderborn, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwinn; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Nanoscale thermal-time-of-flight sensor for measuring blood flow velocity“. 10th International Nanotechnology Symposium, Dresden, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Konzept eines nanoskaligen Sensorsystems zur simultanen Erfassung von Druck und Flussgeschwindigkeit in Fluiden“. 17. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme, Nürnberg, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „A monocrystalline absolute pressure sensor with a pseudo-MOSFET read-out device for life-science applications“. IEEE Sensors Conference, Baltimore, Maryland, U.S.A., 2013.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Planar technology integration of monocrystalline Silicon-membranes using nanoholes“. 13th IEEE International Conference on Nanotechnology, Peking, China, 2013.

Posterbeiträge auf internationalen Tagungen

- Sven Ebschke; Jakob Zimmermann; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Towards a nanoscale sensor system for intra-arterial simultaneous blood flow and pressure measurement“. EnFI 2015 Conference, Hannover, Deutschland, 2015.
- Sven Ebschke; Jakob Zimmermann; Achim Wiggershaus; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Test environment for characterization of a nanoscale sensor system consisting of fluid flow sensors based on the Thermal-Time-of-Flight (TToF) principle and absolute pressure sensors“. IEEE Sensors Conference, Valencia, Spanien, 2014.

- Sven Ebschke; Jonas Gerwinn; Anand V. Patel; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Modelling and Simulation of a Thermal-Time-of-Flight (TToF) Sensor for measuring the blood flow velocity“. BMT 2014 - 48th DGBMT Annual Conference, Hannover, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwinn; Andre Löchte; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Charging effects on SOI based NEMS by the example of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor“. 14th International IEEE Conference on Nanotechnology, Toronto, Kanada, 2014.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Maximilian Mühlbauer; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. Optimization of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor by using electronbeam lithography (EBL). Workshop Ionenstrahl & Nanostrukturen, Paderborn, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwinn; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Nanoscale thermal-time-of-flight sensor for measuring blood flow velocity“. 10th International Nanotechnology Symposium, Dresden, Deutschland, 2014.
- Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Sticking prevention of nano-structured monocrystalline silicon-membranes“. 4th International Conference from Nanoparticles and Nanomaterials to Nanodevices and Nanosystems, Korfu, Griechenland, 2013.

Literatur

- [1] Andreas Kalweit; Christof Paul; Sascha Peters; Reiner Wallbaum. *Handbuch für Technisches Produktdesign: Material und Fertigung, Entscheidungsgrundlagen für Designer und Ingenieure*. VDI-Buch. 2012.
- [2] H. Schaumburg. *Halbleiter*. Werkstoffe und Bauelemente der E-Technik. 1991.
- [3] Wolfgang Arden; Michel Brillouët; Patrick Coge; Mart Graef; Bert Huizing; Reinhard Mahnkopf. *More-than-Moore: White Paper*. Hrsg. von ITRS. 2015.
- [4] AMA Fachverband für Sensorik e.V. *Sensor-Trends 2014*. www.ama-sensorik.de, 2010.
- [5] T. K. Liu; P. Zheng; S. Kim; K. Kato; V. Stojanovic. „There’s still plenty of room at the bottom — And at the Top“. In: *2017 75th Annual Device Research Conference (DRC)*. 2017, S. 1–2.
- [6] Tobin J. Marks; Mark C. Hersam. „Semiconductors grown large and thin“. In: *Nature* 520 (2015), S. 631.
- [7] S. M. Spearing. „Materials issues in microelectromechanical systems (MEMS)“. In: *Acta Materialia* 48.1 (2000), S. 179–196.
- [8] WHO. *Cardiovascular diseases (CVDs)*. Hrsg. von WHO. 2017.
- [9] John Ross; John Braunwald. „Aortic Stenosis“. In: *Circulation* 38.1s5 (1968), S. 61–67.
- [10] Hans-Henning Eckstein; Jens-Rainer Allenberg. „Einfluss evidenzbasierter Indikationen zur Karotis-TEA auf die Stadieneinteilung extrakranieller Karotisstenosen – Notwendigkeit einer aktualisierten Klassifikation“. In: *Gefäßchirurgie* 6 (2001), S. 91.
- [11] D. Seidel. „Risikofaktoren der Arteriosklerose. Unterschiedliche Profile-unterschiedliche Mechanismen?“. In: *Zeitschrift für Kardiologie* 82 (1993), S. 33.
- [12] Deutsche Gesellschaft für Biomedizinische Technik. „Theranostische Implantate: VDE-Positionspapier“. In: *VDE-Positionspapier* (2011).

- [13] Johannes Baulmann; J. Nürnberger; J. Slany; Roland Schmieder; Dietrich Baumgart; Arno Schmidt-Trucksäss; P. Cremerius; O. Hess; Kai Mortensen; T. Weber. „Arterielle Gefäßsteifigkeit und Pulswellenanalyse“. In: *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 135 (2010).
- [14] J. Nürnberger; A. Mitchell; R. R. Wenzel; T. Philipp; R. F. Schäfer. „Pulswellenreflexion“. In: *Deutsche Medizinische Wochenschrift* 129.03 (2004), S. 97–102.
- [15] Stephan Klein; Marc Kraft; Henrik Botterweck; Jürgen Manigel; Martin Ryschka; Harald Hanke; Peter Schouwink; Jochim Koch. „Ausgewählte Beispiele wichtiger medizintechnischer Geräte“. In: *Dubbel: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Hrsg. von Karl-Heinrich Grote; Beate Bender; Dietmar Göhlich. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2018, S. 676–698.
- [16] Jonathan T. W. Kuo; Lawrence Yu; Ellis Meng. „Micromachined Thermal Flow Sensors—A Review“. In: *Micromachines* 3.4 (2012), S. 550–573.
- [17] S. Rajasekaran; H. Qu; K. Zakalik. „Thermal measurement of cerebrospinal fluid flow rate in hydrocephalus shunt“. In: *IEEE Sensors*. 2015, S. 1–4.
- [18] A. Glaninger; A. Jachimowicz; F. Kohl; R. Chabicovsky; G. Urban. „Wide range semiconductor flow sensors“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 85.1 (2000), S. 139–146.
- [19] YOLE Développement. *News market perspectives for the MEMS & sensors: Status of the MEMS Industry report*. 2017.
- [20] Remigius Poloczek. *Nanostrukturierter CMOS-kompatibler Drucksensor*. 2014.
- [21] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Creating a Monocrystalline Membrane via Etching and Sealing of Nanoholes Considering its Sealing Behavior“. In: *Journal of Nano Research* 25 (2013), S. 49–54.
- [22] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „A monocrystalline absolute pressure sensor with a pseudo-MOSFET read-out device for life-science applications“. In: *Proceedings of the IEEE Sensors Conference*. 2013, S. 1–4.
- [23] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczek; Klaus T. Kallis. „Beides gleichzeitig messen: Nanoskaliger Kombisensor zur simultanen Erfassung von Gasdruck und Gasfluss“. In: *chemie&more*. Bd. Vol. 3.14. 2014, S. 10–12.

- [24] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Konzept eines nanoskaligen Sensorsystems zur simultanen Erfassung von Druck und Flussgeschwindigkeit in Fluiden“. In: *ITG Fachbericht 250 zur 17. ITG/GMA Fachtagung Sensoren und Messsysteme*. 2014.
- [25] Sven Ebschke; Jakob Zimmermann; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. *Towards a nanoscale sensor system for intra-arterial simultaneous blood flow and pressure measurement*. Hannover, Germany, 2015.
- [26] ABB Measurement & Analytics, Hrsg. *Industrial flow measurement Basics and Practice*. 2011.
- [27] Peter von Böckh; Christian Saumweber. *Fluidmechanik*. 2013.
- [28] Merle Potter. *Mechanics of fluids*. 2017.
- [29] U. S. Energy department. *Doe fundamentals handbook - thermodynamics, heat transfer, and fluid flow*. 2016.
- [30] H. Bruus. *Theoretical Microfluidics*. Oxford Master Series in Physics. 2008.
- [31] N. T. Nguyen. *Mikrofluidik: Entwurf, Herstellung und Charakterisierung*. 2013.
- [32] M. Comes; P. Drumea; M. Blejan; I. Dutu; A. Vasile. „Ultrasonic Flowmeter“. In: *29th International Spring Seminar*. 2006, S. 386–389.
- [33] Noor Asyiddin. *Fluid flow measurement*. 2013.
- [34] Helene Berthet; Jacques Jundt; Jerome Durivault; Bruno Mercier; Dan Angelescu. „Time-of-flight thermal flowrate sensor for lab-on-chip applications“. In: *Lab Chip* 11.2 (2011), S. 215–223.
- [35] T. Yasukawa; A. Glidle; M. Nomura; J. M. Cooper. „Fabrication of robust 2-D and 3-D microfluidic networks for lab-on-a-chip bioassays“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 14.4 (2005), S. 839–846.
- [36] P. Plakk; P. Liik; P.-H. Kingisepp. „Hot-wire anemometer for spirography“. In: *Medical and Biological Engineering and Computing* 36.1 (1998), S. 17–21.
- [37] Louis Vessot King; Howard Turner Barnes. „XII. 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: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* (1914), S. 373–432.
- [38] R. J. Adamec; D. V. Thiel. „Self Heated Thermo-Resistive Element Hot Wire Anemometer“. In: *IEEE Sensors Journal* 10.4 (2010), S. 847–848.

- [39] Rainer Buchner; Christoph Sosna; Marcus Maiwald; Wolfgang Benecke; Walter Lang. „A high-temperature thermopile fabrication process for thermal flow sensors“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 130-131 (2006), S. 262–266.
- [40] P. J. French; H. Muro; T. Shinohara; H. Nojiri; H. Kaneko. „SOI pressure sensor“. In: *Solid-State Sensors and Actuators*. 1991, S. 181–184.
- [41] Anand Bewoor. *Metrology & measurement*. 2009.
- [42] D. Bernoulli; Johann Reinhold Dulssecker; Johann Heinrich Decker. *Danielis Bernoulli ... Hydrodynamica, sive De viribus et motibus fluidorum commentarii. Opus academicum ab auctore, dum Petropoli ageret, congestum*. 1738.
- [43] van Putten, A. F. P. „Integrated silicon anemometer“. In: *Electronics Letters* 10.21 (1974), S. 425–426.
- [44] William L. George; Jack L. Saltich. „Silicon pressure sensor“.
- [45] S. C. Terry; J. H. Jerman; J. B. Angell. „A gas chromatographic air analyzer fabricated on a silicon wafer“. In: *Electron Devices, IEEE Transactions on* 26.12 (1979), S. 1880–1886.
- [46] D. Moser; R. Lenggenhager; G. Wachutka; H. Baltes. „Fabrication and modelling of CMOS microbridge gas-flow sensors“. In: *Sensors and Actuators B: Chemical* 6.1-3 (1992), S. 165–169.
- [47] Sukhvinder S. Kang; Bharatan R. Patel; Kirankumar M. Kothari. „Gas flowmeter using thermal time-of-flight principle“. 1992.
- [48] M. Ashauer; H. Glosch; F. Hedrich; N. Hey; H. Sandmaier; W. Lang. „Thermal flow sensor for liquids and gases based on combinations of two principles“. In: *Sensors and Actuators A: Physical* 73.1-2 (1999), S. 7–13.
- [49] Mohtashim Mansoor; Ibraheem Haneef; Suhail Akhtar; Muhammad Aftab Rafiq; Andrea De Luca; Syed Zeeshan Ali; Florin Udrea. „An SOI CMOS-Based Multi-Sensor MEMS Chip for Fluidic Applications“. In: *IEEE Sensors*. 2016.
- [50] Liji Huang; Xiaozhong Wu; Yahong Yao; Chih-Chang Chen. „MEMS time-of-flight thermal mass flow meter“. US 8,794,082 B2. 2014.
- [51] Shahrzad Saremi; A. Alyari; Dara Feili; Helmut Seidel. „A MEMS-based hot-film thermal anemometer with wide dynamic measurement range“. In: *Proceedings of IEEE Sensors* (2014), S. 420–423.
- [52] Shuyun Wu; Qiao Lin; Yin Yuen; Y. C. Tai. „MEMS flow sensors for nano-fluidic applications“. In: Bd. 89. 2000, S. 745–750.

- [53] Dan E. Angelescu; Hua Chen; Jacques Jundt; Helene Berthet; Bruno Mercier; Frederic Marty. „Highly integrated microfluidic sensors“. In: *Proceedings SPIE 6886, Microfluidics, BioMEMS, and Medical Microsystems VI*. 2008.
- [54] A. Baldwin; L. Yu; E. Meng. „An Electrochemical Impedance-Based Thermal Flow Sensor for Physiological Fluids“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 25.6 (2016), S. 1015–1024.
- [55] J. Shim; G. Chung. „Fabrication and characteristics of Pt/ZnO NO sensor integrated SiC micro heater“. In: *IEEE Sensors*. 2010, S. 350–353.
- [56] Vivekananthan Balakrishnan; Hoang-Phuong Phan; Toan Dinh; Dzung Viet Dao; Nam-Trung Nguyen. „Thermal Flow Sensors for Harsh Environments“. In: *Sensors* 17 (2017).
- [57] Francois Iker; Nicolas Andre; Thomas Pardoën; Jean-Pierre Raskin. „Three-Dimensional Self-Assembled Sensors in Thin-Film SOI Technology“. In: *Journal of Microelectromechanical Systems* 15.6 (2006), S. 1687–1697.
- [58] Ulrich Hilleringmann. *Silizium-Halbleitertechnologie: Grundlagen mikroelektronischer Integrationstechnik*. 5., erg. und erw. Aufl. Studium. 2008.
- [59] G. Kaminsky. „Micromachining of silicon mechanical structures“. In: *Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures* 3.4 (1985), S. 1015–1024.
- [60] Ulrich Hilleringmann. *Mikrosystemtechnik Prozessschritte, Technologien, Anwendungen*. 2006.
- [61] Stephanus Büttgenbach. *Mikromechanik: Einführung in Technologie und Anwendungen*. Teubner-Studienbücher: Angewandte Physik. 1991.
- [62] Cen Shawn Wu; Yoshiyuki Makiuchi; ChiiDong Chen. „High-energy Electron Beam Lithography for Nanoscale Fabrication“. In: *Lithography*. Hrsg. von Michael Wang. Rijeka: IntechOpen, 2010.
- [63] R. H. Stulen; D. W. Sweeney. „Extreme ultraviolet lithography“. In: *IEEE Journal of Quantum Electronics* 35.5 (1999), S. 694–699.
- [64] Heinz Beneking. *Halbleiter-Technologie: Eine Einführung in die Prozesstechnik von Silizium und III-V-Verbindungen*. 1991.
- [65] G. Fidler; J. Muchow; M. Koch; H. Munzel. „Temporal evolution of silicon surface roughness during anisotropic etching processes“. In: *Proceedings of the IEEE Micro Electro*. 1992, S. 62–66.

- [66] Hiroyuki Fujiwara. *Spectroscopic ellipsometry : principles and applications*. 2007.
- [67] I. Kalimanova; N. Ilieva; M. Georgieva. „Ellipsometry and thin films parameters measurement“. In: *28th International Spring Seminar*. 2005, S. 472–475.
- [68] S. L. Flegler; J. W. Heckman; K. L. Klomparens. *Elektronenmikroskopie: Grundlagen. Methoden. Anwendungen*. 1995.
- [69] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Planar technology integration of monocrystalline Silicon-membranes using nanoholes“. In: *13th IEEE International Conference on Nanotechnology*. 2013, S. 1111–1114.
- [70] Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwinn; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. *Nanoscale thermal-time-of-flight sensor for measuring blood flow velocity*. Dresden, Germany, 2014.
- [71] Lienhard, IV, J. H.; Lienhard, V, J. H. *A Heat Transfer Textbook*. 5th. 2019.
- [72] Simon M. Sze; Kwok K. Ng. *Physics of semiconductor devices*. 2006.
- [73] George Sidebotham. *Heat transfer modeling : an inductive approach*. 2015.
- [74] A. Tarraf; J. Daleiden; S. Irmer; D. Prasai; H. Hillmer. „Stress investigation of PECVD dielectric layers for advanced optical MEMS“. In: *Journal of Micromechanics and Microengineering* 14.3 (2004), S. 317.
- [75] Sven Ebschke; Remigius R. Poloczec; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Creating a Monocrystalline Membrane via Etching and Sealing of Nanoholes Considering its Sealing Behavior“. In: 2013.
- [76] C. Jia; D. Reuter; Z. Wen; M. Baum; M. Wiemer; T. Gessner. „FEM simulation and its application in MEMS design“. In: *Semiconductor Conference Dresden*. 2011, S. 1–4.
- [77] G. Müller; C. Groth. *FEM für Praktiker: Grundlagen: Basiswissen und Arbeitsbeispiele zu FEM Anwendungen; Lösungen mit dem Programm ANSYS Rev. 9/10 ; mit zahlreichen Beispielen auf CD-ROM*. Edition expertsoft. 2007.
- [78] Henk Versteeg; W. Malalasekera. „An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method“. In: *Seribula (sistema Librum 2.0)* (2019).
- [79] Joseph Hirschfelder. *Molecular theory of gases and liquids*. 1954.
- [80] Tracy Simpson. *Silicon and siliceous structures in biological systems*. 1981.
- [81] Lothar Gehm. *Rheologie : praxisorientierte Grundlagen und Glossar*. 1998.
- [82] Peter Atkins. *Physikalische Chemie*. 2001.

- [83] Kenneth L. Barbalace. „Environmental Chemistry“. In: *Periodic Table of the Elements–aluminum* (2017).
- [84] Sven Ebschke; Jonas Gerwinn; Anand V. Patel; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. *Modelling and Simulation of a Thermal-Time-of-Flight (TToF) Sensor for measuring the blood flow velocity*. Hannover, Germany, 2014.
- [85] A. G. O’Neill. „Semiconductor technology computer aided design“. In: *Third International Conference on Computation in Electromagnetics*. 1996, S. 235–240.
- [86] Soitec Unibond. *Datasheet: G4P-005-02*. Hrsg. von Soitec Unibond. 2007.
- [87] Kris V. Srikrishnan. „Smart-cut process for the production of thin semiconductor material films“. 1999.
- [88] Wagemann. *Silizium-Planartechnologie : Grundprozesse, Physik und Bauelemente*. 2003.
- [89] Heiner Ryssel. *Ionenimplantation*. 1978.
- [90] Sven Ebschke; Michael Wieker; Maximilian Mühlbauer; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. *Optimization of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor by using electron-beam lithography (EBL)*. Paderborn, Germany, 2014.
- [91] Allresist Gesellschaft Für Chemische Produkte zur Mikrostrukturierung mbH. *Datenblatt: PMMA Polymere 50K, 200K, 600K, 950K als E-Beam Resistserien AR-P 631, 641, 661, 671 (Chlorbenzen) AR-P 632, 642, 662, 672 (Anisol) und AR-P 639, 649, 669, 679 (Ethylactat)*. 2012.
- [92] Allresist Gesellschaft Für Chemische Produkte zur Mikrostrukturierung mbH. *Datenblatt: Negativ-E-Beam Resists für mix & match AR-N 7500 (hochauflösend) und AR-N 7520 (höchstauflösend)*. 2012.
- [93] G. Heinke. *Bondverfahren in der Mikroelektronik*. Wissenschaftlich-technische Information für die Aus- und Weiterbildung. 1980.
- [94] Iskender Yilgör; James E. McGrath. „Polysiloxane containing copolymers: a survey of recent developments“. In: *Polysiloxane copolymers/anionic polymerization*. 1988, S. 1–86.
- [95] Daniel J. O’Brien; Patrick T. Mather; Scott R. White. „Viscoelastic properties of an epoxy resin during cure“. In: *Journal of composite materials* 35.10 (2001), S. 883–904.
- [96] Emel Yilgör; Iskender Yilgör. „Silicone containing copolymers: synthesis, properties and applications“. In: *Progress in Polymer Science* 39.6 (2014), S. 1165–1195.

- [97] O. Ecin; R. Zhao; B. J. Hosticka; A. Grabmaier. „Thermo-fluid dynamic Time-of-Flight flow sensor system“. In: *IEEE Sensors 2012*. 2012, S. 1–4.
- [98] Sung Wook Hong; Yong-Tae Kang; Clement Kleinstreuer; Junemo Koo. „Impact analysis of natural convection on thermal conductivity measurements of nanofluids using the transient hot-wire method“. In: *International Journal of Heat and Mass Transfer* 54.15-16 (2011), S. 3448–3456.
- [99] Sven Ebschke; Michael Wieker; Jonas Gerwinn; Andre Löchte; Klaus T. Kallis; Horst L. Fiedler. „Charging effects on SOI based NEMS by the example of a nanoscale Thermal-Time-of-Flight (TToF) sensor“. In: *Proceedings of the 14th International 14th IEEE Conference on Nanotechnology*. 2014, S. 785–788.
- [100] Alberto Bonanno; Valentina Cauda; Marco Crepaldi; Paolo Motto Ros; Marco Morello; Danilo Demarchi; Pierluigi Civera. „A low-power read-out circuit and low-cost assembly of nanosensors onto a 0.13um CMOS micro-for-nano chip“. In: *5th IEEE International Workshop on Advances in Sensors and Interfaces IWASI*. 2013, S. 125–130.

Herz-Kreislauf-Erkrankungen sind laut einer Studie der Weltgesundheitsorganisation (WHO) die weltweit häufigste Todesursache für Menschen. Neuartige Entwicklungen in der Medizintechnik helfen, diese Art von Erkrankungen frühzeitig zu diagnostizieren. Unabdingbar ist dabei ein umfassendes und permanentes Monitoring der Vitalfunktionen mittels neuer medizinischer Sensoren.

In dieser Dissertation wird ein nanoskaliger MEMS-Flusssensor entwickelt und untersucht, welcher hierfür Grundlagen für neue Diagnosemöglichkeiten des Blutkreislaufes bietet. Dieser wird hinsichtlich thermischer Durchflussmessverfahren, insbesondere der Anemometrie, Kalorimetrie und des Thermal-Time-of-Flight-Verfahrens, bewertet. Basierend auf einer analytischen Modellierung, werden numerische, computer-basierende, finite-elemente Berechnungen zur Konzeptionierung des Sensors genutzt. Zur Prototypenentwicklung auf Silicon on Insulator-Wafer, werden Halbleitertechnologieprozesse, wie eine Elektronenstrahlithografie und chlorbasierte Trockenchemieätzverfahren, angepasst und optimiert. Weiterhin werden nanoskalige Sensorstrukturen (sub-100nm) entwickelt, um Skalierungseffekte zu untersuchen und somit eine Erhöhung der Sensitivität zu realisieren. Eine passende Aufbau- und Verbindungstechnik für die Mikrofluidik mit Signalaufbereitung wird ebenfalls implementiert. Abschließend werden Prototypen des Sensors mittels experimentellen Versuchsreihen in einer definierten Messumgebung evaluiert und bewertet.